

Förstudie – Sänkt bäddtemperatur i FB- pannor för avfallsförbränning

Fredrik Niklasson

Förstudie - Sänkt bäddtemperatur i FB-pannor för avfallsförbränning

Pre-study – Reduced temperature of the bed in fluidized bed boilers burning waste

Fredrik Niklasson

Projektnummer WR-13

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

Förord

Föreliggande rapport visar resultat från förbränningsförsök vid Ryaverket i Borås. Dessa experiment hade inte varit möjliga utan insatser från ett stort antal personer. Projektledaren riktar ett stort tack till driftpersonalen från Dalkia, där Anders Gunnarsson varit kontaktperson och särskilt Kristian Ehn som ställt upp och styrt pannorna med säker hand. Ett varmt tack även till andra i projektgruppen för givande diskussioner och stöd:

Julia Fredäng, Dalkia
Anders Johnsson, Borås Energi och Miljö AB
Rickard Axelsson, Metso Power AB
Marianne Gyllenhammar, Stena Metall AB

Sammanfattning

Avfallsförbränning har globalt sett två syften; kvittblivning av avfall samt energiåtervinning (främst el och värme). Vid avfallsförbränning begränsas ångtemperaturen i överhettarna av korrosionsangrepp som ökar kraftigt med materialtemperaturen. Angreppen orsakas av relativt höga halter av alkalimetaller och klor i bränslet som vid förbränning hamnar i rökgas och flygaska.

I förlängningen syftar detta projekt till att utvärdera om sänkt bäddtemperatur i FB-pannor för avfallsförbränning ger lägre halter av alkaliklorider i konvektionsstråket. Om så är fallet, skulle en sådan drift kunna ge ett ökat elutbyte genom höjd överhettartemperatur, minskat behov av sotblåsning och eventuellt ökad livslängd för överhettarna vid oförändrad ångtemperatur. Resultat är av intresse för anläggningsägare som kan förbättra driften i befintliga anläggningar genom att justera driftpunkten. Dessutom kan resultaten användas av panntillverkare för att modifiera designen av nya anläggningar.

Delmålet för föreliggande förstudie var att fastställa vid hur låg bäddtemperatur de aktuella avfallspannorna i Borås kan köras med bibehållen stabil drift och med tillräcklig förbränningstemperatur för att uppfylla givna direktiv för avfallsförbränning. Resultaten från förstudien ska ligga till grund för planeringen av en eventuell fortsättning av projektet.

Grunden för projektet utgörs av praktiska försök. Under förstudien utfördes inga andra mätningar än de som normalt loggas i driftsystemet förutom att prover av bäddmaterial och aska tagits vid olika drifttillstånd för analys.

Försöken visade att det i den befintliga anläggningen går att kvota om luft och rökgasflöden så att bäddtemperaturen sänks från ca 870°C till runt 700°C vid full last och normal bränslemix, samtidigt som kravet på 850°C/2 sekunder kunde upprätthållas. När bränslet tidvis är något torrt blir bäddtemperaturen lite över 700°C, medan den kan sjunka under 650°C när bränslefukten ökar inom normala variationer.

Med bibehållen O₂-halt ut från pannan vid normal respektive omkvotad inställning var emissionerna av CO densamma, medan NO_x ökade med topptemperaturen som ökade med uppskattningsvis 40°C vid maxlast.

Påverkan på bäddkemin samt eventuell ackumulering av oförbränt i bädd orsakat av att syrehalten i bädden sänkts vid omkvotning, har inte utretts p.g.a. den korta driftperioden.

Kemisk analys av siktad bäddsand ut från pannan visade att kloridhalten ökat mer än 4 gånger när pannan körts med sänkt bäddtemperatur i 30 timmar. Detta indikerar att den kemiska balansen i bädden påverkats betydligt av temperatursänkningen. För att bestämma vad det får för konsekvenser behövs ytterligare försök med utförligare mätningar.

För alkalihalterna iaktogs däremot inga mätbara förändringar.

Nyckelord: Avfallsförbränning, Fluidiserad bädd, Bäddtemperatur

Summary

Waste incineration generally serves two purposes; 1) dispose of waste and 2) generation of heat and power. In the process of power production from waste fuels, the steam temperatures in super heaters are generally limited by the severe fouling and corrosion that occurs at elevated material temperatures, caused by high concentrations of alkali metals and chloride in the flue gas and fly ash.

The overall aim of a continuation of present project is to determine if a reduced temperature of the bed zone in a fluidized bed waste incinerator reduces the amount of alkali chlorides in the flue gas. If so, a reduced bed temperature might enable increased steam temperature in super heaters, or, at unchanged steam temperature, improve the lifespan of the super heaters. The results from the project are of interest for plant owners wishing to improve performance of existing plants. The results may also be used to modify the design of future plants by boiler manufacturers.

The aim of present pre-study was to determine how far the bed temperature can be reduced in a waste fired fluidized bed boiler in Borås while maintaining a stable operation with sufficient combustion temperature in the freeboard to fulfil the directives of waste incineration. A continuation of the project will be based on the results from present study.

The work is based on experiments at the test boiler. During the present study, no other measurements were performed apart from some sampling of bed material and ashes at different modes of operation.

The experiments show that it is possible to alter the air and recycled flue gas in such a manner that the bed temperature is reduced from about 870°C to 700°C at 100% load and normal fuel mixture, while fulfilling the directive of 850°C at 2 seconds. Within normal variations of the fuel properties, however, the bed temperature increases to somewhat above 700°C if the fuel turns dry, while it falls below 650°C when the fuel turns wet.

With constant O₂ concentration in the flue gas, the emissions of CO were unaffected by changed ratios of air and recycled flue gas to reduce the bed temperature. However, the emissions of NO_x tended to increase due to raised temperatures of about 40°C at the top of the furnace at maximum load.

When increasing the amount of recycled flue gas to the bed, the concentration of oxygen is reduced and its implications upon the chemistry in the bed and possible accumulation of unburned fuel have not been investigated due to the short experimental period.

Chemical analysis of sand from the bed showed that the concentration of chlorides in the sand increased more than 4 times after 30 hours of operation at reduced bed temperatures. This finding indicates that the chemical balance in the bed is significantly altered when the temperature is reduced. To determine the consequences for the operation of the boiler, further experiments and measurements that are more extensive are necessary. No measurable changes of alkali contents in the sand were observed.

Key words: Waste incineration, Fluidized bed, FB, Bed temperature

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	9
1.1	PROBLEMDISKUSSION	9
1.2	PROBLEMFÖRMULERING OCH MÅL	9
1.3	AVGRÄNSNINGAR	9
2	BAKGRUND	10
3	MATERIAL OCH METODER	12
3.1	FÖRSÖKSPANNA	12
3.2	FÖRSÖKSUPPLÄGG	14
4	BÄDDTEMPERATUR	16
4.1	METODER FÖR ATT STYRA BÄDDTEMPERATUREN	19
5	RESULTATREDOVISNING	21
5.1	FÖRSÖKSSCHEMA	21
5.2	RESULTAT FRÅN OLIKA METODER ATT SÄNKA BÄDDTEMPERATUREN	22
5.3	EMISSIONER	27
5.4	SAND- OCH ASKPROVER	28
6	RESULTATANALYS	33
7	SLUTSATSER	34
8	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	35
9	LITTERATURREFERENSER	36

1 Inledning

1.1 Problemdiskussion

Att förbränna avfall är betydligt mer krävande än att elda andra mer konventionella bränslen eftersom avfallet oftast är en blandning av många olika material med varierande egenskaper. Avfallsförbränning ställer generellt stora krav på förbehandling, utformning av förbränningsanläggning samt rökgasrening. Ett uppmärksammat problem är korrosion och påslag på överhettartuber vilket begränsar pannans ångdata samt ger en betydande underhållskostnad om tubpaketen har en kort livslängd i den svåra miljön.

1.2 Problemformulering och mål

Detta projekt syftar till att utvärdera om en sänkt bäddtemperatur i avfallsförbränningspannor ger driftsfördelar såsom minskade emissioner och påslag av alkaliklorider på värmeöverförande ytor i konvektionsstråket. Om så är fallet, skulle en sådan driftförändring ge ett ökat elutbyte genom höjd överhettartemperatur, alternativt öka överhettarnas livslängd vid oförändrad ångtemperatur. Utvärderingen baseras på praktiska försök vid två 20 MW_t bubblande fluidiserade bäddpannor för avfallsförbränning i Borås.

Resultat från experimenten är intressanta för anläggningsägare som kan förbättra driften i befintliga anläggningar genom att justera driftpunkten. Dessutom kan resultaten användas av panntillverkare för att modifiera designen av nya anläggningar.

1.3 Avgränsningar

Föreliggande arbete avser en första etapp där det provas hur långt det går att sänka bäddtemperaturen i de aktuella pannorna, vid normal last, utan att tumma på avfallsdirektivet att förbränning ska ske vid minst 850°C under minst två sekunder. Möjligheten till stabil drift vid avsevärt reducerad bäddtemperatur är en förutsättning för att kunna fortsätta projektet som planerat med utförliga mätningar av bland annat beläggingsbildning. Om denna första etapp ger ett positivt resultat kommer det att ansökas medel för en fortsättning av projektet.

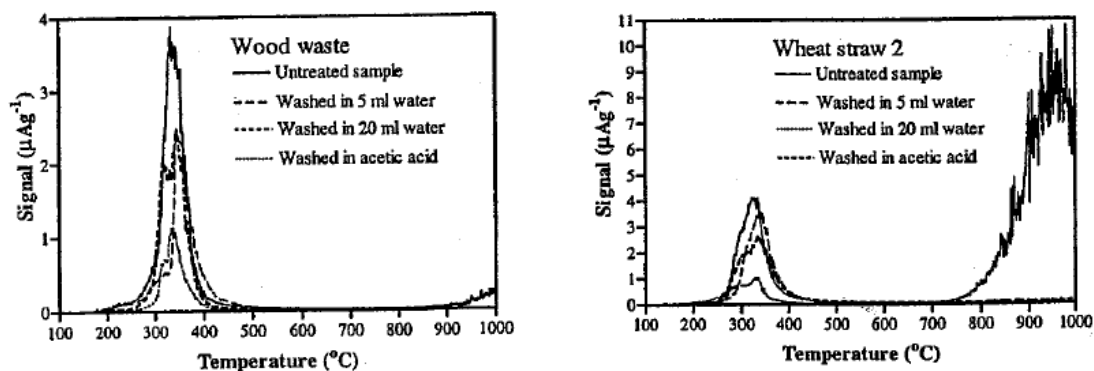
Utvärderingen bygger på direkt mätbara parametrar, även om avfallsbränslets heterogena karaktär (dvs egenskaper som varierar) delvis begränsar resultatens noggrannhet. Å andra sidan ger försök i en fullskalanläggning direkt applicerbara resultat, till skillnad mot noggrant kontrollerade experiment i laboratorieskala.

2 Bakgrund

Avfallsförbränning har globalt sett två syften; kvittblivning av avfall samt energiåtervinning (främst el och värme). Vid avfallsförbränning begränsas ångtemperaturen i överhettarna av relativt höga halter av alkalimetaller, bly, zink och klor i flygaskan som ger kraftiga korrosionsangrepp vid höga materialtemperaturer, oftast främst på överhettarna. Vanligtvis ökar beläggningstillväxt och korrosionsangrepp med överhettartemperaturen. Temperaturen på den överhettade ångan begränsar pannans maximala elutbyte. Därför är en ökad ångtemperatur önskvärd, i synnerhet för avfallsförbränningsanläggningar i regioner där fjärrvärmesystem saknas.

Detta projekt syftar till att utvärdera om sänkt bäddtemperatur i FB-pannor för avfallsförbränning ger lägre halter av alkaliklorider i konvektionsstråket. Om så är fallet, skulle en sådan drift kunna ge ett ökat elutbyte genom höjd överhettartemperatur, minskat behov av sotblåsning och eventuellt ökad livslängd för överhettarna vid oförändrad ångtemperatur.

Vid avfallsförbränning av rent hushållsavfall används ofta en bäddtemperatur runt 800-850°C, men i avfallspannorna i Borås som eldas med 70 % industriavfall och 30 % hushållsavfall är temperaturen ofta ca 870°C på grund av relativt stor andel industriavfall i bränslet. Dessa temperaturer kan jämföras med kokpunkterna för kalium och natrium, vilka är 774°C respektive 883°C. I bränslet återfinns alkalimetallerna dock oftast inte i ren metallisk form, och vid vilka temperaturer alkalimetaller avgår varierar mellan olika bränslen. En del alkalimetaller är organiskt bundna och avgår med de flyktiga beståndsdelarna vid temperaturer mellan 300 och 400°C, se exemplen i Figur 1. Ytterligare alkalimetaller finns bundna i askan och avgår vid högre temperaturer (600-1000°C) [1].



Figur 1. Temperaturberoende avgång av alkali vid pyrolys av träbränsle (vänster) och vetehalm (höger), från ref. [1].

Figure 1. Temperature dependent release of alkali compounds during pyrolysis of wood (left) and wheat straw (right), from ref. [1].

Förhållandet mellan mängderna av alkalimetallernas bindningsformer är bränsleberoende; till exempel är alkalimetaller till största delen organiskt bundna i trä, medan det är avsevärt mycket mer alkalimetaller bundna i askan i halm. Hur fördelningen är i ett blandat avfallsbränsle är osäkert. Efter avgången från bränslet kan alkalimetallerna påverkas av

sekundära reaktioner i bädden, där de flesta processer är temperaturberoende. På grund av systemets komplexitet, med många ingående kemiska element och faser som påverkas av både homogena och heterogena reaktioner är det svårt att teoretiskt förutsäga hur stor påverkan en sänkt bäddtemperatur får på alkalikoncentrationen i rökgasen. Därför är föreliggande projekt baserat på praktiska försök i full skala.

Förutsatt att sänkt bäddtemperatur minskar mängden alkalimetaller som följer med rökgasen så ökar alkalikoncentrationen i bottenbädden, vilket möjligtvis skulle kunna ge problem med agglomerationer och sintringar. Å andra sidan motverkas detta av att bäddens sintringstendens generellt minskar med sänkt temperatur.

Det finns redan några pannleverantörer som designar sina FB-pannor för en sänkt bäddtemperatur, till exempel Lentjes avfallspanna Rowitec (ca 650°C) och Austrian Energy and Environments EcoFluid panna (630-830°C). (Lentje köptes upp av AE&E i december 2007.) Dessa låga bäddtemperaturer motiveras med att man vill undvika att smälta aluminiumfraktioner (Rowitec) och minska risken för bäddagglomeration (EcoFluid).

Det saknas tillgängliga arbeten där effekterna av sänkt bäddtemperatur studeras. Om en sänkt bäddtemperatur ger mindre överhettarkorrosion och minskade emissioner (av exempelvis NO_x) vore intressant att veta för anläggningsägare, både inför upprustning av befintliga FB-pannor och vid inhandling av nya. Slutsatser från projektet är också av intresse för panntillverkare vid design av framtida anläggningar.

3 Material och metoder

Grunden för projektet utgörs av praktiska försök vid avfallspannorna i Borås. Avfallspannorna är designade för bäddtemperaturer runt 850°C och det finns en viss osäkerhet hur långt det är möjligt att sänka bäddtemperaturen utan att påverka bäddutbränningen och emissionerna. De metoder som primärt kan användas för att sänka bäddtemperaturen är:

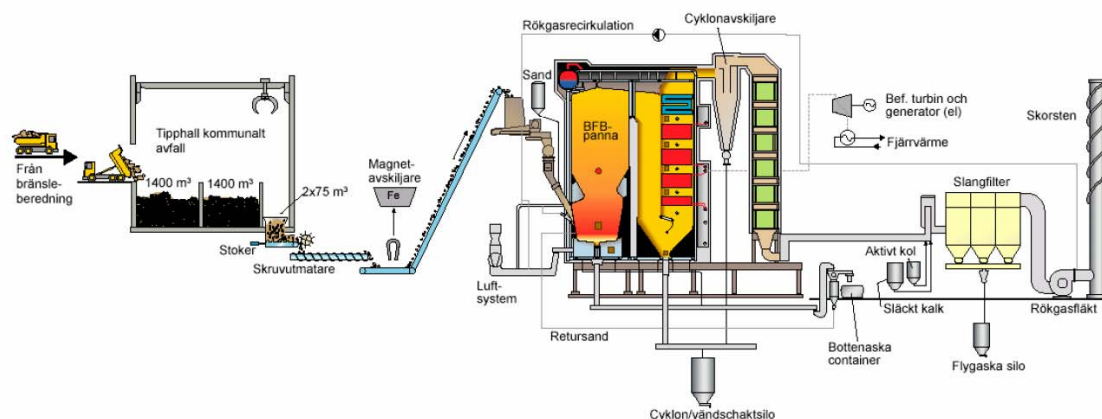
- minska luftförvärmning av primärluft
- öka rökgasåterföring(rgå) till bädden eller omkvotning av rgå och primärluft
- öka uttag av bottenaska (och retursand)

Om dessa metoder inte förmår sänka bäddtemperaturen tillräckligt kan den sänkas ytterligare genom vattenbegjutning av bränslet innan det förbränns. En annan möjlighet att sänka bäddtemperaturen vore att samelda slam med hög fukthalt. Sameldning försvårar dock utvärderingen eftersom både bäddtemperatur och bränslets kemiska sammansättning påverkas samtidigt. Sameldning med rötslam har därför inte använts vid dessa försök, men metoden har visat positiv effekt vad gäller agglomereringsrisk, alkalikloridhalt i rökgas, beläggningar och korrosion även utan att sänka bäddtemperaturen [2].

Under föreliggande arbete ändras driftparametrar under det att panndriften studeras. Försöken syftar till att klargöra hur långt bäddtemperaturen praktiskt kan sänkas med bibehållen stabil drift och uppfyllelse av avfallsdirektivet på minst 850°C i två sekunder. Under försöken utförs inga andra mätningar än de som normalt loggas i driftsystemet förutom att några askprover (botten- och flygaska) från olika drifttillstånd analyseras.

3.1 Försökspanna

På Ryaverket i Borås finns två avfallseldade ”bubblande” fluidiserade bäddpannor på vardera ca 20 MW_t med ångdata 50 bar och 405°C, se Figur 2. Pannorna levererades av Metso Power AB och togs i drift 2005.

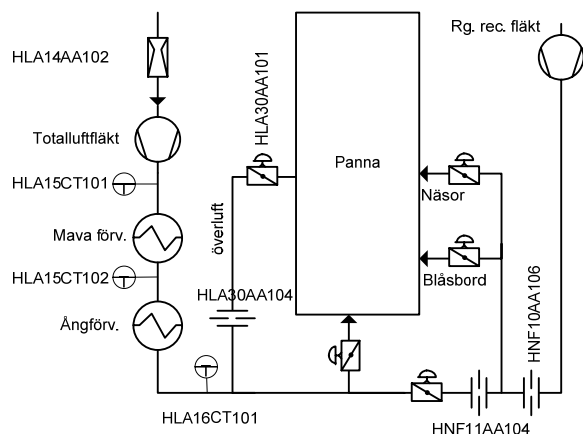


Figur 2. Schematisk bild över en av de två 20 MW_t avfallsförbränningspannorna.

Figure 2. Sketch of one of two 20 MW_{th} waste incinerators used for the experiments.

Bränslet som eldas är vanligtvis en blandning av 70 % verksamhetsavfall och 30 % hushållsavfall. Bränslet bereds på Sobacken utanför staden och transporteras med lastbilar till en tippvall vid Ryaverket. Komposterbart material har sorterats ut från hushållsavfallet vilket gör bränslet aningen torrare (med högre värmevärde) än från en motsvarande anläggning i en kommun där sådan utsortering inte sker. Från tippvallen förs bränslet till två matarfickor med hjälp av en stor gripklo. Bränslet transporteras från matarfickornas botten med skruvar och band (via en magnetavskiljare) in till bränsledoserare i pannhuset. Där doseras bränslet in till pannorna med Metso's så kallade Feeding Master som är en volymdoserutrustning med bl.a. avrivarvals för att åstadkomma ett jämnt bränsleflöde. Bränslet faller ned i eldstaden via en cellmatare som ska förhindra bakåtbrand. Varje panna har en bränsleinmatning. Vid inloppet till pannan är bränslestupet försett med ett "blåsbord" som sprider ut bränslet över bädden. Eftersom det är ett heterogent bränsle som kräver ansenlig hantering inträffar ibland störningar i bränsletillförseln. För att upprätthålla produktionen (och avfallsdirektivets krav $850^{\circ}\text{C}/2\text{ s}$) även under sådana störningar är pannorna försedda med varsin oljeeldad stödbrännare på 12 MW. I luftlådan finns även uppstartsbrännare på 6 MW.

Förbränningsluften som tas från tippvallen (och eventuellt från pannhuset) transporteras via en totalluftfläkt genom två luftförvärmare innan flödet delas upp mellan primärluft och överluft, där det senare flödet fördelas mellan sekundär-, tertiär- och tvärluft. En förenklad schematisk skiss av gasflödena in till pannan ges i Figur 3 som ett komplement till Figur 2. Normalt hålls primärluftflödet tillräckligt högt för att säkerställa att ett minsta fluidiseringsflöde upprätthålls även om ingen rökgasåterföring tillförs eldstaden via botten. Primärluften går via en luftlåda under eldstaden in i eldstaden genom ett stort antal dysor i pannbotten. För att förbättra utmatningen av större obrännbara partiklar transporteras denna aska via riktade dysor mot ett askutmatningsschakt vid mitten av pannbotten. Med syftet att ytterligare underlätta transporten av grövre askpartiklar sluttar eldstadens botten svagt mot utmatningsschaktet. Vid bäddtemperaturer över 870°C börjar temperaturen regleras med hjälp av rökgasåterföring som blandas in med primärluften under dysbotten.



Figur 3. Förenklad schematisk skiss över luft och gasflöden in till pannan.

Figure 3. Simplified sketch of air and gas flows into the boiler.

Över bädden finns en förträngning av eldstadens främre och bakre väggar (s.k. näsor) ifrån vilka sekundär och tertiärluft tillförs. Ovanför dessa tillförs även tvärluft från pannans sidoväggar. Ammoniak sprutas in i eldstadens övre del för att minska emissionerna av NO_x. Här är rökgastemperaturen typiskt mellan 900 och 1000°C.

Rökgasen går ut från eldstadens övre del genom en öppning i bakväggen och vänder ned igenom ett tomdrag innan flödet vänder uppåt genom ett bakre drag där sekundär- och primäröverhettare är placerade, följt av en kokyta. Rökgasen har en temperatur av ca: 350°C när den passerar cyklonen uppströms de sex tubpaketen i ekonomisern där gasen kyls ned emot 150°C. Slutligen följer ett system för rökgasrening innan gasen går ut genom skorsten via rökgasfläkten.

En del av rökgasen återförs och fördelas till eldstaden via en separat rökgasåterföringsfläkt med tillhörande spjäll. Rökgasåterföringen till bädden går in till luftlådan under eldstaden och reglerar bäddtemperaturen. Rökgas tillförs även vid näsorna för att blanda om gaserna och hålla nere förbränningstemperaturen i zonen.

Grova askpartiklar och annat obrännbart material matas ut tillsammans med bäddmaterial via ett vertikalt vattenkyld utlopp centralt beläget i eldstadens botten. Materialet transportera därifrån med en vattenkyld skruv till en trumsikt där grovt material avskiljs. Det grova materialet lämnar anläggningen som bottenaska medan det fina materialet transporteras till en behållare för retursand, gemensam för bägge pannorna, varifrån materialet återförs till pannorna. Ny sand tillförs dessutom regelbundet från en gemensam sandsilo för att upprätthålla bäddhöjden och omsätta bäddmaterialet. Askan från vändschaktet (under tomschaktet) blandas med aska från cyclonavskiljaren och transporteras till en lagringssilo i väntan på deponi.

Matarvattnet trycksätts mot ångpannan med matarvattenpumpar. Matarvattnet kyls från ungefär 130°C till ca 120°C i luftförvärmaren uppströms ekonomisern.

Vatten leds från ångdomens botten ned genom falltuber till fördelningsrör i pannans botten. Från de nedre fördelningsrören går vattnet upp genom väggtuberna där vattnet successivt förångas. Den densitetsskillnad som uppkommer driver vattnet mot de övre samlingslådorna där ånga separeras från vätska innan de återförs till domen på olika nivåer. Den producerade ångan lämnar pannan via primär- och sekundäröverhettare placerade i bakre rökgasdraget. Insprutning av matarvatten mellan överhettarna sker för att hålla konstant utgående ångtemperatur.

3.2 Försöksupplägg

En kort sammanfattning över försöksplaneringen ges nedan. Avfallsförbränningsanläggningen består av två likadana FB pannor benämnda PVA1 och PVA2. Försöken med sänkt bäddtemperatur körs endast i PVA1. Askprover tas även från PVA2 som jämförelse.

Försöksvecka 1 (4 dagar)

Dag 1. Startar med normaldrift, varvid askprover tas. Sedan stängs luftförvärmningen av (som kyler matarvattnet).

Dag 2-4. Ökar flödet av bottenaska/retursand så långt som möjligt. Askprover tas efter minst ett dygns drift med ökad bäddåterföring.

Försöksvecka 2 (5 dagar)

Försöker först och främst kvota om luft/rökgas mellan botten och överluft för att bibehålla fluidiseringen. Man kommer därigenom att gå från över- till ett mer understökiometrisk förhållande i bottenzonen. Något ökad cirkulation av bäddmaterial, via mekanisk sikt, används under omkvotningsförsöken för att minska risken för bäddsintringar. Hur snabbt omkvotningen kan ske beror på pannans uppförande (temperaturer/emissioner) vid förändringarna.

Försöksvecka 3 (4 dagar)

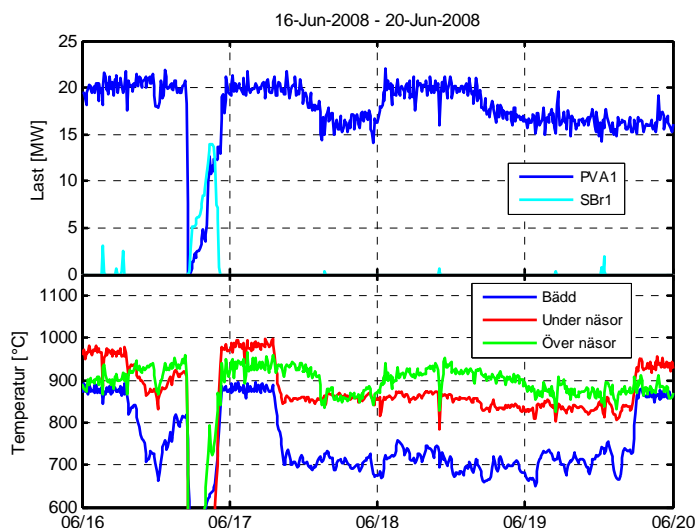
Om lämplig driftpunkt hittats under försöksvecka 2 så körs nu kontinuerligt vid denna driftpunkt, eventuellt med bortkopplad luftförvärmning. Askprover tas efter ett par dagars drift. Alternativt kan vattenbesprutning på bränslet provas denna vecka.

4 Bäddtemperatur

Temperaturen i bottenbädden bestäms i huvudsak av tre olika processer: 1) Uppvärmning av fluidiseringsgasen till bäddtemperatur (primärluft + eventuell rökgas), 2) Uppvärmning och torkning av inkommande bränsle och 3) Värme som frigörs vid förbränning av bränslet. Av dessa processer är det den sista som är svårast att beräkna eftersom en okänd andel av bränslet brinner nere i bäddzonen och en stor del av de flyktiga beståndsdelarna brinner uppe i fribordet. En del av primärluftflödet passerar också bädden utan att ha tagit del av förbränningsreaktionerna, beroende på att luft och bränsle inte blir helt jämnt fördelat över bäddens horisontella tvärsnitt. Primärluften kan också passera bädden i bubblor och genom kortvariga kanaler i bädden som uppstår just när större bubblor ”briserar”.

Bränslet matas in i eldstaden över bädden, varvid en del bränsle börjar förgasas redan innan det når bädden (t.ex. tunnare plastbitar). En del finare kokspartiklar dras med av gasflödet och lämnar bädden, vilket innebär att inte heller all koks brinner där. Det är således svårt att veta hur mycket bränsle som når bädden, och ännu svårare att uppskatta hur mycket som faktiskt brinner där.

Från bädden slungas bäddmaterial, primärluft och bränslepartiklar upp i skvalpzonen där det skapas en anseelig omblandning som kan medföra en kraftig förbränning. Förbränningstemperaturen i zonen kan delvis styras med hjälp av rökgasåterföring i nedåtriktade register. Det är oftast varmare över, än i bädden när högflyktiga bränslen eldas. Till exempel visar de uppmätta temperaturerna i Figur 4 att temperaturen i zonen ovanför bädden är ca 100 till 150°C högre än i bädden. Temperaturskillnaden leder till att värme transporteras från skvalpzonen ner till bädden med strålning samt med bäddmaterial som faller tillbaka efter att ha blivit uppkastat av briserande bubblor. Denna värmetransport är väsentlig för upprätthållandet av bäddtemperaturen men är svår att kvantifiera.



Figur 4. Exempel på driftdata från PVA1: Last (överst) och temperaturer i nedre delen av eldstaden (underst).

Figure 4. Example of operational conditions of PVA1. Top) Power, Below) Temperatures of bed (blue) and zones under (red) and over (green) inlet of secondary air.

Att i detalj modellera förbränningsförloppet i bädd och skvalpzon är mycket svårt och tidsödande, då det krävs omfattande fluiddynamisk tvåfasmodellering kompletterat med kemiska reaktionshastigheter och värmeöverföring. För att förenkla beräkningen av bäddtemperaturen införs här istället två enhetslösa parametrar:

- k_b – andel av bränslet som är tillgängligt för förbränning i bäddzonen
- k_l – andel av primärluften som är tillgängligt för förbränning

Värdet på dessa parametrar beror på en mängd driftsparametrar såsom bränsleegenskaper, fluidiseringsflöde, partikelstorlekar i bädden m.m.

Bränslemängden som är tillgänglig för förbränning i bädden kan således skrivas som $k_b B$ där B är bränsleflödet. För att fullständigt förbränna denna bränslemängd behövs luftflödet $k_b l_0 B$ där l_0 är det stökiometriska luftflödet. Den tillgängliga luften i bäddzonen är $m k_l l_0 B$ där m är luftfaktorn i bädden. Förbränningen begränsas alltså antingen av mängden luft eller mängden bränsle. Värmeutvecklingen i bäddzonen kan följaktligen skrivas som $H_{eff} B \min[k_b, m k_l]$. Detta ger en förenklad värmebalans över bäddzonen, under stationära förhållanden, som

$$\begin{aligned} & \overbrace{\min[k_b, m k_l] \cdot (H_{eff, dry} (1 - X_{moist}) - X_{moist} h_{fg})}^{\text{Heat released}} - \overbrace{q_{rem}}^{\text{Heat removed}} = \\ & = k_b \underbrace{\left[X_{moist} (h_s(T_b) - h_l(T_{Br})) + (1 - X_{moist}) c_{p,df} (T_b - T_{Br}) \right]}_{\text{Heating of fuel}} + \\ & + m \underbrace{_{prim} l_0 (1 - X_{moist}) c_{p,l} (T_b - T_{l,in})}_{\text{Heating of air}} + \underbrace{k_{rec} l_0 c_{p,rg} (T_b - T_{rg})}_{\text{Heating of recirculated gas}} \end{aligned} \quad (1)$$

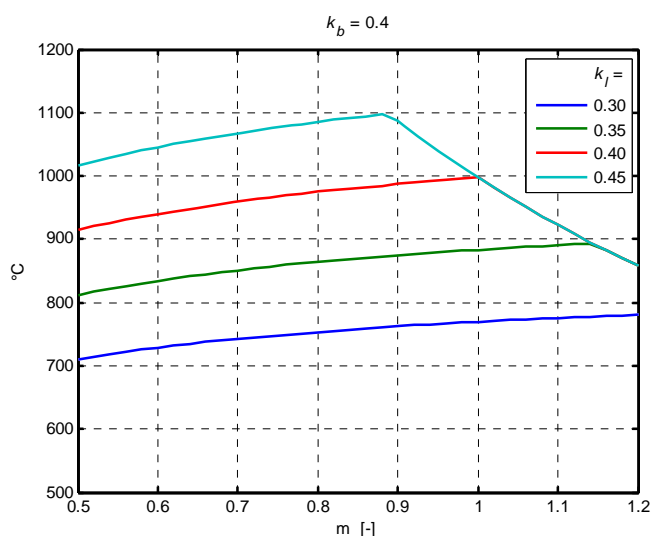
där

k_{rec}	Rökgasåterföring genom bädden (i förhållande till l_0)
$H_{eff, dry}$	Effektiva (lägre) värmevärdet för torrt bränsle
X_{moist}	Bränslets fukthalt
h_s	Entalpi för vattenånga
h_l	Entalpi för vatten (vätskefas)
$c_{p,df}$	Värmekapacitivet för torrt bränsle
$c_{p,l}$	Värmekapacitivet för luft
$c_{p,rg}$	Värmekapacitivet för rökgas
q_{rem}	Värmetransport från bädden
T_{Br}	Temperatur bränsle in
T_{fg}	Förångningstemperatur för vatten
T_b	Bäddtemperatur
$T_{l,in}$	Temperatur, primärluft in
T_{rg}	Temperatur, rökgasåterföring in

Tyvärr är värdena på de två parametrarna k_b och k_l okända. Värmeflödet mellan skvalpzon och bädden q_{rem} beror på temperaturskillnaden, men det skulle kräva mer arbete än vad som ryms inom föreliggande projekt att ta fram en fullständig modell över eldstadens nedre delar. Med antagandet om ett konstant värmeflöde från skvalpzonen till bädden och att en konstant andel av primärluften används till förbränning i bädden visar beräkningarna att

små förändringar av luftfaktorn i primärzonen kan ha måttlig påverkan på bäddtemperaturen. Dock är resultaten mycket beroende på antagna parametervärden (k_b och k_l). Exempel på resultat från den förenklade värmebalansen över bädden visas i Figur 5 där en antagen andel av bränslet förbränns i bädden ($k_b = 40\%$) och de olika linjerna är dragna för olika antagna värden för k_l (andelen primärluft som deltar vid förbränningen i bädden). Figuren visar att bäddtemperaturen först stiger svagt med ökande luftfaktor tills allt bränsle i bädden brinner där. Ytterligare ökning av luftflödet medför sjunkande bäddtemperatur eftersom det ökade luftflödet inte längre ger någon ökad förbränning men ändå värms upp till bäddtemperaturen. Vid beräkningen till Figur 5 antogs ingen rökgasåterföring och ett konstant värmefflöde från skvalpzonen till bädd vilket också påverkar lutning och nivåer på beräknade temperaturer. Även om alla antaganden ger en stor osäkerhet i modellresultaten så visar beräkningarna att en måttligt minskad mängd primärluft inte radikalt sänker bäddtemperaturen om motsvarande luftmängd adderas som sekundärluft. Vid kraftig sänkning av primärluftflödet måste rökgas tillsättas för att upprätthålla fluidiseringen och då sänks givetvis bäddtemperaturen.

Vid försökspannorna upprätthålls ett fastställt fluidiseringsflöde av styrsystemet. Fluidiseringsflödet är summan av primärluft och rökgasåterföring till botten. Styrsystemets minsta fluidiseringsflöde är satt för att upprätthålla fluidiseringen och ge god horisontell fördelning av primärluftflödet. Ett minsta fluidiseringsflöde av luft vid maxlast ger en lokal luftfaktor under ett, beräknat för hela bränslemängden som tillförs pannan. Om man tar med i beräkningen att en stor del av bränslets flyktiga delar avgår ovanför bädden, i skvalpzonen, så blir medelvärdet av luftfaktorn i bädden större. För att sänka luftfaktorn riktigt lågt i bädden måste återförd rökgas tillföras för att upprätthålla fluidiseringen, men rökgasåterföringens inverkan på bäddtemperaturen har inte tagits med i beräkningarna som redovisas i Figur 5.



Figur 5. Beräknade bäddtemperaturer som funktion av lokal luftfaktor i bädden för antaget att $k_b = 0,40$. Linjerna representerar antagna värden på k_l .

Figure 5. Estimated bed temperatures as a function of the local air ratio, assuming that $k_b = 0.40$. The lines represent assumed values of k_l .

4.1 Metoder för att styra bäddtemperaturen

4.1.1 Rökgasåterföring till bädden

Rökgasåterföring är en vanlig metod att styra bäddtemperaturen i fluidiserade bäddpannor. Rökgas som återförs till eldstaden utgör ett nästan inert flöde som tar upp värme där den tillförs för att senare avge värmen till pannans värmeupptagande ytor. Ett ökat rökgasflöde genom bädden sänker förbränningstemperaturen lokalt. Nackdelar med rökgasåterföring är att det krävs fläktarbete för att återföra gasen samt att gasflödet genom förbränningsanläggningen ökar, vilket kan ställa krav på ett större förbränningsrum för att ge tillräcklig uppehållstid. Kyleffekten (P_{rg}) av rökgasåterföring till bädden kan uppskattas genom

$$P_{rg} = R_v \bar{c}_{p,rg} (T_b - T_{rg}) \quad (2)$$

Där R_v är det återförda rökgasflödet. En beräkning baserad på medelvärden av ett antal bränsleanalyser från Ryaverket ger att c_p för rökgasen kan uppskattas med

$$c_{p,rg} = 1.34 + 3.71 \cdot 10^{-4} T \quad [\text{kJ/Nm}^3/\text{°C}] \quad (3)$$

En storleksuppskattning vid $T_b=750\text{°C}$, $T_{rg}=150\text{°C}$ ger ett medelvärde av $c_{p,rg}$ på ungefär $1,5 \text{ kJ/°C/Nm}^3$. Kylningen blir således 900 kJ per Nm^3 återförd rökgas.

4.1.2 Vattenbegjutning av bränslet

En annan möjlig metod för att sänka bäddtemperaturen är att öka bränslets fukttinnehåll genom vattenbegjutning. Följden blir att vattnet värms upp och förångas i eldstaden och därefter följer vattenångan med rökgasen ut från pannan. Om anläggningen vore försedd med rökgaskondensering skulle denna värme kunna tillvaratas, men så är inte fallet vid försökspannorna. Kyleffekten (P_{vb}) från det tillsatta vattenflödet (m_{vb}) kan beräknas genom

$$P_{vb} = m_{vb} [h_s(T_b) - h_l(T_v)] \quad (4)$$

Där $h_s(T_b)$ är entalpin för vattenånga vid bäddtemperatur och $h_l(T_v)$ är entalpin för det tillsatta vattnet. Entalpierna kan uppskattas ungefärligt med hjälp av lineariseringarna

$$h_s(T) = 2.349 + 2.273 \cdot 10^{-3} T \quad [\text{MJ/kg}] \quad 400\text{°C} < T < 1000\text{°C}, 1 \text{ bar} \quad (5)$$

$$h_l(T) = 0.234 + 4.185 \cdot 10^{-3} T \quad [\text{MJ/kg}] \quad 20\text{°C} < T < 99\text{°C}, 1 \text{ bar} \quad (6)$$

Dessa uttryck vid $T_b=750\text{°C}$ och $T_v=50\text{°C}$ ger att kyleffekten blir ca $3,6 \text{ MJ}$ per kilo vatten. Som exempel tillfördes vattenflödet 1 t/h vid försöken, vilket ungefär motsvarar 1 MW som är något mer än en rökgasåterföring på $1 \text{ Nm}^3/\text{s}$.

4.1.3 Luftförvärmning

Bäddtemperaturen påverkas naturligtvis även av temperaturen på den ingående primärluften. Ofta förvärms förbränningsluften innan den tillförs eldstaden. Vid försökspannorna finns två luftförvärmare i serie, se Figur 3; Först en värmeväxlare mot matarvattnet följt av en luftförvärmare där luften kan värmas med ånga. Eftersom bränslet som eldas vanligtvis har ett relativt högt värmevärde behöver inte luften förvärmas för att hålla uppe förbränningstemperaturen. Därför är ångförvärmaren normalt inte i drift, medan matarvattenförvärmaren används för att hålla ned utgående rökgastemperatur genom att sänka vattentemperaturen i ekonomisern. Det shuntade vattenflödet genom luftförvärmaren styrs av en regulator som håller konstant vattentemperatur in till ekonomisern. Vanliga driftbetingelser är att lufttemperaturen höjs från ca 50°C till ca 70-80°C i luftförvärmaren. Sambandet mellan effekt (P_{lufo}), luftflöde (L_v) och temperaturökning i luftförvärmaren (ΔT_l) beräknas med

$$P_{lufo} = L_v \bar{c}_{p,l} \Delta T_l \quad (7)$$

4.1.4 Ökad recirkulation av bäddmaterial

Värme kan också bortföras från bädden genom ett ökat varvtal hos skruven som matar ut bottenaska och bäddmaterial. Denna skruv är vattenkyld för att kyla ner askan före okylda transportörer samt för att skruven inte ska bli överhettad. Askan och bäddmaterialet går igenom en trumsikt innan det finkorniga användbara bäddmaterialet återförs till pannan via retursandsilon som är gemensam för både PVA1 och PVA2. Användbart bäddmaterial kyls på vägen ytterligare (via luft) från utmatning till retursandsilo innan det återförs till pannan. Detta nedkylda bäddmaterial (retursand) ger en ökad kylning av bottenbädden då man ökar retursandflödet. Den grövre bottenaskan bortforslas för deponi eller fyllnadsmaterial.

Det saknas kontinuerliga mätningar av hur stort retursandflödet är och vid vilken temperatur retursanden återförs till pannan. Däremot mäts hur mycket effekt som tas upp av vattnet i de vattenkylda skruvarna. 15 % utsignal på bottenaskskruv motsvarar ca 1,2 t/h utmatat bäddmaterial (grov bottenaska + retursand, kalibrering vid uppstart).

5 Resultatredovisning

5.1 Försöksschema

Det visade sig i praktiken vara omöjligt att i detalj följa det planerade försöksupplägget eftersom en värmebölja medförde att pannorna oftast gick på dellast och samtidigt var det återkommande problem med bränsletillförseln, vilket bland annat berodde på underhåll av en gripklo i bränslelagret. Driftstörningar och lastvariationer gjorde det svårt att urskilja samband mellan orsak och verkan om det inte var en väldigt stor verkan. I den här förstudien var målet att sänka bäddtemperaturen med närmare 200°C, så att kvantifiera små förändringar var inte av vikt. Tidsperioder för olika försök med olika metoder att sänka bäddtemperaturen ges nedan i Tabell 1. Tidpunkter och drifttillstånd vid tagna materialprover ges i Tabell 2.

Tabell 1. Datum för olika försök.

Table 1. Dates for different tests.

Datum	Genomförda försök
2008-06-02	Avstängning luftförvärmare
2008-06-03 – 05	Ökad recirkulation av bäddmaterial
2008-06-10 – 13	Varierad rökgasåterföring genom bädden dagtid
2008-06-16 – 18	Försök med att kontinuerligt hålla bäddtemperaturen under 700°C genom rökgasåterföring
2008-06-19	Vattenbegjutning av bränslet

Tabell 2. Tidpunkter och positioner för tagna materialprover under försöken.

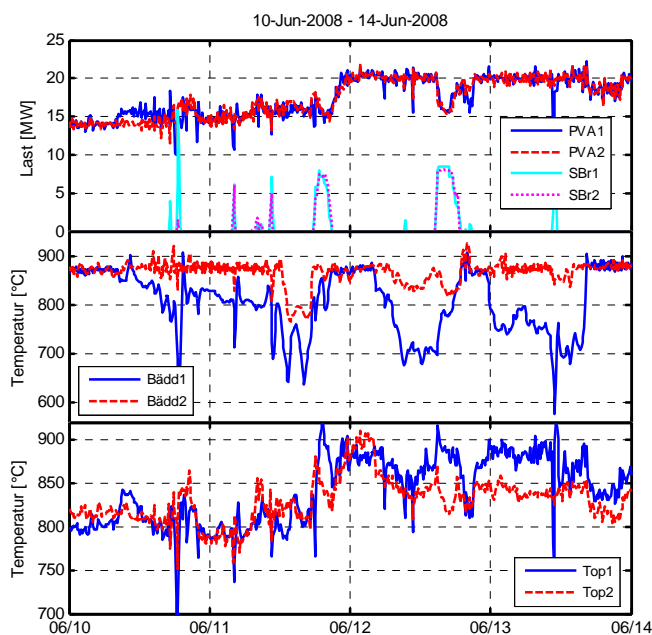
Table 2. Time and positions for solids sampled during the tests.

Datum, tid	Panna	Position	Drifttillstånd
080602 09:00	PVA1	Bottenaska Retursand Vändschakt	Normaldrift
080605 09:20	PVA1	Bottenaska Retursand Vändschakt	Efter två dygn med ökat retursandflöde. Bäddtemperatur runt 870°C
080611 08:45	PVA1	Bottenaska Retursand	Försiktig omkvotning har gett bäddtemperatur runt 800°C
080611 08:45	PVA2	Bottenaska Retursand	Jämförande prover, bäddtemp runt 880°C
080613 15:15	PVA1	Bottenaska Retursand	Efter 15 timmar med bäddtemperatur runt 750°C
080613 15:25	PVA2	Bottenaska Retursand	Jämförande prover, bäddtemp runt 880°C.
080618 14:20	PVA1	Bottenaska Retursand Vändschakt	Efter 30 timmar vid bäddtemperatur under 750°C. Genomsnitt ca 700°C.

5.2 Resultat från olika metoder att sänka bäddtemperaturen

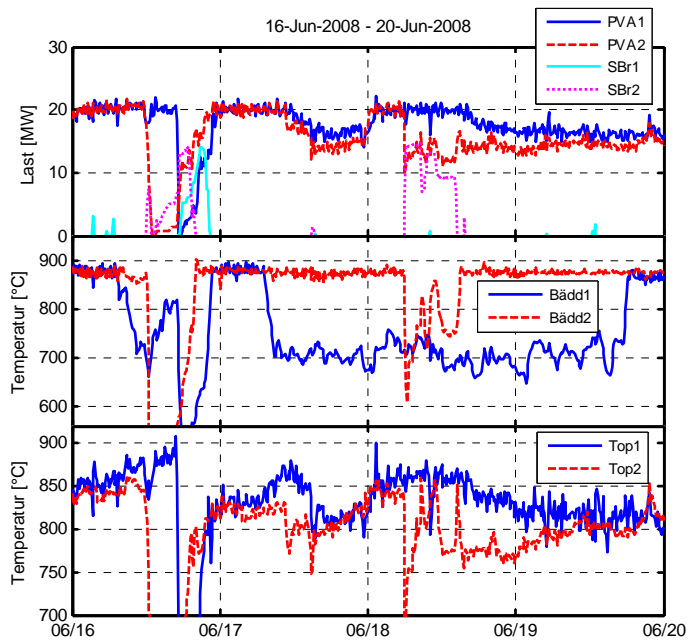
5.2.1 Samband mellan rökgasåterföring och bäddtemperatur

Försöken med att sänka bäddtemperaturen genom omkvotning av luft och rökgas sammanfattas i Figur 6 till Figur 9. De översta graferna i Figur 6 och Figur 7 visar lastvariationerna för de bägge pannorna (omkvotningsförsöken kördes enbart på PVA1). Figureerna visar tydligt att värmebehovet tidvis var lågt. Pucklarna i nedre kanten av övre diagrammen (SBr1 och SBr2) visar effekten från de oljeeldade start- och stödbrännarna som gick igång när det var problem med tillförseln av avfallsbränsle. Som synes uppkom ett antal störningar av den typen under försöken, vilket givetvis försvårar utvärderingen. De undre diagrammen i Figur 6 och Figur 7 visar uppmätta bäddtemperaturer och topptemperaturer i både PVA1 och PVA2. Figureerna visar att sänkt bäddtemperatur genom omkvotning av rökgas inte sänker temperaturen i eldstadens övre del, snarare tvärtom. Vid full last, torrt bränsle och mycket rökgas i botten förhöjdes eldstadens topptemperatur, vilket tidvis resulterade i ökade emissioner av NO_x, antagligen beroende på att SNCR-systemet är designat för att ammoniak injiceras i eldstadens överdel. En förhöjning av topptemperaturen medför en icke optimal NO_x-reduktion. Luftflöden och rökgasflöden till PVA1 under perioden visas i Figur 8 och Figur 9. Driftstörningar begränsade längden av perioderna med omkvotade förhållanden. De låga bäddtemperaturerna den 11/6 berodde på fuktigt bränsle varvid bäddtemperaturen i PVA2 sjönk under 800°C trots att den pannan kördes med normal reglering av bäddtemperaturen.



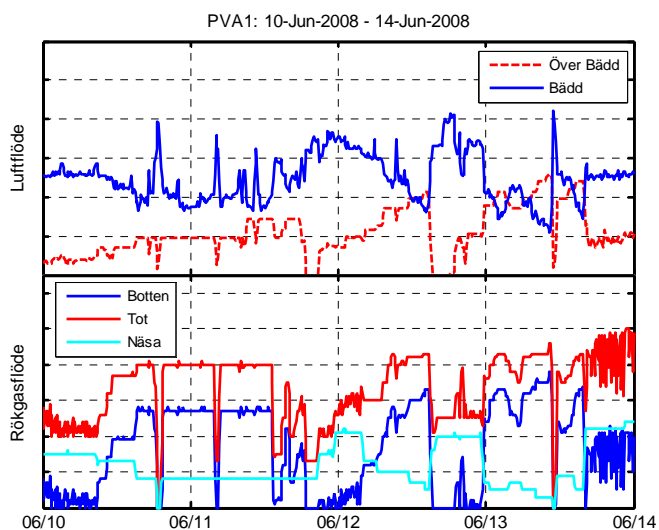
Figur 6. Last och temperaturer första veckan med omkvotningsförsök. Data från PVA2 är inritade som referensvärden.

Figure 6. Power and temperatures in combustion chamber during the first week of changing the air and recycled gas ratios. Data from PVA2 included as reference.



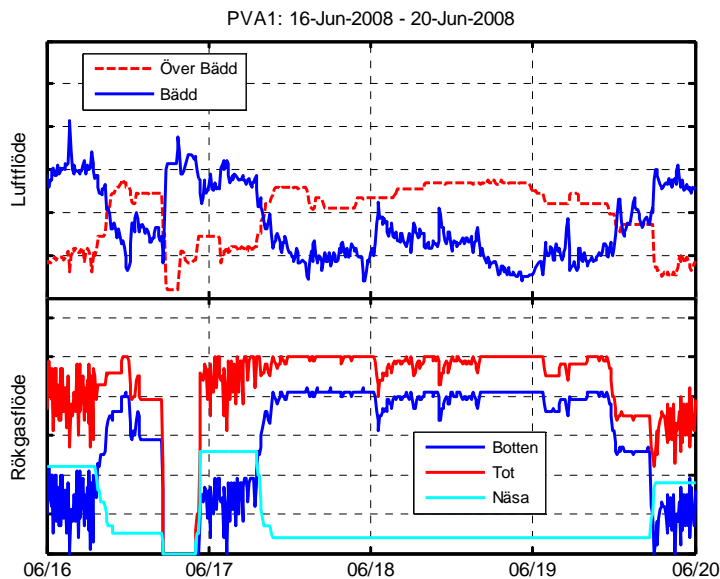
Figur 7. Last och temperaturer andra veckan med omkvotningsförsök. Data från PVA2 är inritade som referensvärden.

Figure 7. Power and temperatures in combustion chamber during the second week of changing the air and recycled gas ratios. Data from PVA2 included as reference.



Figur 8. Luft och rökgasflöden i PVA1 under samma tidsperiod som visas i Figur 6.

Figure 8. Flow rates of air and flue gas into PVA1 at same period as in Figure 6.

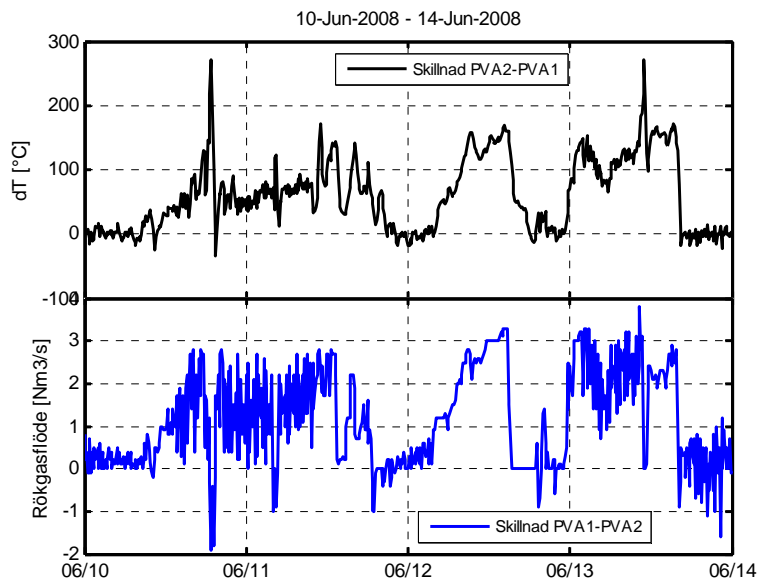


Figur 9. Luft och rökgasflöden i PVA1 under samma tidsperiod som i Figur 7.

Figure 9. Flow rates of air and flue gas into PVA1 at same period as in Figure 7.

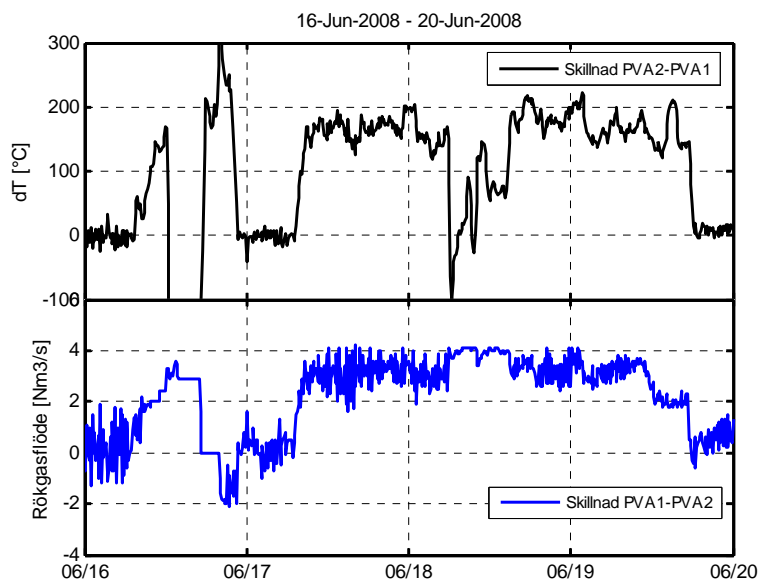
Då det är flera faktorer som påverkar bäddtemperaturen än vad som kan styras och mätas kontinuerligt, begränsas noggrannheten i framtagna empiriska samband. Det är särskilt bränslets egenskaper som varierar mycket. Dessutom uppkom driftstörningar från hängningar i bränsledoseraren samt ett varierande värmebehov.

För att göra en uppskattning av hur mycket bäddtemperaturen påverkas av rökgasåterföring jämfördes bäddtemperaturer och rökgasåterföring mellan pannorna. Detta för att undvika att variationer i bränslets fukthalt skulle påverka utvärderingen (samma bränsle går in till bägge pannorna). Däremot uppkommer fortfarande störningar från hängningar i bränsletillförseln och jämförelsen skevar under de perioder när pannorna gick med olika last. Temperaturskillnad och skillnad i rökgasåterföringsflöde i Figur 10 och Figur 11 visar att bäddtemperaturen sänks med ca 40-50°C per Nm³/s rökgasåterföring genom botten. Tillsammans med överslagsberäkningen ovan (avsnitt 4.1.1.) ger detta att bäddtemperaturen sänks ungefär 45-55°C per MJ kylning av bottenbädden, vilket gäller i temperaturspannet från 700 till 900°C. Det är möjligt att temperaturberoendet ökar när bäddtemperaturen sänks ytterligare eftersom kemiska jämvikter och kinetik då påverkas alltmer.



Figur 10. Skillnad mellan PVA2 och PVA1 i bäddtemperatur (överst) och rökgasåterföring till bädden (under). Samma tidsperiod som i Figur 6.

Figure 10. Difference of bed temperatures (top) and flow rates of recycled flue gas (bottom) between PVA2 and PVA1. Period same as in Figure 7.



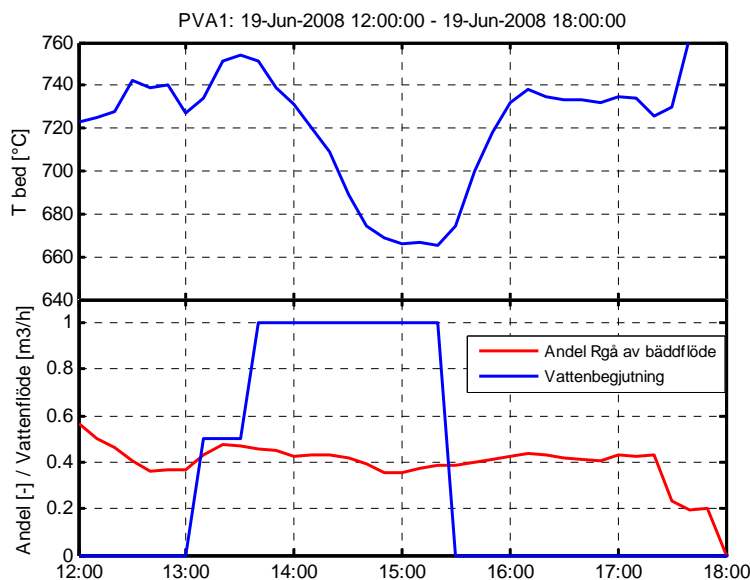
Figur 11. Skillnad mellan PVA2 och PVA1 i bäddtemperatur (överst) och rökgasåterföring till bädden (under). Samma tidsperiod som i Figur 7.

Figure 11. Difference of bed temperatures (top) and flow rates of recycled flue gas (bottom) between PVA2 and PVA1. Period same as in Figure 7.

5.2.2 Samband mellan vattenbegjutning och bäddtemperatur

Ett kortare försök utfördes där bränslet duschades med vatten i bränsledoseraren. Denna möjlighet har använts tidigare när det undersöktes hur bränslets fukthalt påverkar avskiljningsgraden av svaveldioxid i rökgasreningen. Ur driftpersonalens synvinkel var erfarenheterna från vattenbegjutningen inte positiva då det blev återkommande stopp av bränsledoseraren på grund av att en optisk nivåvakt ovanför cellmataren löste ut. Nivåvakten ska detektera om det börjar ansamlas bränsle i stupet ner mot cellmataren, men vid vattenbegjutningen formades ett slam från finkorniga bränslepartiklar (damm) och vatten som fastnade på plexiglasets framför nivåvakten och orsakade falsklarm. Under föreliggande försök behövde plexiglasets rengöras flera gånger i timmen för att upprätthålla ett jämnt bränsleflöde in till pannan.

Vattenbegjutningsförsöket startades med ett vattenflöde på 0,5 m³/h (13:10). Då var pannans last ungefär 16 MW. Eftersom vattenbegjutningen inte direkt gav någon större påverkan på bäddtemperaturen ökades flödet till 1,0 m³/h (13:30). Därefter sjönk bäddtemperaturen betydligt enligt Figur 12. Tyvärr inträffade en hängning i bränsledoseraren precis innan försöket startade vilket fick som konsekvens att det inte gavs någon konstant bäddtemperatur att utgå ifrån. Däremot blev det ett tydligt temperatursteg på ungefär 65°C när vattenbegjutningen upphörde (15:10). Volymandelen vattenånga i rökgasflödet sjönk samtidigt från 18 till 15 %, vilket ungefärligt motsvarar en minskning av fukthalten i bränslet från 40 % till 30 %. Som jämförelse kan nämnas att i en 47 MW CFB panna (som eldar träflis) gav en vattenbesprutning på 1,8 m³/h en sänkt bäddtemperatur med ca 50°C då pannan gick på ca 30 MW [3]. Om hänsyn tas till pannlast och vattenflöde blev temperaturfallet där i samma storleksordning som vid föreliggande försök.



Figur 12. Bäddtemperatur (överst) jämfört med andel rökgasflöde genom bädden och vattenbegjutningsflöde (underst).

Figure 12. Temperature of the bed (top) compared to the fraction of recycled flue gas (red line) and amount of water spray on fuel (blue line) in below plot.

5.2.3 Avstängning av luftförvärmaren

Vid full last (20MW) i försökspannorna blir effekten från avstängningen av luftförvärmaren knappt 160 kW. Denna effekt motsvarar en rökgasåterföring med 0,18 Nm³/s och sänker bäddtemperaturen med mindre än 10°C. Vid de praktiska försöken gav avstängningen av luftförvärmaren ingen signifikant påverkan på bäddtemperaturen. Däremot ökade temperaturen på rökgasen ut från ekonomisern något på grund av den förhöjda matarvattentemperaturen när luftförvärmaren stängdes av.

5.2.4 Ökad recirkulation av bäddmaterial

Hastigheten för retursandskruven styrs med en varvtalsregulator där utstyrningen är maximalt 50 % vid drift. Normalt körs skruven med en utstyrning mellan 10 och 20 %, anpassat efter tryckfallet över bädden. Under föreliggande försök ökades skruvens utstyrning till 45 %. Försöken visade att effektupptaget av bottenkruvens kylvatten ökade med ca 4 kW per procentenhet utstyrning av skruven. Effekttuttaget från bädden är dock större eftersom inte all värme tas upp av kylvattnet.

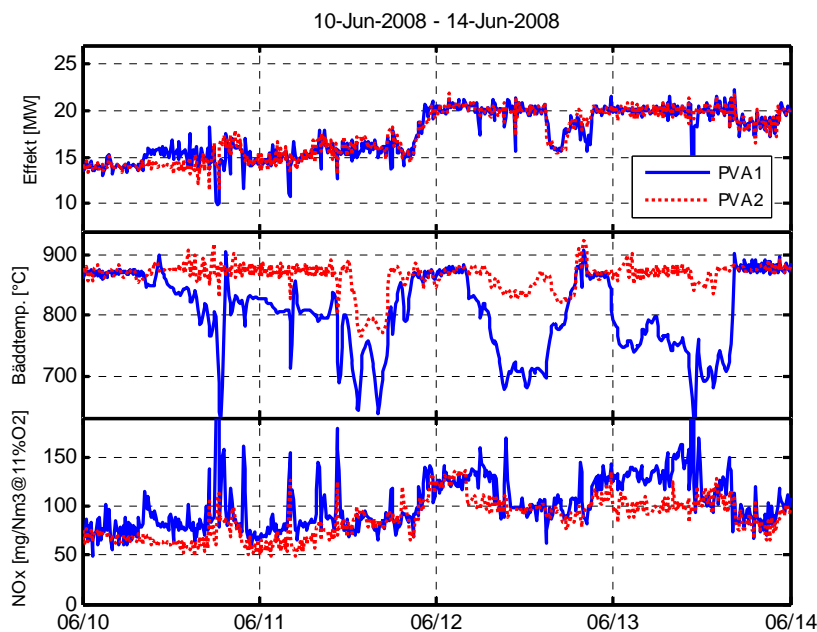
Dock påverkades inte bäddtemperaturen av ökad recirkulation av bäddmaterial mer än att förändringen drunknade i alla normala fluktuationer. Uppskattningsvis blev påverkan ca 10°C av att öka skruvens utstyrning med 30 procentenheter.

5.3 Emissioner

Under försöken observerades inga förhöjda emissioner av CO eller kolväten när bäddtemperaturen sänktes vid bibehållen O₂ koncentration ut från pannan. De CO-spikar som uppkom berodde på hängningar i bränsledoserarna och påverkades obetydligt av bäddtemperaturen. Det var också svårt att se några generella skillnader i emissioner av HCl och SO₂.

Tidvis under försöken, speciellt då torrt bränsle eldades vid hög last, var emissionerna av NO_x högre från den omkvotade pannan (PVA1) än från den med normala driftinställningar, se Figur 13. Förmodligen förklaras trenden med ökad NO_x emissionen vid sänkt bäddtemperatur som en konsekvens av förhöjd temperatur i eldstadens övre del när mer rökgas tillfördes i botten av pannan. Temperaturen i den del av pannan där ammoniak injicerades kan då bli högre än optimalt för SNCR systemet.

Om man jämför det tilltänkta driftfallet vid 700°C och det normala driftfallet vid fullast för Borås (data från 2008-06-16), då ökade topptemperaturen med ca 40°C till ca 870°C och NO_x emissionen steg cirka 20-30 % vid oförändrad O₂. Men när sedan bränslet blev fuktigare och bäddtemperaturen föll trots reducerad rökgasåterföring så sjönk också topptemperaturen och NO_x till under ursprungsvärdena. Värden är osäkra då pannans drifttid vid fullast var begränsad under försöksperioden samtidigt som topptemperaturen även vid normaldrift varierar i ett spann mellan 820 och 900°C.



Figur 13. Last (överst), bäddtemperatur (mitten) och emissioner av NOx (underst) för både PVA1 (blå linje) och PVA2 (röd streckad linje).

Figure 13. Top) Power, Middle) Bed temperatures, Below) NOx emissions of PVA1 (blue lines) and PVA2 (dashed red lines).

5.4 Sand- och askprover

Prover av bottenaska, retursand och aska från vändschakt togs vid ett antal tillfällen under försöksperioden enligt Tabell 2. Som nämnts i 3.1 så matas bäddmaterial blandat med bottenaska ut via skruvtransportörer igenom en trumsikt varefter det finare materialet återförs pannan som retursand medan den grövre fraktionen benämns bottenaska och lämnar anläggningen. Prover av bottenaska och retursand togs i fallande ström i schakt efter trumsikten. Proverna från vändschaktet togs med en utmatningsskriv som finns placerad där.

5.4.1 Bottenaska

Vad gäller bottenaskan visade en okulärbesiktning att det mest rörde sig om större obrännbara bitar, såsom skärvor av glas, keramik, stenar och metallföremål. Eftersom dessa relativt stora fragment beror på vad som tillfälligtvis ramlat in i pannan bedöms en kemisk analys av proverna (ca 1 kg) vara av begränsat värde. En intressant observation är dock att det vanligtvis, vid normal bäddtemperatur, finns en hel del agglomerat i storleksordningen 1-3 cm som är täckta med sandpartiklar, se exemplet i Figur 14. Några partiklar av den typen visas uppförstorade i Figur 15. Det är möjligt att de bildas av glasbitar som är klibbiga vid högre temperaturer. Denna typ av agglomerat återfinns inte i proverna när bäddtemperaturen har varit under 750°C under mer än 15 timmar, se Figur 16.



Figur 14. Bottenaska från PVA2, 080613, normal bäddtemperatur.

Figure 14. Bottom ash sample from PVA2, 080613, normal bed temperature.



Figur 15. Exempel på agglomerat i bottenaska vid normal bäddtemperatur, 080602. Dessa relativt stora partiklar förefaller bestå av en kärna av glas på vilket det fastnat sand.

Figure 15. Examples of agglomerates in bottom ash at normal bed temperatures, 080602. These relatively large particles consist of a glass core with sand attached at the surface.



Figur 16. Bottenaska från PVA1, 080613, sänkt bäddtemperatur.

Figure 16. Bottom ash, PVA1, 080613, reduced bed temperature.

5.4.2 Retursand

Retursanden från försökspannan uppvisade en nyansskillnad vid reducerad bäddtemperatur; från att ha varit ljusbrun förändrades färgen mot en något mer ljusgrå nyans, se Figur 17. En grundläggande kemisk analys av retursanden visade att kloridinnehållet ökat från 0,04 % (A) till 0,19 % (B), se Tabell 3. Denna mer än fyrdubbling av kloridinnehållet i retursanden påvisar att den kemiska jämvikten i bädden har förskjutits vid sänkt bäddtemperatur. Huvudelement i retursanden (i Tabell 3) bestämdes med modifierad metod ASTM D 3682, medan kloridinnehållet bestämdes med jonkromatograf. För att fastsätta hur kloriderna sitter bundna i bäddmaterial och aska skulle ytterligare analyser behövas, där även zink och bly skulle vara av intresse att mäta.

Däremot iaktogs ingen förändring av Na- och Ka-halterna från detta korta testföreläggelse. Bädden innehåller troligen mer brännbart material vid sänkt bäddtemperatur men detta iaktogs inte i varken retursandaskan eller i bottenaskan.



Figur 17. Retursand från PVA1: A) Normal bäddtemperatur 080602, B) Efter 30 h under 750°C, 080618.

Figure 17. Recycled sand samples: A) At normal bed temperatures 080602, B) After 30h at bed temperatures below 750°C, 080618.

Tabell 3. Ämnen och kloridinnehåll i prover av retursand, tagna under förhållanden i Tabell 2.

Table 3. Main elements and chlorides in sieved bed material sampled at conditions in Table 2.

		A	B	C	D
Panna		PVA1	PVA1	PVA1	PVA2
Datum		02/06	18/06	13/06	13/06
Bäddtemp.	°C	Normal	Sänkt	Sänkt	Normal
Al	Vikt-%	6,11	6,27	6,33	6,59
Si	Vikt-%	28,3	27,0	27,9	28,2
Fe	Vikt-%	1,64	1,79	1,52	1,59
Ti	Vikt-%	0,67	0,66	0,65	0,64
Mn	Vikt-%	0,07	0,08	0,06	0,06
Mg	Vikt-%	0,67	0,60	0,66	0,65
Ca	Vikt-%	7,74	7,04	7,18	7,10
Ba	Vikt-%	0,16	0,16	0,16	0,16
Na	Vikt-%	3,48	3,18	3,35	3,39
K	Vikt-%	2,30	2,57	2,45	2,44
P	Vikt-%	0,26	0,19	0,20	0,20
Cl	Vikt-%	0,04	0,19	0,15	0,04

5.4.3 Stoftprover från vändschakt

Stoften från vändschaktet föreföll innehålla en något högre andel oförbrända koksbitar i provet taget under sänkt bäddtemperatur, se Figur 18. Detta kan bero på den troligen försenade utförbränningen (med bl.a. högre topptemperaturer) vid det omkvotade driftfallet. Men det kan också vara en följd av att det var högre pannlast vid tidpunkten för provtagningen vid lägre bäddtemperatur. En annan osäkerhet är de varierande bränsleegenskaperna. Fler prover skulle behövas för att erhålla ett statistiskt underlag.

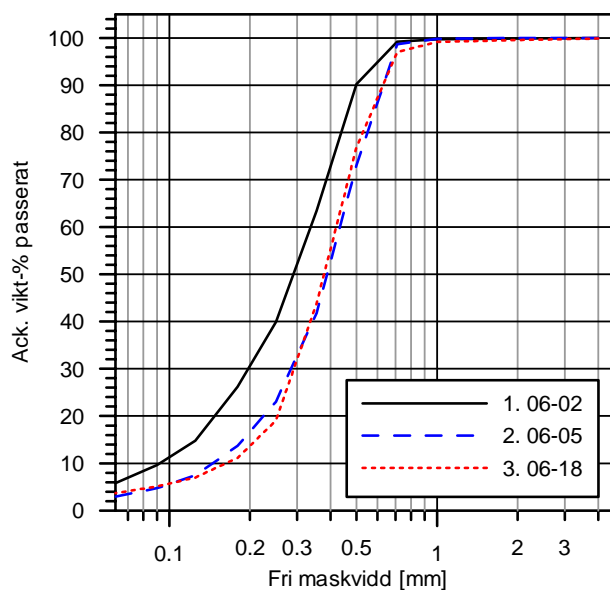


Figur 18. Prover tagna i vändschaktet från PVA1. Vänster) Vid bäddtemperatur runt 870°C, 080602, Höger) Vid bäddtemperatur under 750°C, 080618.

Figure 18. Samples from bottom of first pass of PVA1. Left) When bed temperatures around 870°C, 080602 and Right) When bed temperatures below 750°C, 080618.

Resultat från siktanalyser av vändschaktsaskan visas i Figur 19, tagna under drifttillstånd givna i Tabell 4, där mängden utmatad retursand är i stort sett proportionell mot kylningen av bottenaskskruven. De två första proverna är tagna under samma pannlast och jämförbar bäddtemperatur men med ett ökat retursandflöde under det senare provet, vilket kan ha orsakat den grövre partikelstorleksfördelningen. Pannan kördes med sänkt bäddtemperatur

under det tredje provet, där det uppmättes i stort sett samma partikelstorleksfördelning som under Fall 2 med hög retursandutmatning. Under det tredje provet kördes pannan med avsevärt högre last jämfört de två andra och retursandflödet var något högre än under det första fallet. En effektökning av pannan innebär att mer gas går genom eldstaden vilket kan dra med grövre partiklar till vändschaktet, det är därför inte förvånande att detta driftfall hade en grövre partikelstorleksfördelning än under det första fallet. Jämfört med Fall 2 kanske påverkan från effektökningen och sänkningen av retursandflödet tog ut varandra. Det är inte säkert att de uppmätta variationerna enbart beror på ändrade driftparametrar eftersom det även finns en stor osäkerhet från varierande storleksfördelningar av bränsleaska och tillsatt ny sand.



Figur 19. Storleksfördelning av stoft från vändschaktet i PVA1.

Figure 19. Size distribution of particles sampled at the bottom of the first pass of PVA1.

Tabell 4. Driftförutsättningar vid prov redovisade i Figur 19.

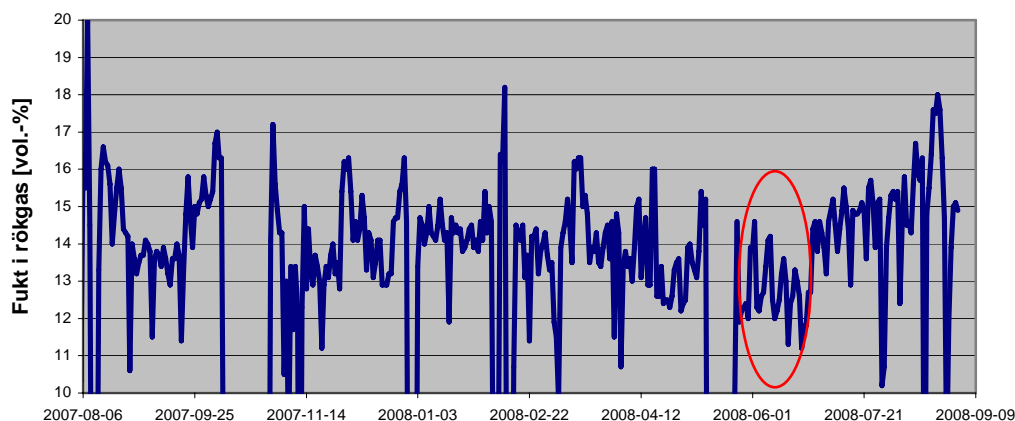
Table 4. Boiler operation at sampling of particles for Figure 19.

Fall		1	2	3
Provdag		2008-06-02	2008-06-05	2008-06-18
Bäddtemperatur	°C	869	864	683
Last	MW	16	16	20
Kyleffekt bottenaskskruv	kW	160	272	189
Gasflöde genom bädd	Nm ³ /s	Ca 6	Ca 6	Ca 6,7

6 Resultatanalys

På grund av att det är många faktorer som samverkar vid avfallsförbränning är det svårt att kvantitativt bestämma inflytandet från olika parametrar, särskilt som det under försöksveckorna var många driftstörningar och laständringar. Syftet med föreliggande förstudie var att fastställa hur långt bäddtemperaturen kan sänkas med olika åtgärder och det målet har uppnåtts, åtminstone för bränsleblandningen som eldades under försöksperioden. Försöken har också gett svar på vilka metoder som är av intresse att använda i en eventuell fortsättning av projektet. Den viktigaste åtgärden är att öka rökgasåterföringsflödet genom bottenbädden samtidigt som primärluftflödet minskas. För att inte behöva maximera rökgasåterföringen vore det fördelaktigt att kombinera omkvotningen av gas och luft med vattenbegjutning av bränslet.

Under försöksperioden var bränslet i genomsnitt något torrare än vad det brukar vara, vilket illustreras av dagsmedelvärden av rökgasens vattenhalt under ett år i Figur 20 där den aktuella mätperioden är inringad. Vid försöken med vattenbegjutning av bränslet ökade fuktinnehållet i rökgasen från 13 till 18 %. Figur 20 visar att bränslet sällan är så pass fuktigt i sig självt.



Figur 20. Dagsmedelvärden av fuktinnehåll i rökgasen under ett år, aktuell mätperiod inringad i rött.

Figure 20. Daily averages of moisture content in flue gas during one year. Present experimental period enclosed in red.

7 Slutsatser

Försöken har visat att det med befintlig utrustning går att kvota om luft och rökgasflöden så att en bäddtemperatur runt 700°C erhålls vid full last och normal bränslemix. När bränslefukten varierar inom normala gränser är det tidvis svårt att nå bäddtemperaturer under 700°C när bränslet är torrt medan temperaturen kan dyka under 650°C när fuktigare fraktioner ramlar in.

Bäddaskans egenskaper förändras synbarligen vid sänkt bäddtemperatur. De agglomerat som finns i riklig mängd vid normal bäddtemperatur har försvunnit i proverna tagna vid låg bäddtemperatur. På retursanden har färgnyansen förändrats, från brunaktig till mer gråtonad samtidigt som kloridinnehållet fyrdubblats.

Minskad primärluft och ökad rökgasåterföring genom bädden medför att förbränningsförloppet förskjuts uppåt i eldstaden, vilket vid full last (stora gasflöden) ger en något ökad temperatur i pannans senare delar. Sådan drift med ett torrt bränsle förefaller ge något förhöjda emissioner av NO_x.

Den automatiska regleringen av bäddtemperaturen kan ge relativt stora fluktuationer i rökgasflödet (och måttliga svängningar i bäddtemperaturen), vilket kan bero på att det är svårt att reglera små flöden in till luftlådan när fläkt och spjäll måste arbeta mot ett ganska högt tryck. Ifall pannan är kvotad mot sänkt bäddtemperatur finns idag ingen automatisk styrlogik som tillåter att rökgasåterföring ersätter primärluft som fluidiseringsmedia fullt ut. Därför kan inte dagens styrsystem användas för att styra bäddtemperaturen genom att bara sätta ett lågt bäddtemperaturbörvärde. Det skulle dock antagligen inte vara alltför svårt att modifiera styrsystemet så att det beaktar och säkerställer ett visst minsta fluidiseringsflöde även vid kraftig rökgasåterföring genom bädden. Begränsningar såsom att man alltid skall upprätthålla ett minsta fluidiseringsflöde (annars trippar pannan) behöver inte ändras. Alternativet är att handköra, som gjorts under föreliggande förförsök, men det kräver att en operatör alltid håller ett öga på driften för att kunna kompensera för bränslevariationer.

För att erhålla bäddtemperaturer under 700°C även vid förbränning av lite torrare bränsle är vattenbegjutning av bränslet en effektiv metod som kan användas tillsammans med rökgasåterföring. Tyvärr gav den befintliga dysan i bränsledoseraren upphov till driftproblem eftersom uppslammat damm fastnar på plexiglasets framför nivåvakten över cellmatararen. När 1 m³/h vatten sprutades in behövde glaset rengöras 2-3 ggr per timme, vilket inte är hållbara betingelser vid eventuella fortsatta långtidsförsök. Kanske kan nivåvakten tillfälligt kopplas ur under eventuella fortsatta försök. Alternativt kan vattenbegjutningen flyttas från bränsledoseraren till bränslestupet.

Avstängning av matarvattenluftförvärmaren gav förhöjda rökgastemperaturer ut från ekonomisern. Hursomhelst gav den måttliga luftförvärmningen en relativt liten påverkan på bäddtemperaturen. Även ökat varvantal på askutmatningsskruven gav marginell påverkan.

8 Rekommendationer och användning

Med enbart omkvotning av luft och rökgasåterföring kan bäddtemperaturen i försökspannorna sänkas till ca 700°C, (630-730°C) beroende på bränslets fukthalt. För att hålla bäddtemperaturen under 700°C även då relativt torra bränslefraktioner kommer in krävs att omkvotningen kompletteras med vattenbegjutning av bränslet.

En eventuell fortsättning av detta projekt innefattar försök med beläggningssond där det krävs att bäddtemperaturen kan hållas nere veckovis. Förutom att systemet för vattenbegjutning måste modifieras kräver sådana försök en ansevärd personalinsats för att manuellt hålla koll på driften. För att underlätta för driftpersonalen bör styrsystemet modifieras så att bäddtemperaturen kan hållas automatiskt även vid höga rökgasåterföringsflöden genom bädden.

Man bör även riskbedöma de mer negativa effekterna innan ett längre driftfall körs med omkvotning av luft och rökgasåterföring. Detta gäller iakttagelser såsom högre NO_x emissioner samt högre topptemperaturer, men även förändring av syrehalten i bädden och dess betydelse för bäddkemin, bottenaskkvalitén samt eventuell ackumulering av oförbränt i bädd. Vad gäller totala rökgasflödet i pannan så visade försöken att en sänkning av bäddtemperaturen medför ett ökat rökgasflöde genom pannan på i medeltal ca 1,5 Nm³/s gas om sänkningen sker endast med hjälp av omkvotning. Ökningen beror på ökad rökgasåterföring. Behovet av rökgasåterföring minskar om bränslet vattenbegjuts under försöken.

Dessa förförsök visar ändå att pannorna i Borås kan användas för att studera effekter av sänkt bäddtemperatur vid avfallsförbränning i full skala. Att kloridinnehållet i bäddsanden fyrdubblats efter 30 timmars drift med sänkt bäddtemperatur tyder på att den kemiska balansen i bädden verkligen påverkats. Det skulle därför vara av stort intresse att fortsätta projektet med utförligare mätningar i pannan under drift vid sänkt bäddtemperatur för att klargöra effekter på beläggingsbildning vid överhettarna samt öka förståelsen för reaktionerna i bädden.

9 Litteraturreferenser

- [1] Davidsson, K., ”*Biofuel pyrolysis and on-line alkali measurements*”, Ph. D. thesis, Göteborg University Department of Chemistry: Göteborg, 2002.
- [2] Gyllenhammar, M., m.fl.; ”*Åtgärder för samtidig minimering av alkalirelaterade driftproblem, Etapp 2*”, Värmeforsk Rapport 1037, Stockholm, 2007.
- [3] Lestander, T., m.fl.; ”*On-line NIR-fukthaltsmätning för styrning av panna i värmekraftverk*”, Värmeforsk Rapport 1059, Stockholm, 2008.



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