

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Utveckling av processdiagnostik för ökad prestanda vid termisk omvandling av biomassa	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Development of process monitoring for improved efficiency in thermochemical conversion of biomass	
Universitet/högskola/företag Chalmers Tekniska Högskola AB	Avdelning/institution Energiteknik/SEE
Adress Hörsalsvägen 7B, 412 91, Göteborg	
Namn på projektledare Klas Andersson	
Namn på ev övriga projektdeltagare Göran Hermansson, Bartosz Dziejarski, Viktor Andersson, Sven Andersson, Thomas Allgurén	
Nyckelord: 5-7 st Biomassa, kraftvärme, alkali, elverkningsgrad, diagnostik	

Sammanfattning

Det övergripande målet i projektet är att skapa tekniska förutsättningar för förbättrad verkningsgrad i biobaserad kraftvärme som kombineras med befintliga avfallspannor. Potentialen är god då ångdata är blygsamma i rent biomassabaserade system på grund av betydande säkerhetsmarginaler i drift som kopplar brist på verktyg och driftstrategier med avseende på högtemperaturkorrosion på värmeöverförande ytor. Denna korrosion skapas primärt genom reaktioner mellan alkalikomponenter och klor i rökgaserna. Projektet fokuserar därför på diagnostik för att mäta alkali i rökgaser i kraftvärmeprocesser. Detta kopplas till en omfattande analys av en utvald kraftvärmeanläggning i Uddevalla där långtidsförsök genomförts, data och prestanda analyserats.

I projektet har ett mätsystem tillämpats för att mäta total alkalihalt och kaliumkoncentration rökgaser. Systemet som mäter total alkalihalt baseras på ytjonisering. Ett nytt diagnostiskt system har också utvecklats som en följd av projektet, baserat på samma princip. Detta system kan, utöver att mäta total alkalihalt samt kalium i gasfas, också kvantifiera ett stort antal andra alkali-innehållande salter som också är högst relevanta för att bestämma korrosionspotentialen i rökgaser. Vi kallar denna metod för TMSI (Temperature-modulated-surface-ionization). Utöver detta har vi kombinerat vår experimentella data med processdata för att kvantifiera potentialen för ökad verkningsgrad med hjälp av processberäkningsverktyg. Vi har också tagit fram nya förslag till utformning av system för elproduktion baserad på biomassa i medelstora kraftvärmeanläggningar.

TMSI-metoden har tillämpats i slutskedet av projektet i ett samarbete med Umeå Universitet där vi jämfört metoden med en absorptionsbaserad teknik. Resultaten har varit goda och kommer presenteras på Combustion Symposium, Juli 2026.

Detaljerade beräkningar på alternativa konfigurationer av Lillesjös typ av kraftvärmeanläggning har gjorts i form av termodynamisk modellering. Baserat på mätdata från Lillesjö, sammansättning på bränsle och driftförhållanden har uppskattningar gjorts på potentialen att höja ångdata; denna potential är god till mycket god. Då Lillesjö utgör en konventionell typ av panna med typiska bränsleförhållanden för denna sektor i Sverige bör således potentialen nationellt också vara god till mycket god för att öka elproduktionen från denna sektor. En aktiv alkalimätning baserat på SID/TMSI-systemet skapar en betydligt säkrare bedömning av rökgasernas korrosivitet jämfört med vad som är tillgängligt idag. Detta gör att man kan höja ångdata och få ut mer tekniskt arbete och el från svensk kraftvärme.

Summary

The overall goal of the project is to create the technical conditions for improved efficiency in biomass-based combined heat and power production when integrated with existing waste-fired boilers. The potential is significant, as steam data in purely biomass-based systems are modest due to large operational safety margins related to fouling on heat-transfer surfaces, combined with a lack of tools and operational strategies to manage such deposits.

In this project, two new measurement systems have been applied to measure total alkali content and potassium concentration in flue gases. These components have proven to be the most reliable chemical indicators of high fouling risk. The system used to measure total alkali content is based on surface ionization. A new diagnostic system has also been developed as a result of the project, based on the same principle. In addition to measuring total alkali content and gas-phase potassium, this system can also quantify a wide range of other alkali-containing salts that are highly relevant for determining the corrosion potential of the flue gases. We refer to this method as SID/TMSI (Surface ionization/temperature-modulated-surface-ionization).

In addition, we have combined our experimental data with process data to quantify the potential for increased efficiency using process-simulation tools. We have also developed new proposals for the design of electricity-generation systems based on biomass for medium-sized CHP plants.

The TMSI method was applied in the final phase of the project in collaboration with Umeå University, where we compared the method with an absorption-based technique. The results were very promising and have recently been published. In a recently initiated project, long-term tests are being carried out to measure total alkali content — the system on which TMSI is based and which has been extensively used in this project.

Detailed calculations of alternative configurations for Lillesjö-type CHP plants have been performed using thermodynamic modelling. Based on measurement data from Lillesjö, fuel composition, and operating conditions, estimates have been made of the potential to increase steam data; this potential is good to very good. Since Lillesjö represents a conventional type of boiler with typical fuel characteristics for this sector in Sweden, the national potential to increase electricity production from this sector should also be good to

very good. Active alkali measurement based on the SID system enables a more reliable assessment of flue-gas corrosivity compared with what is available today.

Inledning/Bakgrund

Inom den svenska kraftvärmesektorn används idag olika typer och kvaliteter på biomassa. Kvaliteten på ett bränsle återspeglar dess egenskaper, värmevärde och sammansättning. Det finns stora variationer i kvalitet, dvs. sammansättning, mellan olika biogena bränslen även om de som grupp anses ha låg kvalitet jämfört med till exempel kol. En av de viktigaste parametrarna att beakta är askan och dess sammansättning. Askkorrosion kan avsättas på ytor inuti pannan vilket minskar värmeöverföringen men kan också korrodera ytmaterialet. Denna typ av korrosion kallas ofta högtemperaturkorrosion (HTC). Sannolikheten för att en askpartikel avsätts beror på dess fysikaliska egenskaper, särskilt smältpunkten. En smält askpartikel blir klibbig vilket ökar sannolikheten för att partikeln avsätts på en yta efter impaktion.

En grupp särskilt problematiska ämnen relaterade till HTC är alkalikloriderna (natrium- och kaliumkloriderna). Dessa ämnen har en relativt låg smältpunkt, vilket ökar risken för avsättning, och är också mycket korrosiva. Några av de högsta alkali- och klorhalterna i biomassa finns i restprodukter från både land- och havsbaserad odling. Även avfallsströmmar, både hushålls- och industriavfall, är generellt sett också höga i alkali och klor. En vanligt förekommande strategi för att minska risken för avlagringar och HTC är att driva pannan med värmeytorernas temperaturer som hålls under smältpunkten för de förväntade askkomponenterna. En sådan strategi kommer att minska behovet av rengöring och underhåll av enheten men kommer också att begränsa temperaturen på den producerade ångan. Att hålla ångtemperaturen låg kommer att minska potentialen för kraftproduktion. Detta gör dessa bränslen mer lämpliga för värmeproduktion snarare än kraftproduktion.

I detta projekt har vi studerat potentialen att öka verkningsgraden i samband med förbränning av biomassa i rosteldade kraftvärmearnlaggningar. Specifikt har vi studerat förekomst av alkali, samt balans mellan svavel och klor vid förbränning av olika bränslemixar i en svensk medelstor kraftvärmearnlaggning. Vi har jämfört metoder för att mäta total alkalihalt och kalium i gasfas, samt utvecklat en ny metod för att tidsupplöst kunna mäta en komplex sammansättning av olika alkalialter i form av aerosoler med en metod som vi kallar SID/TMSI. Potentialen för förbättrad verkningsgrad har kvantifierats med hjälp av termodynamiska beräkningar där vi nyttjat processdata från samma industriella anläggning som vi gjort våra experiment.

Genomförande

Arbetets genomförande baseras på tre arbetspaket (WP 1-3) som har löpt genom hela projektet. Nedan ges en övergripande beskrivning av respektive arbetspaket varefter genomförandet beskrivs mer i detalj, baserat på använda metoder och metodutveckling.

WP 1. Vi har genomfört grundläggande experiment i både pilot- och industriskala. En pilotskaleanläggning på 100 kW vid Chalmers har använts för att undersöka miljön runt en överhettare vid förbränning av biogena bränslen av både låg och hög kvalitet. Förhållandena runt överhettarna har varit avgörande för hur kraftvärmeverket fungerar: tryck och temperatur på ångsidan har påverkat verkningsgraden direkt, och beläggningar

på gassidan har styrt behovet av sotblåsning, vilket har försämrat prestandan och ökat underhållskostnaderna.

I försök i kommersiell skala har vi kartlagt miljön runt befintliga överhettare för att förstå hur den hänger ihop med pannans drift och hur den kan styras mer effektivt. Arbetet har utförts av Uddevalla Kraft AB, Chalmers/Energiteknik och Babcock & Wilcox Vølund AS. Chalmers/Energiteknik har haft ansvar för planering, genomförande och rapportering.

WP2. Vi har demonstrerat ett kombinerat verktyg för processtyrning och diagnostik. Vi har undersökt möjligheten att förbättra prestandan i svenska kraftvärmeverk. Nyckeln till förbättringarna har varit att möjliggöra mer precis processtyrning och att kunna anpassa driften efter egenskaperna hos det inkommande bränslet. Vinsten har varit kopplad till möjligheten att höja överhettartemperaturerna. En av de viktigaste delarna i detta arbete är utvecklingen av en ny diagnostisk metod som vi kallar för SID/TMSI för mätning och speciering av alkali. Arbetet har utförts av Chalmers/Energiteknik.

WP3. Modellering. Baserat på de data som har samlats in i projektet har modellering genomförts för att bedöma korrosionsgränser i relation till specifika driftsförhållanden i anläggningar. Modelleringen har använts för att undersöka gränserna för processtyrning i både befintliga och nya anläggningar samt för att identifiera potentialen för ökad elproduktion och förbättrad termisk prestanda i de studerade systemen.

En ”dubbel-pannekonfiguration” har utvärderats genom processmodellering som har integrerat de nya projektdata där pann- och överhettarvillkor har definierats för olika bränsleegenskaper. Denna dubbelpanelösning har syftat till att ytterligare förbättra verkningsgraden och kan vara ett intressant alternativ vid framtida investeringar när elproduktionen ska maximeras samtidigt som last- och bränsleflexibilitet bibehålls. Arbetet har utförts av Chalmers/Energiteknik i samarbete med Babcock & Wilcox Vølund AS.

Experimentella metoder

Det experimentella arbetet innehåller arbete som utförts både på labbskala och industriell skala (Lillesjö). Avstämningar har också gjorts mot ett parallellt projekt som löpt i Danmark via Götaverken Miljö Ab som deltagit i det senare.

Mätningarna i pilot och industriell skala har huvudsakligen fokuserat på alkalihalten i gasfasen, deposition, temperatur och gassammansättning. Vi har försökt studera tillgängligheten av alkalikomponenter i de kritiska områdena i en panna (nära överhettarna) med avseende på deposition. Lyckade mätningar har genomförts men fler långtidskampanjer behöver genomföras i framtida arbete för att få bättre kvalitet i mätdata. Mätuppsättningen som använts inkluderar temperaturmätning, standardanalysatorer för gas (FTIR) samt ett nytt instrument för att mäta total alkalihalt. Utöver detta har processdata behandlats som exempelvis inkluderar tryck och temperatur, som input till processberäkningar. Mätningar i labbskala har genomförts på Chalmers för att validera mätning av total alkalihalt med hjälp av laserbaserad absorption av kalium i gasfas. Dessutom har ett nytt instrument utvecklats för tidsupplöst mätning av flera alkalikomponenter samtidigt, TMSI.

Mätningar och data från Lillesjöverket

Mätningar i testkampanjer har genomförts i Lillesjös kraftvärmeanläggning för att få tillgång till detaljerad data på temperatur, gassammansättning, korrosivitet och partikelhalt på olika positioner belägna i anslutning till värmeöverförande ytor. Temperaturen mättes med en sugpyrometer på ett djup av 2 m. Gassammansättningen analyserades med en uppvärmd extraktiv provtagningssond som också nådde 2 m in i rökgasströmmen. Den provtagna gasen analyserades därefter med en FTIR samt en paramagnetisk syreanalysator

Befintlig processdata från Lillesjöverket har använts för att skapa ett referensfall i beräkningarna, men också som input till modellen. Därefter har data från de experimentella försöken i Lillesjö lagts till för att i detalj kvantifiera förbränningsmiljön. Beräkningar baserade på den insamlade datan har sedan utförts för att undersöka potentialen i olika anläggningskonfigurationer och driftsstrategier. Simuleringsarbetet har baserats på beräkningar i verktygen Epsilon, för ångcykelsimuleringar, FactSage för gas- och fastjämviktsberäkningar, och Chemkin för gasfaskinetik.

Experiment labb och pilotskala: utveckling av SID/TMSI

En betydande del av det experimentella arbetet i projektet har lagts på att vidareutveckla mätprinciper som bygger på ytjonisering för att kunna kvantifiera olika alkalikomponenter som finns både i form av aerosoler och i gasfas i rökgaserna i ett avfallskraftvärmeverk. Här beskrivs kort teoretiska principer för denna teknik samt den utvecklade uppställning som använts som bas i arbetet. I sektionen referenser anges de publikationer som genererats av arbetet.

Ytjonisering (SI) uppstår när atomer desorberar termiskt i jonform från en metallyta. Joniseringsgraden (α) ges av Saha–Langmuir-ekvationen, som relaterar flödet av positiva joner (n^+) till neutrala atomer (n_0) som lämnar ytan per tidsenhet:

$$\alpha = n_+/n_0 = \frac{g_+(1 - r_+)}{g_0(1 - r_0)} \exp\left(\frac{e(\phi - IP)}{k_B T}\right)$$

Här är $g_+/g_0 = 0,5$ för alkalimetaller, medan reflektionskoefficienterna r_+ och r_0 är nära noll. $e\phi$ är ytans arbetspotential, eIP joniseringspotentialen, k_B Boltzmanns konstant och T yttemperaturen. För de flesta atomer gäller att $\phi < IP$, vilket innebär att neutral desorption dominerar och att jon-desorption kan försummas. Alkalimetaller uppfyller däremot ofta $\phi > IP$, vilket starkt gynnar jonemission. Joniserings sannolikheten (β) uttrycks som

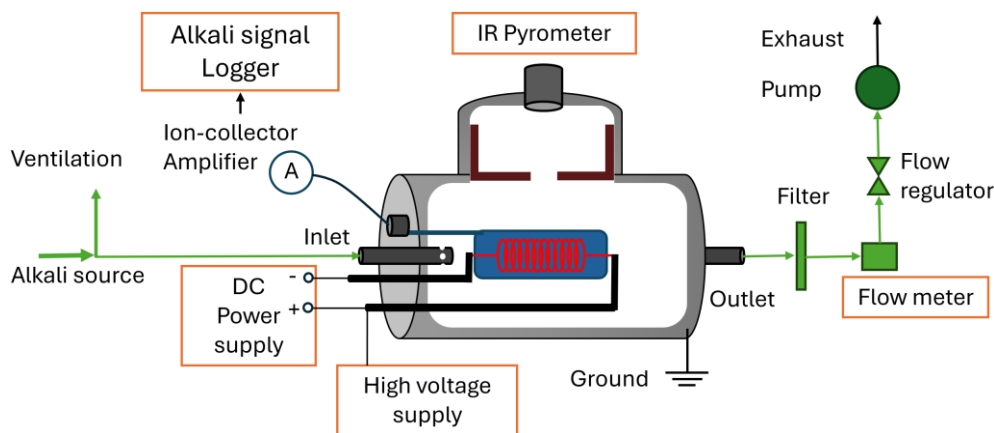
$$\beta = \alpha/(\alpha + 1)$$

och når över 99 % för K och över 89 % för Na på platina vid 1500 K. Andra alkalimetaller (Li, Rb, Cs) uppvisar också höga joniserings sannolikheter, men är mindre vanliga och beaktas sällan i studier av termisk omvandling. Alkaliska jordartsmetaller kan joniseras, men deras starkare bindning till metallytor hämmar desorption under 1500 K. Därför ger SI hög selektivitet och känslighet för K och Na, vilket gör metoden väl lämpad för alkalidetektion. Dessutom förhindrar den höga temperaturen och de katalytiska

egenskaperna hos platina att föroreningar som tjära eller sot stör mätningen, något som ofta påverkar andra online-metoder för alkalidetektion, såsom optiska tekniker.

Grundutförande för SID-instrument (SID/TMSI)

De huvudsakliga komponenterna i SID, visade i Figur 1, består av en resistivt upphettad platinafilament (röd spiral i Figur 1) och en närliggande metallisk jonkolektorplatta (blå platta i Figur 1). När gas som innehåller alkalimetaller kommer in i SID kommer en del av alkali att avdunsta och dissociera på det heta filamentet för att därefter desorbera som alkalijoner. Filamentet hålls på en positiv potential, vilket tvingar alkalijonerna att diffundera mot den jordade kollektorplattan, där deras träff genererar en ström som är proportionell mot alkalimasskoncentrationen i provgasen.



Figur 1. Schematisk översikt av ytioniseringsdetektorn (SID) med det heta platinafilamentet (rött) och jonkolektorplattan (blå), samt den omgivande utrustningen. Varje komponent markerad med en orange ruta är kopplad till en dator för styrning av parametrar och insamling av online-data.

Den experimentella uppställningen i Figur 1 inkluderar ett gasflöde med alkalimetaller som passerar genom SID. Ett gasflöde på $700 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ genereras av en sugpump placerad nedströms SID, reglerad med en nålventil och mätt online med ett flödesinstrument (Model 5220-2, TSI Inc.). Alkali-källan i dessa experiment kommer från en aerosolpartikelgenerator (Model 3076, TSI Inc.), som introducerar ett stabilt och kontrollerbart flöde av alkali i form av submikrona partiklar suspenderade i gas. Partiklarna genereras genom att en alkalimetallsaltlösning förstoftas med trycksatt kväve eller luft genom en kritisk strypning, vilket skapar polydispersa droppar. Dropparna torkas sedan i en öppen diffusionstork. Masskoncentrationen av alkalipartiklar är proportionell mot partikelstorleken, vilken styrs genom att ändra koncentrationen i lösningen. Aerosolgeneratoren producerar ett stabilt flöde av polydispersa alkalipartiklar under flera timmar, med en medeldiameter på cirka 45 nm från en 0,5 mM KCl-lösning.

SID-enheten består av en 180 mm lång mätcell formad som ett T, med en innerdiameter på 41 mm. Filamentet består av en platinatråd med diameter 0,35 mm (>99,99 % renhet), formad till en spiral (cirka 10 mm bred och 3 mm i diameter) med tio varv. Filamentet värms resistivt med en likströmskälla (Model BK9201B, Elfa) med ström utgång 0–10 A och en responstid på 0,1 s. En högspänningskälla (Model EA-PS 9500-06 T, Elektro-Automatik) med ett intervall från –500 till +500 V används för att applicera en potential över filamentet.

För att säkerställa stabila och reproducerbara mätningar är hela SID-systemet monterat i en robust hållare med justerbara fästen, vilket gör det möjligt att finjustera filamentets position i förhållande till kollektorplattan. Temperaturen, spänningen och strömmen loggas kontinuerligt via ett datorstyrt system, vilket möjliggör detaljerad analys av joniseringsprocessen och dess beroende av filamentets driftparametrar.

Termodynamiska beräkningar

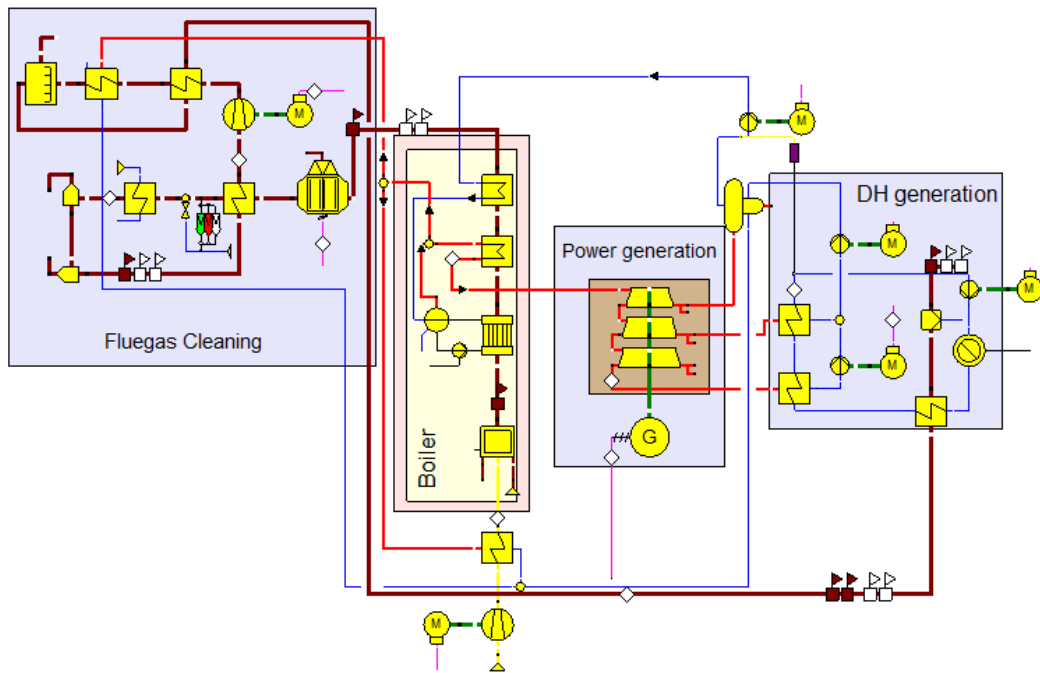
Olika anläggningskonfigurationer har utvärderats termodynamiskt med hjälp av programvaran Epsilon Professional. En detaljerad modell baserad på kraftvärmeverket i Lillesjö används som referensmodell (se Figur 2), och fungerar även som basmodell från vilken modeller för olika konfigurationer har tagits fram. Som nämnts tidigare producerar Lillesjö-anläggningen ånga vid 400 °C och 40 bar, som används för elproduktion, och har två ångkondensorer som arbetar vid två separata trycknivåer. Den värme som avges i ångkondensorn används för att producera varmvatten till det lokala fjärrvärmesystemet. Temperaturen på fjärrvärmevattnet som kommer in i anläggningen höjs innan ångkondensorn genom att utnyttja värme från rökgaserna i en rökgaskondensator.

Det bör nämnas att anläggningen drivs något olika beroende på säsong och värmebehov. Data för den producerade ångan är oförändrad, men under perioder med lågt värmebehov förbikopplas rökgaskondensorn och trycket i ångkondensorn sänks. Detta påverkar naturligtvis anläggningens verkningsgrad. Den relativa skillnaden mellan de olika konfigurationer som undersöks i detta arbete förblir dock densamma oberoende av driftläge. Alla modeller och resultat som presenteras här representerar därför endast driftläget under månader med högt värmebehov, då rökgaskondensorn är i drift. Några viktiga driftdata som används i modellen sammanfattas i Tabell 1.

Tabell 1. Några temperaturer och tryck som används i referensmodellen.

Primärånga	Tryck [bar]	Temperatur [°C]	Förvärmare	Ångkondensor 1	Ångkondensor 2	Rökgastemperatur efter RG-kondensator [°C]
40	400	11	0,85	0,39	–	–

Layouten för referensmodellen visas i Figur 2 och kan delas in i fyra delar: ångproduktion, elproduktion, värmeproduktion och rökgasrening. Både layouten och temperaturerna och trycken är baserade på kraftvärmeverket i Lillesjö.



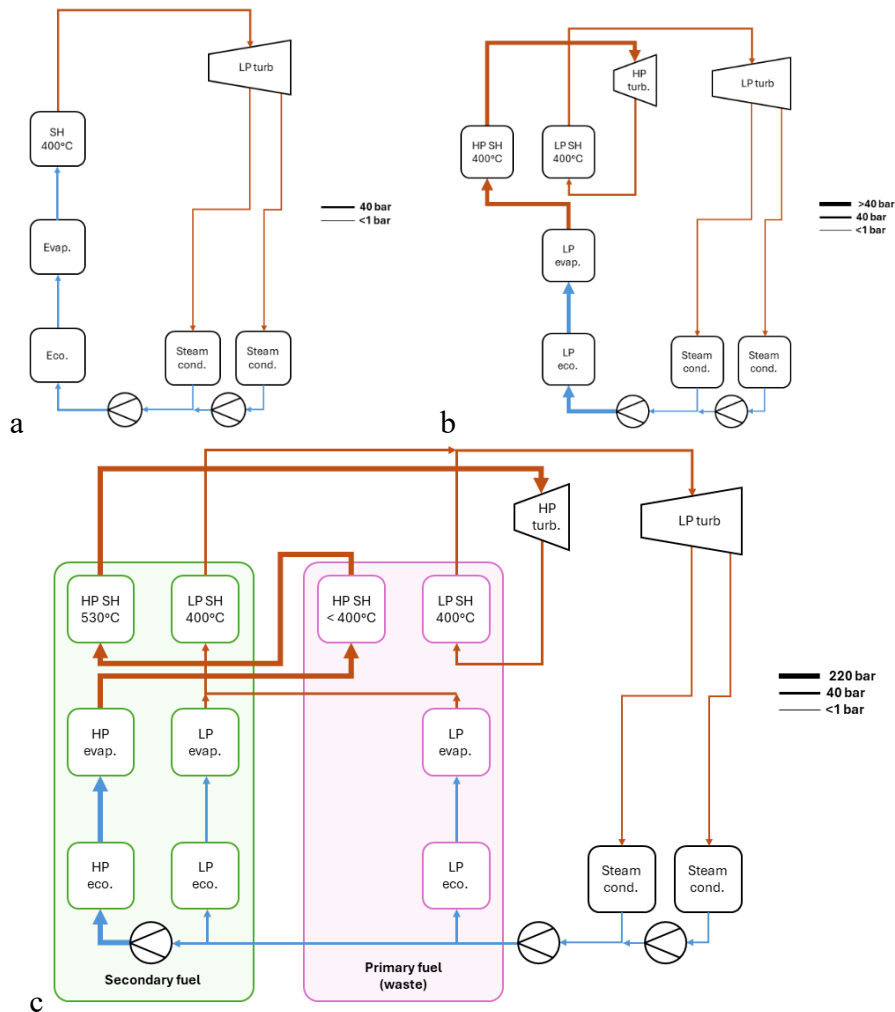
Figur 2. Schematisk översikt över referensmodellen i ebsilon.

Referensmodellen är en av tre olika anläggningskonfigurationer som har undersökts i detta arbete. En förenklad layout av var och en av dessa konfigurationer visas i Figur 3. Layouterna visar endast de huvudsakliga ång- och vattenflödena i ångcykeln. Rökgasrening och värmeproduktion är identiska i alla konfigurationer och utelämnas därför i figurerna för att tydliggöra skillnaderna mellan dem.

Den ursprungliga konfigurationen visas i Figur 3a, där ånga genereras vid 40 bar och 400 °C, expanderas i turbinen och kondenseras innan den återförs till pannan. Den andra konfigurationen, med återupphettning (reheat), visas i Figur 3b. I denna konfiguration höjs ångtrycket till 200 bar medan temperaturen hålls vid 400 °C. Detta möjliggör införandet av ett högtrycksturbinesteg där ångan expanderas innan den återupphetas. Trycknivåerna i högtrycksturbinen är valda så att inloppstrycket till den andra turbinen är 40 bar. Med en återupphettningstemperatur på 400 °C blir ångan som går in i den andra turbinen densamma som i basmodellen, vilket gör att flödena nedströms turbinen förblir oförändrade mellan konfigurationerna.

Den tredje konfigurationen, visad i Figur 3c, representerar en anläggning med en extra panna för parallell samförbränning. I denna jämförelse är det primära bränslet alltid avfall, medan olika bränslen används som sekundärbränsle i den extra pannan. De två pannorna är kopplade till samma ångcykel, vilket framgår av figuren. Denna konfiguration har också en återupphettningscykel, men här ökas både temperaturen och trycket in i högtrycksturbinen. De exakta värdena beror på egenskaperna hos det sekundära bränslet. Layouten förblir dock densamma oavsett bränsle.

2026-206550-0001 2026-03-31



Figur 3. Förenklade layouter av de tre olika anläggningskonfigurationer som har undersökts i detta arbete: a) referensmodell, b) återupphettningscykel (reheat), och c) parallell samförbränning.

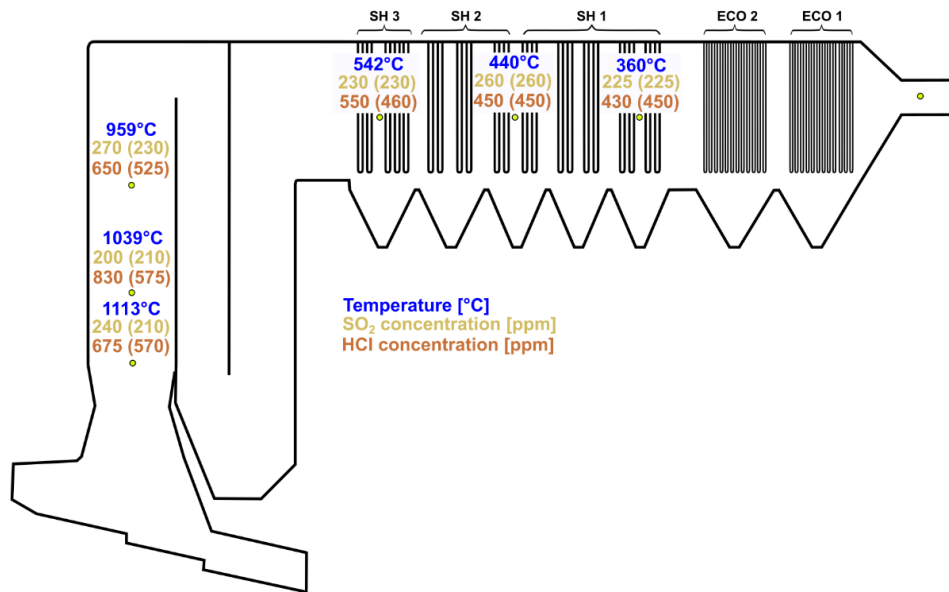
Resultat och diskussion

I denna sektion beskrivs utvalda resultat från projektet. För mer detaljerade resultat hänvisas läsaren till de publikationer som skapats i projektet.

Resultat från mätningar i avfallspanna

Rökgastemperaturen samt koncentrationen av HCl och SO₂ visas schematiskt i Figur 4 för sex olika positioner i pannan. Dessa mätningar utfördes med samma utrustning, vilket innebär att det endast gick att mäta i en position åt gången. Siffrorna inom parentes visar koncentrationen som uppmättes i position M7 under samma period som mätningen i respektive position genomfördes. Resultaten visar ingen tydlig trend för variationen av SO₂ mellan positionerna. Koncentrationen går upp och ner växelvis mellan mätpunkterna. Variationerna är dessutom relativt små — endast cirka 70 ppm mellan lägsta och högsta värde. Som jämförelse är skillnaden nästan 400 ppm för HCl.

HCl uppvisar däremot en tydligare trend: koncentrationen ökar från den första till den andra positionen och minskar därefter kontinuerligt. Detta kan indikera att HCl fortfarande frigörs mellan position ett och två. Minskningen som följer efter position två tyder på att HCl reagerar och bildar andra klorhaltiga föreningar, exempelvis alkaliklorider. Reduktionen i HCl-koncentration fortsätter hela vägen till konvektionsdelen och stabiliseras först när rökgasen når den andra överhettarsektionen. Detta överensstämmer med reaktionskinetiken för klorering av alkaliföreningar, som avtar vid sjunkande temperatur.



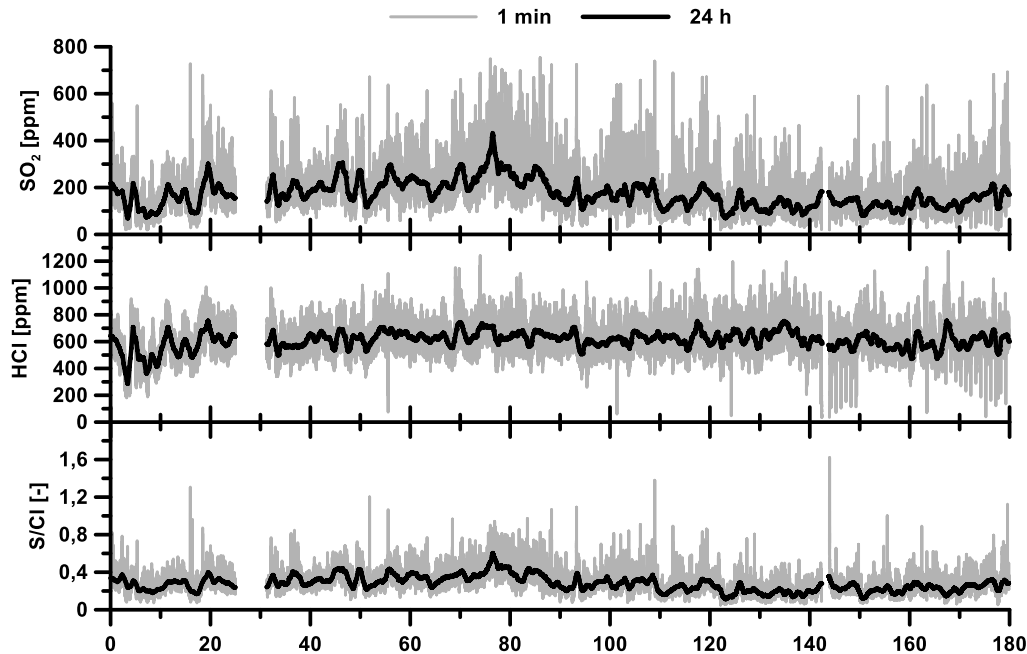
Figur 1. Uppmätt temperatur samt SO₂- och HCl-koncentration vid olika positioner i anläggningen. Koncentrationerna inom parentes anger den koncentration som uppmättes i position M7 vid samma tidpunkt.

Långtidsdata

Data från position M7, som är placerad vid pannans rökgasutlopp, används för att studera långsiktiga variationer i SO₂- och HCl-koncentrationerna. Dessa data kommer från det lokala mätsystemet som används för driftövervakning av pannan och som mäter kontinuerligt under drift. En femårsperiod analyserades för att se om det finns några tydliga variationer kopplade till säsong eller liknande.

För att ge en bild av variationerna över tid har en 180 dagar lång period valts ut och presenteras i Figur 5. Figuren visar variationerna i SO₂-koncentration (överst), HCl-koncentration (mitten) och S/Cl-kvot (nederst) i rökgasen under ungefär ett halvår. Data visas i två tidsupplösningar: den grå linjen representerar minutmedelvärden, medan den svarta linjen visar ett glidande 24-timmarsmedelvärde baserat på minutvärdena.

Figur 5 visar att det finns relativt stora variationer på kort tidsskala. För SO₂ varierar koncentrationen från 100 ppm till 400 ppm inom några minuter. För HCl ligger variationen mellan 500 ppm och 800 ppm under samma tidsperiod. Det glidande medelvärdet visar dock att dessa snabba variationer svänger kring en relativt stabil nivå på cirka 200 ppm för SO₂ och 650 ppm för HCl. Detta resulterar i en S/Cl-kvot som för det mesta ligger under 0,5 och endast vid några få tillfällen kortvarigt överstiger 1.



Figur 5. Exempel på långsiktiga variationer i SO₂- och HCl-koncentration samt S/Cl-kvot vid pannans rökgasutlopp under en period på 180 dagar. Figuren visar minutmedelvärden (grå linje) och ett glidande 24-timmarsmedelvärde (svart linje).

S/Cl-kvoten ger en god indikation på vad man kan förvänta sig av alkalikemin. Det har visats många gånger, även om de exakta värdena varierar från fall till fall, att en låg S/Cl-kvot gynnar bildningen av alkaliklorider framför alkalisulfater. Det är också välkänt att S/Cl-kvoten måste ligga klart över ett för att någon betydande sulfatering ska kunna ske. En anläggning som Lillesjö kommer med andra ord aldrig att uppleva förhållanden som är gynnsamma för sulfatering av alkalimetaller. Dessutom sker variationerna i S/Cl-kvoten alltför snabbt för att någon justering av ångproduktionen skulle vara realistisk. För att kunna häja ångdata i en anläggning som Lillesjö är det därför extra viktigt att man har en direkt mätning av förekomst av alkali i rökgaserna.

Termodynamisk modellering - Effekten av att införa en återupphettningscykel

En eller flera återupphettningscykler används ofta i kraftverk med höga ångdata. Detta är dock ovanligt i avfalls- eller biobränsleeldade kraftvärmeverk, där fokus vanligtvis ligger på värmeproduktion. Begränsningarna i ångdata på grund av HTC-relaterade problem för dessa bränslen leder till relativt låg elektrisk verkningsgrad. Resultaten i detta arbete visar dock att en återupphettningscykel kan öka elverkningsgraden utan att ångtemperaturen behöver höjas. En modifierad modell baserad på referensmodellen skapades, där den enda förändringen var införandet av en återupphettningscykel enligt Figur 3b. Temperaturen på ångan som går in i den nya högtrycksturbinen hölls vid 400 °C för att undvika ökad risk för HTC. Trycket höjdes däremot till 200 bar. Ångan expanderades i högtrycksturbinen så att inloppsångan till den andra turbinen, efter återupphettningscykel, hade en temperatur och ett tryck på 400 °C respektive 40 bar. På detta sätt förblir konfigurationen av lågtrycksturbinen och dess kondensorer identisk med referensmodellen.

Införandet av återupphettningscykeln ökade elverkningsgraden från 20,5 % i referensmodellen till 26,8 %, medan den totala anläggningsverkningsgraden förblev 107 %. Det bör noteras att modellen konfigurerades så att värmeproduktionen hölls konstant i båda modellerna. Detta innebär att den ökade elproduktionen gjorde att den totala ångproduktionen och bränsleförbrukningen ökade något för att kompensera för det extra energiuttaget ur cykeln. Det nödvändiga pumparbetet ökade naturligtvis också på grund av det högre panninloppstrycket. Dessa förändringar är inkluderade i verkningsgradsberäkningarna. Att höja trycket och införa en återupphettningscykel (reheat) gör anläggningskonfigurationen mer komplex och sannolikt också dyrare att bygga. Med ett ökande behov av elektricitet och eventuellt högre elpriser kan det dock vara ett ekonomiskt fördelaktigt koncept även för avfalls- och biobränsleldade kraftvärmeverk — särskilt om man vill utnyttja förnybara resurser så effektivt som möjligt.

Det bör också påpekas att denna modelleringsstudie baserades på referensanläggningen Lillesjöverket. Det skulle sannolikt vara möjligt att öka elverkningsgraden ytterligare om begränsningarna från den befintliga anläggningen inte behövde beaktas. Varken sådan modellering eller ekonomiska bedömningar ingår dock i omfattningen av denna studie.

Slutlig SID-konfiguration och motivering

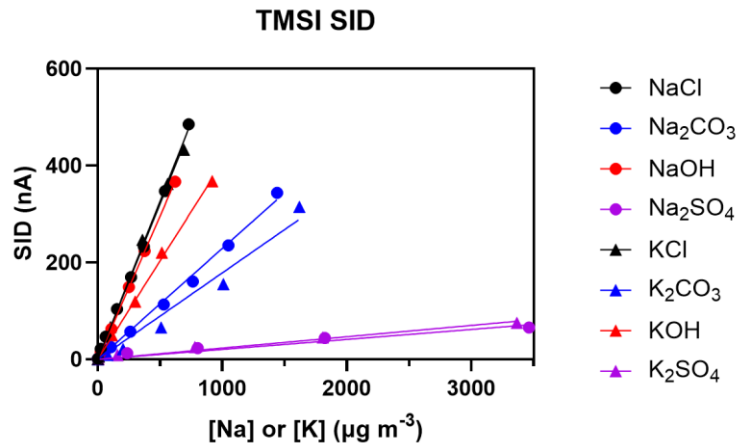
En central del av den praktiska SID-utveckling som genomförts i projektet sammanfattas i detta avsnitt. Vi har även utfört omfattande mätningar och samarbetat nära med Umeå universitet, vilket nyligen resulterat i gemensamma publikationer, se avsnitt referenser.

Baserat på jämförande tester har vi valt följande konfiguration: SID placerad horisontellt, dead-leg-insats installerad, axiellt orienterat filament samt en kollektorplatta (14×56 mm) placerad 3 mm från filamentet. Filamentet förspänns till +300 V relativt den jordade kollektorplattan och höljet, och dess temperatur styrs enligt emissivitetsskalibreringen i avsnitt 3.1. Denna konfiguration valdes utifrån följande:

- **Flödesfältsstabilitet och filamentorientering:** CFD-simuleringarna i avsnitt 3.2 visar att den horisontella orienteringen ger upphov till en stabil *ceiling jet* med endast svag återströmning; dead-leg-insatsen eliminerar sidofickans recirkulation, vilket ger stabila plåtår och korta återhämtningsfaser i pulstesterna som presenteras i avsnitt 3.3. Med ett axiellt filament blir den heta vakströmmen kompakt och linjerad med huvudflödet i den horisontella konfigurationen, vilket ger hög alkaliöverföring (Figur 8a) jämfört med tvärställd filamentplacering (Figur 8b), utan de stora, oscillerande plymceller som observeras i stående nedåtriktat flöde.
- **Val av kollektor:** En jordad platta ger hög elektrostatisk uppsamling ($\approx 76\%$ enligt partialkapacitansmodellen och Figur 9), en bred insamlingskärna som utjämnar cirkumferentiell skevhet i jonbildningen, låg brusnivå och korta signal-svansar.

Denna konfiguration användes vidare för en slutlig multisaltskalibrering. SID-responserna kalibrerades genom att tillföra en kontrollerad mängd torkade aerosolsaltpartiklar till SID och en scanning mobility particle sizer (SMPS) parallellt. SMPS mäter aerosolens partikelantal och storleksfördelning inom storleksintervallet 16–770 nm med 60 sekunders intervall. Under antagandet att partiklarna är sfäriska och med en användardefinierad densitet beräknade SMPS aerosolens masskoncentration, som därefter omvandlades till alkalimasskoncentration (K eller Na) genom stökiometri för varje försök. SID-strömmen registrerades samtidigt, där ett kort baslinjesegment före varje puls användes för att bestämma bakgrunds-nivån, vilken subtraherades innan anpassningen utfördes. SID kalibrerades med KCl, NaCl, KOH, NaOH, K₂CO₃, Na₂CO₃, K₂SO₄ och Na₂SO₄ i

koncentrationer mellan 0 och $3500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (baserat på K- och Na-innehåll). Resultaten presenteras i Figur 6 och ekvationerna (1)–(4).



Figur 6. SID-ström som funktion av alkalimasskoncentration för åtta salter (KCl, NaCl, KOH, NaOH, K_2CO_3 , Na_2CO_3 , K_2SO_4 och Na_2SO_4). Punkterna visar SID-strömmens platåvärden (bakgrundssubtraherade) mot den stökiometriskt beräknade K- eller Na-masskoncentrationen från SMPS-mätningarna. Linjerna är linjära anpassningar med 95 % konfidensintervall.

$$\text{NaCl, KCl} \quad [Na] = \frac{SID(nA)}{0.6531}, [K] = \frac{SID(nA)}{0.6425} \quad (1)$$

$$\text{NaOH, KOH} \quad [Na] = \frac{SID(nA)}{0.5913}, [K] = \frac{SID(nA)}{0.4064} \quad (2)$$

$$\text{Na}_2\text{CO}_3, \text{K}_2\text{CO}_3 \quad [Na] = \frac{SID(nA)}{0.2290}, [K] = \frac{SID(nA)}{0.1786} \quad (3)$$

$$\text{Na}_2\text{SO}_4, \text{K}_2\text{SO}_4 \quad [Na] = \frac{SID(nA)}{0.0206}, [K] = \frac{SID(nA)}{0.0234} \quad (4)$$

Kalibreringen visar en tydlig anjonstyrd ordning i känslighet: $\text{Cl} \gtrsim \text{OH} > \text{CO}_3 \gg \text{SO}_4$. Denna ordning stämmer överens med observationer från avdunstning av alkalipartiklar, där Cl^- - och OH^- -salter förångas vid lägre temperaturer (snabb avdunstning över ca 500°C), medan CO_3^{2-} - och SO_4^{2-} -salter kräver betydligt högre sönderdelningstemperaturer (runt 700 respektive 900°C) vid fasta driftförhållanden [14]. En högre frisättningshastighet nära filamentet ger ett större flöde av neutrala alkalier och därmed en brantare SID-lutning.

För en given anjon uppvisar Na-salter ofta lutningar som är jämförbara med eller något högre än motsvarande K-salter (t.ex. $\text{NaOH} > \text{KOH}$ och $\text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{K}_2\text{CO}_3$). Vid första anblick kan detta verka kontraintuitivt med tanke på kaliums lägre joniseringsenergi och Saha–Langmuir-förväntningen att K borde joniseras lättare på het platina. Vid den filamenttemperatur som används här är dock Pt-ytan täckt av alkali, vilket kraftigt reducerar den effektiva arbetspotentialen. Därmed är sannolikheten för ytjonisering redan hög för både Na och K, och återstående skillnader i joniseringsbenägenhet är små. Lutningarna speglar därför främst frisättningskemin snarare än den inneboende joniseringsförmågan.

Vi tolkar därför känsligheten i varje kalibreringskurva som produkten av (i) neutral frisättning till filamentet (flyktighet/sönderdelning i det heta gränsskiktet), och (ii) nära enhets sannolikhet för ytjonisering, med elektrostatisk uppsamling bestämd av geometri och spänning.

Slutsatser

I detta projekt har vi studerat potentialen att öka verkningsgraden i samband med förbränning av biomassa i rosteldade kraftvärmeanläggningar. Specifikt har vi studerat förekomst av alkali, samt balans mellan svavel och klor vid förbränning av olika bränslemixar i en svensk medelstor kraftvärmeanläggning. Vi har jämfört metoder för att mäta total alkalihalt och kalium i gasfas, samt utvecklat en ny metod för att tidsupplöst kunna mäta en komplex sammansättning av olika alkalialter i form av aerosoler med en metod som vi kallar SID/TMSI. Metoden bygger på principen om ytjonisering vid kontrollerad temperatur.

Potentialen för förbättrad elverkningsgrad i biomassaeldad kraftvärme har kvantifierats med hjälp av termodynamiska beräkningar där vi nyttjat processdata från samma industriella anläggning som vi gjort våra experiment. Sammantaget visar vår analys på stor potential i att höja elverkningsgrad i den studerade avfallspannan. I ett beräkningsexempel ökar nuvarande elverkningsgrad på från 20,5 % i till 26,8 %. Vårt utvecklade mätsystem för detektion av alkali har visat på god precision och repeterbarhet. Instrumentet ger tillgång till tidsupplöst alkalihalt, samt specierad alkalisammansättning i både partikel och gasfas vilket gör mätsystemet unikt. Systemet ger tillgång till data som skapar en säkerhetsmarginal att höja ångdata i kraftvärmeverk som använder bränslen med betydande alkaliinnehåll.

Publikationslista

Pappret beskriver termodynamisk modellering och alternativa utformningar av studerad kraftvärmeanläggning.

A study of possible improvements for power generation in waste fired combined heat and power plants. Thomas Allgurén, Klas Andersson. Presented at the 29th International Conference Impact of Fuel Quality on Power Production and the Environment, September, 2024.

Detta papper beskriver jämförelse mellan utvecklat mätsystem för alkalimätning med så kallad PF-TDLAS teknik; jämförelsen görs med mätning av KCl och KOH vilka är de två ända alkali-komponenter som kan mätas av ett annat system.

Synergistic Alkali Diagnostics: PF-TDLAS and Surface Ionization Detection in a High-Temperature Reactor

Viktor Andersson, Emil Thorin, Thomas Allgurén, Florian M. Schmidt, Klas Andersson. Accepted for publication in Proceedings of the combustion institute. Combustion symposium to take place in July, 2026.

Detta paper behandlar labbskaleförsök med alkalimätning. I försöken används en specialutformad fluidbäddreaktor med särskilt utvalda material för att minimera alkaliförluster.

Alkali Uptake, Release, and Speciation in Fluidized Beds Using Oxygen Carriers

Viktor Andersson, Jan B. C. Pettersson, Thomas Allgurén, Pavleta Knutsson, Klas Andersson. *Energy & Fuels*, Vol. 39 Nummer/häfte 6 s. 3280-3294

Detta paper behandlar labbskaleförsök med tillämpning av alkalimätning. Arbetet bygger på samarbete med två externa forskargrupper där fokus i stället är på framställning av aktivt kol, dvs ett praktiskt exempel på hur man kan använda vår utvecklade mätteknik.

Tailoring highly surface and microporous activated carbons (ACs) from biomass via KOH, K₂C₂O₄ and KOH/K₂C₂O₄ activation for efficient CO₂ capture and CO₂/N₂ selectivity: characterization, experimental and molecular simulation insights.

Bartosz Dziejarski, Jarosław Serafin , Diego Felipe Hernández-Barreto, Elena Naumovska, Joanna SreńscekNazzal , Nikom Klomkliang, Eric Tam, Renata Krzyżyńska, Klas Andersson , Pavleta Knutsson. *Chemical Engineering Journal*. Volume 524, 15 November 2025.

Denna exjobbssrapport beskriver termodynamiska beräkningar och sammanställning av process och experimentell data från studerad kraftvärmeanläggning.

A study of electrical efficiency improvements in Waste CHP plants. Max T Molander. Master's thesis in Sustainable Energy Systems, Department of Space, Earth and Environment, Chalmers University of Technology, 2023.