

Mätningar av temperaturer enligt EU:s direktiv för förbränning av avfall

Elisabet Blom, Roland Gårdhagen, Jonas Hägglund, Hans Lindqvist, Krister Wahlström, Dan Loyd



**Mätningar av temperaturer enligt EU:s direktiv
om förbränning av avfall**

**Undersökande temperaturmätningar och
simuleringar**

**Temperature measurements according to directive
given by EU regarding combustion of waste**

**Investigated measurements of temperature and
simulations**

Elisabet Blom ÅF-Energi&Miljö

Roland Gårdhagen, Jonas Hägglund, Hans Lindqvist, Krister
Wahlström, Dan Loyd

Linköpings Universitet, Institutionen för konstruktions- och
produktionsteknik

P9-817, P4-201

VÄRMEFORSK Service AB
101 53 STOCKHOLM · Tel 08-677 25 80
Maj 2003
ISSN 0282-3772

Abstract

Projektet omfattar mätningar av temperaturen med termoelement i två olika pannor, en fluidbäddpanna och en rosterpanna. Modellering och simulering av termoelement har också gjorts för att kunna analysera mätfelet som uppkommer vid mätning.

Detta projekt har finansierats av Värmeforsk.

Sammanfattning

EU:s direktiv om förbränning av avfall (direktiv 2000/76/EG den 4 december 2000 om förbränning av avfall) innehåller nya villkor och skärpta krav på utsläpp till luft och vatten från förbränning. För att kunna följa direktivet krävs att man kan visa att förbränningsgaserna av avfallet uppehåller sig vid en temperatur på minst 850°C i minst 2 sekunder.

Projektets syfte är att undersöka huruvida konventionell mätutrustning såsom termoelement och sugpyrometer är lämplig att använda för kontroll av om pannan upprätthåller temperaturkravet enligt direktivet.

Modellering och simulering av termoelementet som är tänkt att användas i pannan har gjorts med FemLab. En analytisk modell har implementerats i Matlab för att i vidareutvecklad form kunna användas reglertekniskt.

Modellerna i sitt nuvarande skick kommer att visa på ett visst bestämt mätfel vid en given gastemperatur men så är tyvärr inte fallet i verkligheten. Detta beror på att förhållandena i pannan varierar med tid och läge.

Mätningar har utförts i två typer av pannor, en fluidbäddpanna och en rosterpanna. Motivet är att undersöka hur mätfelet varierar mellan olika pannor och om en generell felberäkningsmetod kan användas.

Mätningarna visar på svårigheter att uppnå de krav som EU har ställt när det gäller förbränning av avfall i pannor. Svårigheterna ligger främst i arten av det mätfel som uppstår när man mäter med termoelement. Det visar sig att mätfelet även varierar vid konstant gastemperatur. Mätningarna visar att upp till 80 °C skillnad i mätfel kan erhållas vid samma gastemperatur. Variationerna beror till viss del av att gasens emissivitet varierar med dess sammansättning samt strömningarna i pannan. Detta ger att olika mycket värme förs till termoelementet med varierande mätfel som följd. De uppmätta serierna visar dock en tendens på att mätfelet är mindre vid lägre temperaturer. Fortsatta mätningar kommer dock att krävas för att säkert kunna fastställa hur stora variationerna kan vara vid olika temperaturer och förhållanden.

Temperaturen varierar också i olika positioner i pannan. Vid vissa tillfällen kan medeltemperaturen vara klart högre på en sida vid en punkt för att vid nästa mätserie vara högre i en annan punkt på en annan sida. Det har inte kunnat fastställas varför temperaturen ”skiftar” sida, men att gränsskiktets variationer i tjocklek har en inverkan på temperaturen är konstaterat och det kan vara en orsak till de temperaturvariationer som uppstår. Störningar i bränsletillförseln kan också påverka.

Mätningarna som har utförts vid detta projekt bör kompletteras för att säkerställa slutsatserna. De rekommendationer till fortsatt arbete som kan ges utifrån de mätningar som har gjorts är främst att nya mätningar bör göras under längre tidsperioder, för att täcka de variationer som uppstår i pannan på grund av de ändringar i lasten som uppträder. Dessa mätningar kan ge ett mer komplett samband avseende variationer i mätfelet än vad som har erhållits i detta projekt. Dessutom behövs jämförande

mätningar med sugpyrometer vid pannas olika mätpunkter för att få en bra bild av mätfelet vid dessa positioner. En viktig slutsats är att i denna applikation bör användning av termoelement typ-N förordas framför termoelement typ-K.

Det krav som EU ställt beträffande gasens uppehållande vid 850°C i 2 sekunder i pannan har inte kunnat utvärderas fullständigt på grund av att pannan hade för få mätpunkter i höjdlängd (speciellt Motala). Kunskapen om strömningarna och gashastigheten i de båda pannorna är inte heller tillräcklig för att få en komplett bild av temperaturfördelningen i pannan.

Summary

The directive regarding combustion of waste (directive 2000/76/EG 4 of December 2000 about combustion of waste) contains new conditions and enhanced demands on pollution to the air and water from the combustion. To be able to follow the directive, it is of most importance to show that the combustion gases stay at a temperature of 850°C during at least 2 seconds.

The purpose of this project is to examine whether conventional measurement equipment like thermocouple and suction pyrometer are suitable to examine if the boiler fulfills the demands of the directive.

Modeling and simulation of the thermocouple have been done with the program FemLab. An analytical model has been implemented in the program Matlab and the purpose of that is to be able to see if an improved version can be used in automatic control system.

The models in their present state will show a certain measurement error at a certain gas temperature, which unfortunately is not the case in the real situation. This is due to circumstances in the boiler that varies with time and place.

Measurement has been carried out in two kinds of boilers, fluidized bed and grate boiler. The reason for that is to be able to examine if the measurement error varies in different boilers and to find out if a general method can be used for the error calculations.

The measurements indicate difficulties to reach the directive set by EU about combustion of waste; these are due to the nature of the measurement error that arises when measuring with thermocouple. It has been shown that the error varies despite constant gas temperature and that it can vary up to 80°C. This variation depends to some extent of the emissivity of the gas because the emissivity varies with the composition of gas and disturbances in the boiler. The conclusions are that the heat flow from the gas to the thermocouple is different even though the temperature in the boiler is constant. The measurements indicate that the error is lesser at lower temperature. To be able to establish how large the variations are and at which temperature, continuous measurements are required.

The temperature also varies between different positions in the boiler. At one moment the mean temperature might be much higher at a point on one side, and at next moment the top at another side. The reason to why the maximum “changes side” has not been made clear, but it is observed that the variations of the boundary-layer thickness have an influence on the temperature and might also have an influence on its variation. Disturbances in the fuel feeding may also affect the temperature variations.

The measurements in this project should be completed to verify the conclusions. Recommendations to future work that can be given now are first that measurements should be carried out for longer periods to cover the variations that come up in the boiler due to changes in the load. These measurements can give more extensive

information concerning the variations of the measurement error, than has been shown in this work. In addition comparing measurements with suction pyrometer in different parts of the boiler are needed to get better knowledge of the measurement error. An important conclusion is that thermocouple of type- N should be used instead of type-K for this type of measurement.

The demands in the directive about the gas detaining in the boiler of a temperature at minimum 850°C for two seconds have not been fully evaluated. This is because measurement points only existed at one level in the boiler and at the roof (Motala). The knowledge about the flow and the speed of the gas is also something that has to be evaluated to get a complete image of the behavior of the temperature in the boiler.

Innehållsförteckning

1	<u>BAKGRUND, SYFTE OCH MÅL</u>	1
2	<u>TEORI OCH HISTORIK</u>	2
3	<u>MÄTINSTRUMENT OCH KALIBRERING</u>	3
3.1	<u>MÄTINSTRUMENTEN</u>	3
3.2	<u>KALIBRERING AV TERMoeLEMENT</u>	4
3.3	<u>EFTERKONTROLL AV TERMoeLEMENTEN</u>	4
4	<u>BERÄKNINGSMODELLER</u>	6
4.1	<u>FÖRUTSÄTTNINGAR</u>	6
4.2	<u>FEMLAB MODELL</u>	6
4.3	<u>ANALYTISKMODELL</u>	11
5	<u>MOTALA</u>	14
5.1	<u>ANLÄGGNINGSBESKRIVNING</u>	14
5.2	<u>MÄTUPPSTÄLLNING</u>	15
5.3	<u>MÄTFÖRFARANDE</u>	16
5.4	<u>MÄTRESULTAT</u>	17
5.5	<u>RESULTATANALYS MOTALA</u>	31
6	<u>GÄRSTADVERKET</u>	33
6.1	<u>ANLÄGGNINGSBESKRIVNING</u>	33
6.2	<u>MÄTUPPSTÄLLNING</u>	33
6.3	<u>MÄTFÖRFARANDE</u>	35
6.4	<u>MÄTRESULTAT</u>	36
6.5	<u>RESULTATANALYS GÄRSTAD</u>	43
7	<u>RESULTATANALYS</u>	45
7.1	<u>KOMMENTARER ANGÅENDE VAL AV TERMoeLEMENT</u>	45
7.2	<u>ANALYS AV MÄTNINGARNA</u>	45
7.3	<u>SIMULERINGSMODELLERNA</u>	46
8	<u>FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGSARBETE</u>	47
9	<u>KOMMENTAR</u>	48
10	<u>REFERENSER</u>	49

BILAGOR

A1 Lösning av den analytiska modellen

A2 Matlab-kod analytisk lösning

1 Bakgrund, syfte och mål

Bakgrunden till detta projekt ligger i det direktiv som EU gett vad gäller förbränning av avfall (direktiv 2000/76/EG den 4 december 2000 om förbränning av avfall) vilket innehåller nya villkor och skärpta krav på utsläpp till luft och vatten från avfallsförbränning. För att kunna följa direktivet krävs enligt en kontrollmetod att man kan visa att förbränningsgaserna av avfallet uppehåller sig vid en temperatur på minst 850°C i minst 2 sekunder.

Under årens lopp har mätmetodiken i allmänhet utvecklats mot mer och mer sofistikerade metoder. Detta har inte alltid gynnat användarna vad gäller pris, användarvänlighet och driftsäkerhet. En metod som bygger på termoelement skulle uppfylla kraven på välkända och billiga instrument. Det skall dock sägas att termoelement i pannmiljön mäter fel men skulle man på ett enkelt sätt komma tillrätta med felet så är metoden värd att beakta.

Det kan dock konstateras att mätmetoder baserade på termoelement alltid har ett fel beroende på omkringliggande störningskällor och i förekommande fall framför allt strålning. Det är dock viktigt att påpeka att en stabil mätmetod med ett känt fel kommer att ge ett lika bra resultat i det här fallet som en ”exakt” mätmetod. För att lösa detta problem behövs en beräkning som kan prediktera felet. Det är önskvärt att denna modell inte kräver allt för mycket beräkningskapacitet då den skall vara möjlig att implementera i pannregleringen.

För att öka bredden i projektet har prov gjorts i en avfallseldad rosterpanna (Linköping) och en biobränsleeldad BFB-panna (Motala). Båda pannorna har under den aktuella projektperioden varit i drift varför det inte har funnits möjlighet att skapa några nya mätpunkter utan befintliga hål i pannväggen har utnyttjats.

Projektet syftar till att undersöka om man med en metod baserad på termoelement skulle kunna visa att EU:s direktiv för förbränning av avfall kan upprätthållas.

2 Teori och historik

Under årens lopp har man diskuterat många olika metoder och teorier om hur temperaturmätning i pannor är möjlig att göras. Detta har bland annat innehållit diskussioner om att termoelement inte mäter rätt. Det är också tämligen svårt att bestämma hur stort felet blir, men det har dock skrivits en del under årens lopp om problematiken. Man har därför försökt utnyttja andra metoder t.ex. optiska och indirekta [ref 1]. Det är dock väsentligt att notera att temperaturen skall mätas nära väggen enligt direktivet.

Frågan aktualiserades i samband med att EU:s direktiv om förbränning av avfall antogs. Ett konstaterande som görs är att akustiskpyrometri och IR-pyrometri ger en mer exakt temperatur än termoelement [ref 2]. Detta är sant men frågan är om det är ekonomiskt försvarbart att använda dessa metoder ifall en stabil mätning kan göras med termoelement. Det kan dock konstateras att användningen av dessa metoder i regel har fallit på priset och driftsäkerheten.

En grundläggande princip vad det gäller termoelement är att ju mindre diameter som kan användas desto bättre blir resultatet. I detta fall är det svårt att uppnå detta då värmen i pannan gör att termoelementen lätt bränns av. I denna applikation behövs kraftiga termoelement, helst med mantel för att minimera risken för givarhaveri.

Den temperatur som uppmäts i termoelementet ligger mellan väggtemperaturen och omgivningens temperatur [ref 3]. I det här fallet blir det dock besvärligt då det dels strålar från gasen till termoelementet dels från termoelementet till den kallare pannväggen. I vissa lägen kan termoelementen även påverkas av strålningen direkt från rostern men detta bidrag kan ofta anses litet.

I detta mätsystem är även strömningsförhållandena i pannan av största intresse då gränsskiktet kommer att variera i varje panna, men även mellan olika punkter i samma panna och med tiden. De senare faktorerna är mer framträdande i en rosterpanna än i en fluidbäddpanna.

Vad gäller termoelementmätningar finns det flera metoder beskrivna, men den som har bäst referenser är tvåtrådsmetoden som går ut på att eliminera strålningspåverkan genom att använda två termoelement med olika tjocklek [ref 1]. Genom att extrapolera mätvärdena kan man i princip komma ner till en diameter lika med noll. Eftersom felet i mätningen är en funktion av termoelementets dimensioner så kan en korrektionsfaktor räknas fram.

Det finns också metoder där temperaturgivare muras in i murverket se [ref 4].

3 Mätinstrument och kalibrering

3.1 Mätinstrumenten

De mätinstrument som använts under detta projekt är termoelement av typen N och av typen K samt sugpyrometer. Anledningen till att 2 olika termoelementstyper använts är möjligheten att göra en jämförelse mellan de olika typerna.

Vid mätning med termoelement i den övre delen av pannor så kommer dessa att ständigt visa fel temperatur på gasen. Detta beror på att mätkroppen enbart mäter sin egen temperatur. I detta fall är skillnaden stor mellan mätkroppens och gasens temperatur och skillnaden kan vara uppåt 100°C. I den undre delen av pannan kommer inmurning att ge ytterligare bidrag. Detta beror på att termoelementet har ett strålningsutbyte med den vattenkylda pannväggen och den varma gasen samt att värmen leds till den vattenkylda väggen. Även konvektion kommer att ha en viss inverkan på den uppmätta temperaturen.

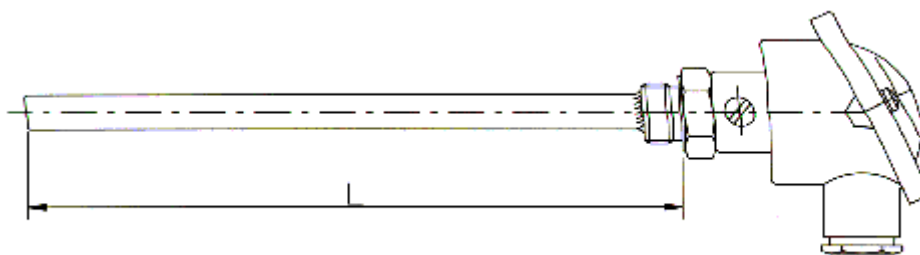
För att kunna mäta upp gastemperaturen kan också sugpyrometrar, IR-pyrometrar och akustiska pyrometrar användas. Med hjälp av dessa metoder tar man bort strålningens inverkan på mätkroppen. Sugpyrometern används i detta fall som referens medan de andra två metoderna inte är applicerbara i detta fall. IR-pyrometern kan ha problem med att mäta i en viss punkt i gasen då den är mer lämpad att mäta på fasta kroppar. Vad gäller den akustiska pyrometrin så mäter den ett medelvärde av temperaturen över en yta. Detta är inte tillämpligt inom detta projekt då vi skall mäta temperaturen i en punkt. Det bör dock påpekas att alla metoder mäter mer eller mindre fel.

Priset på dessa typer av givare är klart högre än för termoelement och som tidigare nämnts är det termoelement som är mest intressant i detta projekt.

Det mätverktyg som använts som referens för gastemperaturen är en sugpyrometer. Den fungerar så att gasen sugas in med hög hastighet genom ett rör i vilket ett manteltermoelement av typ K finns monterat. Med denna metod dominerar den konvektiva värmeöverföringen mellan gas och termoelement och felet p.g.a. strålningsutbyten kan reduceras.

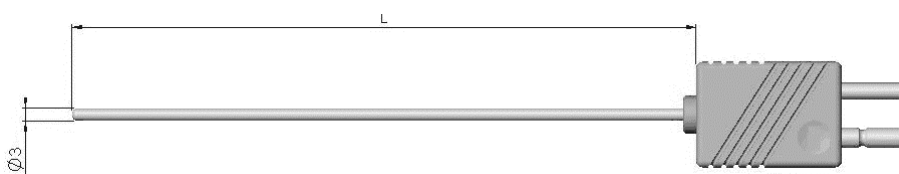
Den konstruktion av termoelement som främst var tänkt att användas vid mätningarna var ett manteltermoelement av typ N i ett yttre skyddsrör med kopplingshuvud, figur 1. Längden på det kapslade termoelementet var 0.7 m. Ytterdiametern på skyddsröret var 10 mm.

Skyddsröret är till för att avskärma termoelementet från strålningen till en viss del, men främst för att undvika grönröta och korrosion. I manteltermoelementet är trådarna isolerade av hårt packad magnesiumoxid mantlat i inconell.



Figur 1 Exempel på kapslat termoelement använt i studien
Figure 1 Capsule thermocouple used in the study

Vid mätningarna i Motala användes 1 meters mantlade termoelement med ingjuten kontakt (se figur 2). Även i Gärsd användes 1 meters mantlade termoelement av typen N för att erhålla en lämplig mätlängd hos de kapslade termoelementen vilka stack in ca 20 cm i pannan.



Figur 2 Mantlat termoelement typ-N levererat av Pentronic
Figure 2 Sheathed thermocouple type-N from Pentronic

3.2 Kalibrering av termoelement

De termoelement som har använts under detta projekt är tillverkade av Pentronic AB, Gunnebo och kalibrerade hos företagets ackrediterade laboratorium. För att se hur kalibreringen utfördes gjordes ett studiebesök på företaget.

Termoelementen kalibrerades vid 850° C eftersom den minimitemperatur som gasen ska hålla ligger vid denna temperatur. Detta gjordes i sfäriska ugnar med ett skal av keramer och värmeelement fästade på skalets insida. Termoelementen sticks in i rör som löper från ugnens yta till dess centrum. I dess centrum hänger en keramisk boll som rören är instuckna i. Bollen gör att termoelementens mätpunkter inte störs av strålning och konvektion. I ett av rören sticks ett termoelement in som är referensgivare med kända egenskaper. Efter kalibreringen kan Pentronic garantera en noggrannhet på $\pm 0.7^\circ \text{C}$, d.v.s. den temperatur termoelementet mäter garanteras ligga inom den felmarginalen.

3.3 Efterkontroll av termoelementen

Några termoelement efterkontrollerades på samma sätt som de kalibrerats. De mantlade termoelementen som vid mätningarna dessutom hade kapslar kontrollerades vid 850°C igen och dessa visade en mycket liten förändring jämfört med före proven.

Ett problem med termoelementen efter att ha kört ett antal timma i ugnen är att de blir sprödare och därför lätt går av. Detta gjorde att inte så många termoelement kunde efterkontrolleras.

4 Beräkningsmodeller

4.1 Förutsättningar

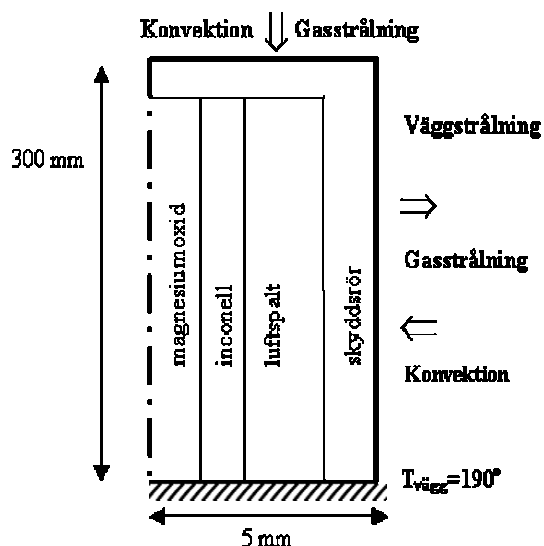
För att analysera och i största möjliga mån kunna beräkna termoelementets mätfel har några beräkningsmodeller tagits fram. En finit differens modell har implementerats i MatLab, en modell har tagits fram i FemLab och en analytisk modell har gjorts. Flera olika modeller har gjorts för att kunna påvisa att resultaten är korrekta. Det visade sig att temperaturen i mätpunkten bara skiljde sig några grader mellan de båda numeriska modellerna vid samma indata och randvillkor. I och med detta säkerställdes att modellerna är pålitliga. Därefter beslutades att FemLab-modellen skulle användas för fortsatta simuleringar.

4.2 FemLab modell

4.2.1 Modell över termoelementet

Vid första skedet av arbetet med beräkningsmodellen visade det sig att en 3-D modell av termoelementet inte var möjlig. Det berodde på att skikten i radiell led blev för tunna vid nätgenereringen och beräkningstiden för lång. Därför modellerades i stället ett 2-D rotationssymmetriskt snitt. Eftersom värmeflödet i princip är försumbart i tangentiell led så kan man acceptera en 2-D beskrivning.

Det kapslade termoelementet har modellerats enligt figur 3 och består av manteltermoelementet, luftspalt och yttre skyddsrör.



Figur 3 Icke skalenligt rotationssymmetriskt snitt av termoelementet

Figure 3 Cross section of the thermocouple, not in scale.

I fluidbäddpannan i Motala håller vattentuberna i pannväggen ett tryck på 13 bar. Vid denna trycknivå ligger ångbildningstemperaturen för vatten på ca 190° C. Man kan därför anta att vattnet håller sig några grader under denna temperatur. Randvillkoret för termoelementet vid väggen har därför satts lika med vattentemperaturen.

I symmetrisnittet gäller att värmeflödet q är lika med noll. Vid övriga ränder finns strålning till väggen och från gasen samt konvektion. Genom termoelementet respektive skyddsroret förekommer också ledning av värme till väggen.

4.2.2 Konvektion

Det konvektiva värmeutbytet mellan det kapslade termoelementet och gasen sker främst i form av påtvingad konvektion därför att den omkringliggande gasen är i rörelse. Detta innebär att en ganska stor värmemängd överförs till termoelementet. Konvektionen beror på flera parametrar. Det som främst påverkar dess storlek är gasens temperatur och hastighet.

Konvektionsvärmeflödet per ytenhet kan tecknas:

$$q_{konvektion} = h(T_{gas} - T_{termo})$$

Värmeövergångskoefficienten h är väldigt komplicerad att beräkna och/eller uppskatta eftersom den påverkas av flertalet variabler. Dessa variabler kan också variera utefter termoelementets yta och med tiden. En grovre approximation har ändå gjorts för att beräkna h -värdet. Beräkningarna är gjorda utifrån påtvingad konvektion vid anströmning av en cylinder. Om gashastigheten sätts till 1 m/s blir värmeövergångskoefficienten ca 50 W/m²K.

Det finns en stor osäkerhet i denna koefficient, eftersom den varierar med bl.a. gastemperaturen, gasflödet och gasens sammansättning. Dessa parametrar är ej konstanta i pannan. Med tanke på osäkerheten i beräkningarna och variationerna så kan h -värdet ligga inom ett förhållandevis stort intervall.

4.2.3 Väggstrålning

En av anledningarna till varför konventionella termoelement visar fel är att de vattenkylda väggarna har en ”kylande” effekt på termoelementet. Denna effekt beror på strålningsutbytet mellan termoelement och vägg.

Strålningen till väggen kan tecknas:

$$q_{väggstrålning} = \varepsilon_{termo} \sigma (T_{termo}^4 - T_{vägg}^4)$$

σ är Boltzmans konstant och har värdet $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}^4$.

ε_{termo} är termoelementets emissivitet. Denna parameter kan variera mellan 0 och 1 beroende på hur mycket av strålningen som kroppen absorberar. En helt svart kropp absorberar all strålning när den träffas och har således emissiviteten 1. Det kapslade termoelementet är i oanvänt skick blankt och har därmed ett lågt emissionstal. Men när det sticks in i ugnen blir det snabbt igensotat och absorberar en ganska stor del av

strålningen. Emissiviteten uppskattas till någonstans mellan 0.8 och 0.9 vilket är de värden som används i simuleringarna.

4.2.4 Gasstrålning

Det är ett mycket komplext problem att ta reda på hur stort värmeutbytet p.g.a. strålning från gas till termoelement är. Det beror på att gasers absorption varierar oregelbundet med våglängden till skillnad mot fasta material. Men för att approximativt ta fram storleken på strålningen finns ett uttryck som bygger på ett förenklat och något tillrättlat förhållande.

Den använda analytiska ekvationen för gasstrålningen mellan en gas och en grå kropp tecknas enligt följande.

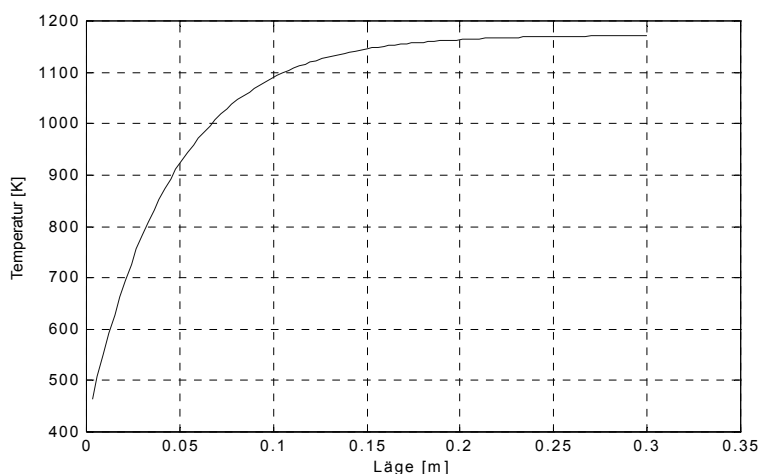
$$q_{\text{gasstrålning}} = \frac{1 + \varepsilon_{\text{termo}}}{2} \cdot \sigma (\varepsilon_{\text{gas}} T_{\text{gas}}^4 - \alpha_{\text{gas}} T_{\text{termo}}^4)$$

Värdena på gasens emissivitet ε_{gas} och absorptionen α_{gas} beror bland annat på gasens sammansättning, trycket, temperaturen och sträckan som strålningen ska färdas genom gasen. Variablerna fås fram ur empiriskt framtagna kurvor. Men dessa parametrar är så gott som omöjliga att beräkna i den mätmiljö som finns i pannan. Därför har ytterligare en approximation gjorts av gasstrålningen.

$$q_{\text{gasstrålning}} = \varepsilon_{\text{tot}} \sigma (T_{\text{gas}}^4 - T_{\text{termo}}^4)$$

Där ε_{tot} uppskattats till 0.5 i första skedet, men detta värde bör tas fram genom mätningar.

P.g.a. den vattenkylda väggen och den varma gasen så kommer gasens temperatur närmast väggen vara kallare än den är mitt i pannan. Figur 4 visar en modell över hur gränsskiktet kan se ut. Denna modell har använts i beräkningarna för att beskriva hur gastemperaturen varierar med läget närmast väggen. Gasens temperatur utanför gränsskiktet har satts till 900°C (1173 K).



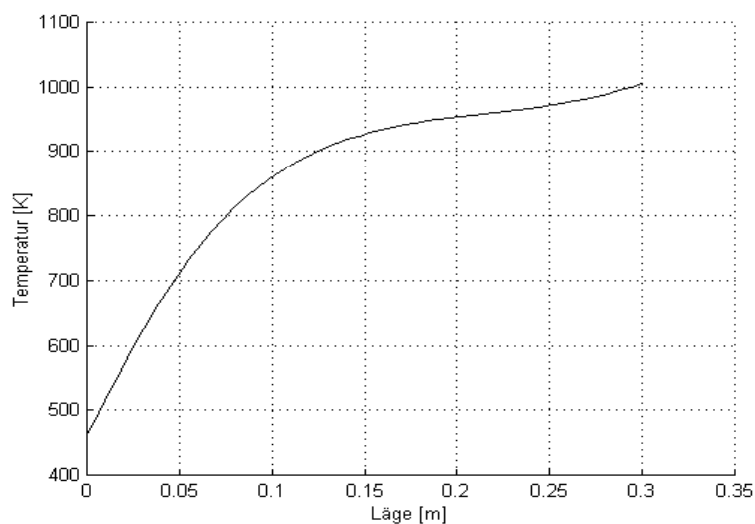
Figur 4 Temperaturgränsskikt som användes vid utvecklingen av modellen

Figure 4 Thermal boundary layer model used in the development of the model

4.2.5 Resultat

Geometrin har byggts upp i FemLab och data för de ingående materialen har lagts in. Randvillkoren har satts såsom det beskrivits i figur 3. En nätgenerering av modellen har gjorts och lösningen itereras fram.

Figur 5 visar hur temperaturen varierar längs termoelementet. Temperaturen i mätpunkten är 730°C (1003 K), ϵ_{tot} är satt till 0.5, h -värdet är $40\text{ W/m}^2\text{K}$ och ϵ_{termo} är 0.8. Gastemperaturen är 900°C .



Figur 5 Beräknad temperaturfördelning i termoelementet

Figure 5. Calculated temperature gradient in the thermocouple

Eftersom de parametrar som styr värmeflödet till och från termoelementet är mycket svårberäknade har simuleringar gjorts där dessa har varierats inom rimliga intervall. Simuleringarna redovisas i tabell 1.

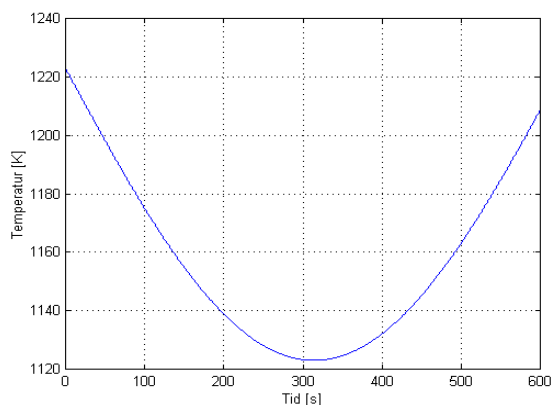
h (W/mK)	ϵ_{tot}	ϵ_{termo}	Uppmätt temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Mätfel ($^{\circ}\text{C}$)
40	0.5	0.8	730	170
40	0.5	0.9	720	180
40	0.7	0.8	764	136
100	0.5	0.8	765	135
100	0.7	0.8	785	115
100	0.8	0.8	794	106

Tabell 1 Tabell över temperatur simuleringar

Table 1 Table over temperature simulation results

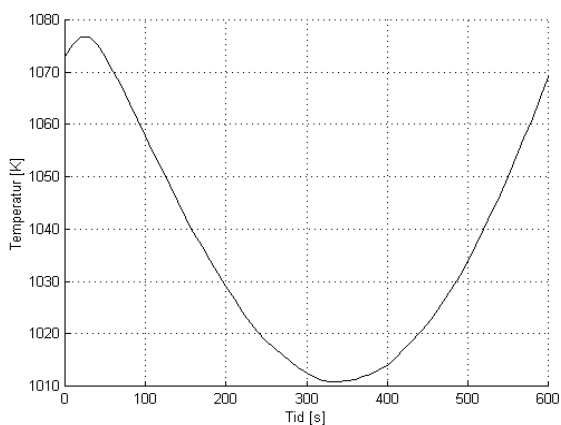
Simuleringarna visar att mätfel varierar från 106°C till 180°C beroende på hur de styrande parametrarna sätts.

Figureerna 6 och 7 beskriver det kapslade termoelementets tröghet vid en varierande gastemperatur. Gastemperaturen varierar sinusformat mellan 850°C och 950°C under 10 min. Som man kan se så har termoelementet en fördröjning på ca 20 s gentemot gasens temperatur. Det går även utläsa att mätfel varierar beroende på gastemperatur. En hög temperatur på gasen ger ett större mätfel än en låg temperatur.



Figur 6 Gastemperatur vid simulering (vänster)

Figure 6. Gas temperature at simulation (left)



Figur 7 Simulerad temperatur i termoelementet

Figure 7. Simulated thermocouple temperature

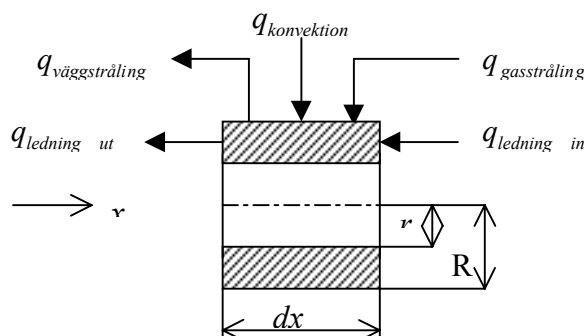
4.3 Analytiskmodell

4.3.1 Modellbeskrivning

En analytisk lösning har tagits fram som komplement till FemLab-modellen. För att förenkla beräkningen har endast värmeflödet i termoelements skyddsrör tagits med och problemet betraktas som endimensionellt. Det kan vara tillräckligt eftersom det största värmeflödet är i skyddsröret och enligt modellen i FemLab skiljer sig mätpunktens temperatur bara någon grad från skyddsrörets temperatur vid den fria änden.

Värmeflödet hos ett infinitesimalt element av skyddsröret blir som i figur 10.

En jämvikt för värmeflödena ger:



Figur 8 Modell av värmeflöden i ett infinitesimalt element av termoelementet

Figure 8 Model of heat flux in an infinitesimal element of the thermocouple

$$-q_{\text{ledning_in}} + q_{\text{gasstrålning}} + q_{\text{konvektion}} = -q_{\text{ledning_ut}} + q_{\text{väggstrålning}}$$

Värmeflödena kan tecknas:

$$q_{\text{ledning_in}} = -k \cdot \pi(R^2 - r^2) \cdot \frac{dT_{\text{termo}}}{dx}$$

$$q_{\text{ledning_ut}} = -k \cdot \pi(R^2 - r^2) \cdot \left(\frac{dT_{\text{termo}}}{dx} + \frac{d^2T_{\text{termo}}}{dx^2} dx \right)$$

$$q_{\text{konvektion}} = h \cdot 2\pi R dx \cdot (T_{\text{gas}} - T_{\text{termo}})$$

$$q_{\text{gasstrålning}} = \varepsilon_{\text{tot}} \sigma \cdot 2\pi R dx \cdot (T_{\text{gas}}^4 - T_{\text{termo}}^4)$$

$$q_{\text{väggstrålning}} = \varepsilon_{\text{termo}} \sigma \cdot 2\pi R dx \cdot (T_{\text{termo}}^4 - T_{\text{vägg}}^4)$$

Dessa värmeflöden sätts in i jämviktsekvationen och randvillkoren sätts på samma sätt som i FemLab-modellen vid väggen och den fria änden. En differentialekvation erhålls som löses numeriskt genom att derivatorna ersätts med differenser och ekvationen diskretiseras.

För 5 punkter blir det ekvationssystem som skall lösas (Tvägg första punkt, T4 ändpunkt, A-H konstanter, s steglängd.) Den enda konstant som beror indirekt av längden är H där $T_{gas}(L)$ ingår. Men T_{gas} är ju konstant utanför gränsskiktet.

$$s^2 AT_1^4 + (s^2 B - 2)T_1 + T_2 = s^2 [C(T_{gas})_1^4 + D(T_{gas})_1 + E] - T_{vägg}$$

$$T_1 + s^2 AT_2^4 + (s^2 B - 2)T_2 + T_3 = s^2 [C(T_{gas})_2^4 + D(T_{gas})_2 + E]$$

$$T_2 + s^2 AT_3^4 + (s^2 B - 2)T_3 + T_4 = s^2 [C(T_{gas})_3^4 + D(T_{gas})_3 + E]$$

$$2T_3 + (s^2 A + 2sF)T_4^4 + (s^2 B - 2 + 2sG)T_4 = s^2 [C(T_{gas})_4^4 + D(T_{gas})_4 + E] - 2sH$$

Om instickslängden ska ändras i beräkningen kan man byta värde på L som är i början av Matlabfilen under konstanter.

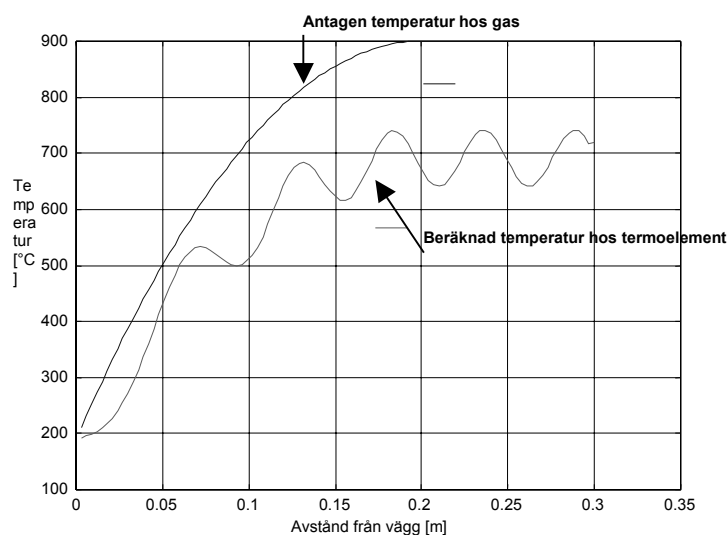
Startvärdet för itereringen av temperaturen är satt till 100° under den antagna gastemperaturen.

Ekvationssystemet löstes med Newton-Raphsons metod. En utförligare beskrivning av dessa steg och MatLab-koder finns i bilaga A.

Prov gjordes även med att temperaturen varierade linjärt och att den var konstant vid starten. Alla tre varianterna gav liknande resultat. Det första alternativet valdes eftersom det hade minst kod och var mest likt slutresultatet.

4.3.2 Resultat

En simulering har gjorts där ε_{tot} är satt till 0.5, $\varepsilon_{\text{termo}}$ till 0.8 och h till 40. Resultatet redovisas i figur 9.



Figur 9 Temperaturfördelning i termoelement

Figure 9 Temperatur gradients in thermocouple

Temperaturen i mätpunkten är 719°C vilket kan jämföras med motsvarande simulering av FemLab-modellen vilket gav en mättemperatur på 730°C.

Ytterligare jämförelser ger att denna modell kommer visa på en temperatur som ligger 10-20 °C lägre än FemLab-modellen. Detta beror givetvis på att den analytiska modellen är endimensionell och att andra förenklingar har gjorts. Svängningarna i resultatet är en troligtvis en instabilitet i beräkningsmodellen.

5 Motala

5.1 Anläggningsbeskrivning

Anläggningen i Motala ägs av Motala Energi vilket är ett dotterbolag till Vattenfall och drift och underhållsarbete av pannan sköts av Vattenfall.

Pannan är en bubblande fluidbädd från Kvaerner Pulping med en effekt på 20 MW. Fluidbädden består av en blandning av sand, aska och några procent bränsle. Den har en relativt låg förbränningstemperatur vilken ligger på ca 850° C vilket ger låga emissioner. Pannan är bränsleflexibel och hanterar bl.a. fin och grov flis samt bark och GROT. Anläggningen har rökgaskondensering som ger ytterligare 7 MW.

Driftdata för vattensidan i pannan är 25 kg/s hetvatten vid 11,5 bar (185°C).

Till anläggningen hör också en oljeeldad panna på 20 MW av konventionell konstruktion som används under extrema toppbelastningar. Denna kördes inte alls under försökens gång.

För att optimera driften och jämna ut variationer i lasten har anläggningen en värmeackumulator som är 50 m hög med en volym på 3000m³.



Figur 10 Motala fjärrvärmeanläggning

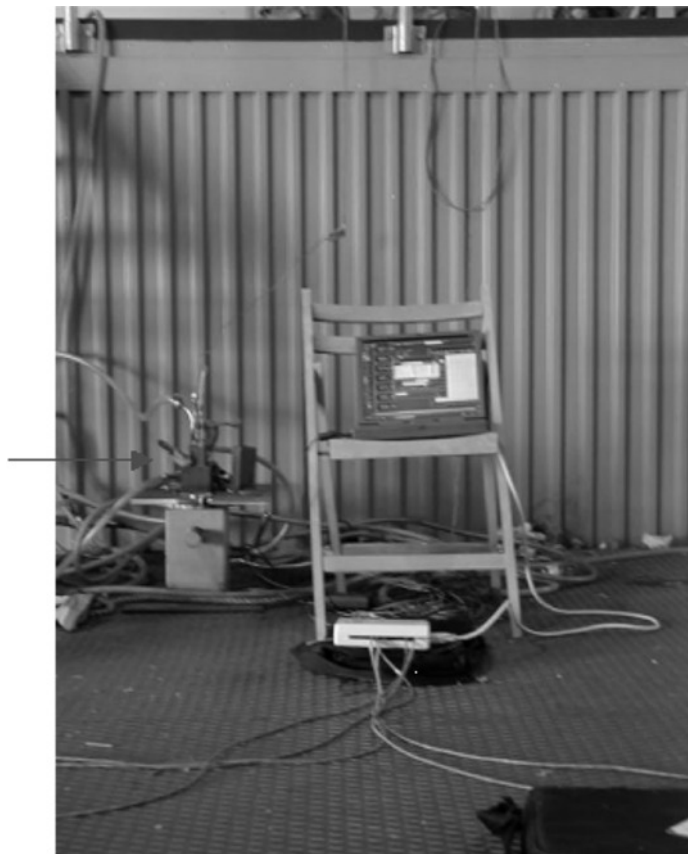
Figure 10 Motala district heating plant

5.2 Mätuppställning

Vid temperaturmätningarna användes en 4 m lång sugpyrometer och termoelement av olika slag. Från början var det meningen att 0.7 m kapslade manteltermoelement av typ N skulle användas. Men det visade sig att de bara nådde 5 cm innanför pannväggen. Därför införskaffades även 1 meters mantlade termoelement av typerna N och K. Dessa gick in 35 cm in i pannan.

Sugpyrometern och termoelementen kopplades till en logger som samlade in mätdata. En dator kopplades till loggern där mätresultaten kunde visualiseras och analyseras i programmet DasyLab. I DasyLab finns en automatisk kompensation för det kalla lödstället.

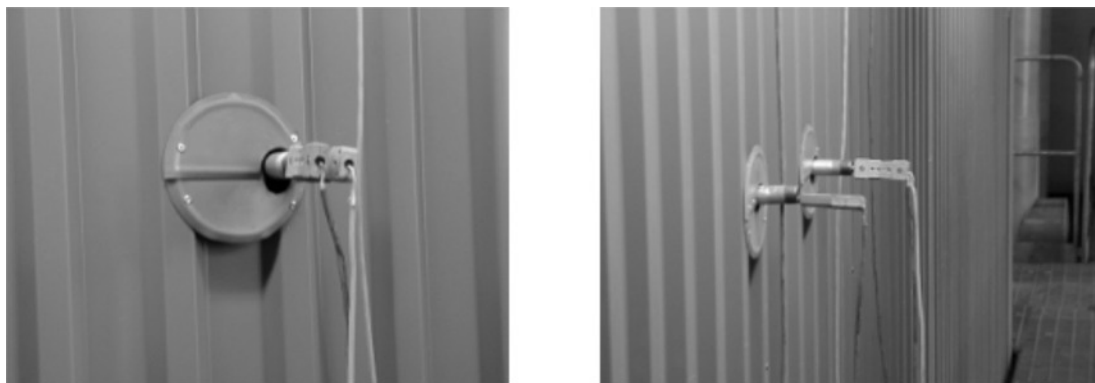
Endast ett hål fanns att tillgå för sugpyrometern vilket var placerat på panntaket. I detta hål rymdes även ett termoelement, se pilen i figur 11.



Figur 11 Instrumentering under försöken i Motala

Figure 11 Instrumentation during measurements in Motala

Hål för övriga termoelement fanns att tillgå på en nivå 3.8 meter från taket, två stycken på framsidan av pannan och två på baksidan, figur 12. Hålen var i form av ett rör med en diameter på 1 cm och en längd på 65 cm. I ett sådant rör kunde 2 mantlade termoelement få plats.



Figur 12 Vänster bild Termoelement i mäthål typ-K till vänster och typ-N till höger i samma hål för jämförande mätning.
Höger bild typ-K till vänster och typ-N till höger.

Figure 12. Left figure: Thermocouples in measuring positions one type-K thermocouple to the left and one type-N thermocouple to the right in the same hole.
Right figure: Thermocouple to the left is type-K and to the right type-N.

5.3 Mätförfarande

Mätningarna gjordes med en samplingstid på 30 sekunder där mätvärdena medelvärdesbildades och temperaturen i aktuell mätpunkt mättes i minst 30 minuter. Jämförande mätningar mellan termoelement och sugpyrometer kunde endast göras från taket. Dessa mätningar genomfördes på olika positioner mellan pannväggen och 85 cm ner i pannan, längre ner räckte ej termoelementet.

En mätning gjordes i ca 2 tim med enbart sugpyrometern 3.10 m ner i pannan, denna mätning gjordes för att försöka få en bild av temperaturen på ungefär samma nivå som de mantlade termoelementen. Sugpyrometern är totalt 4 m.

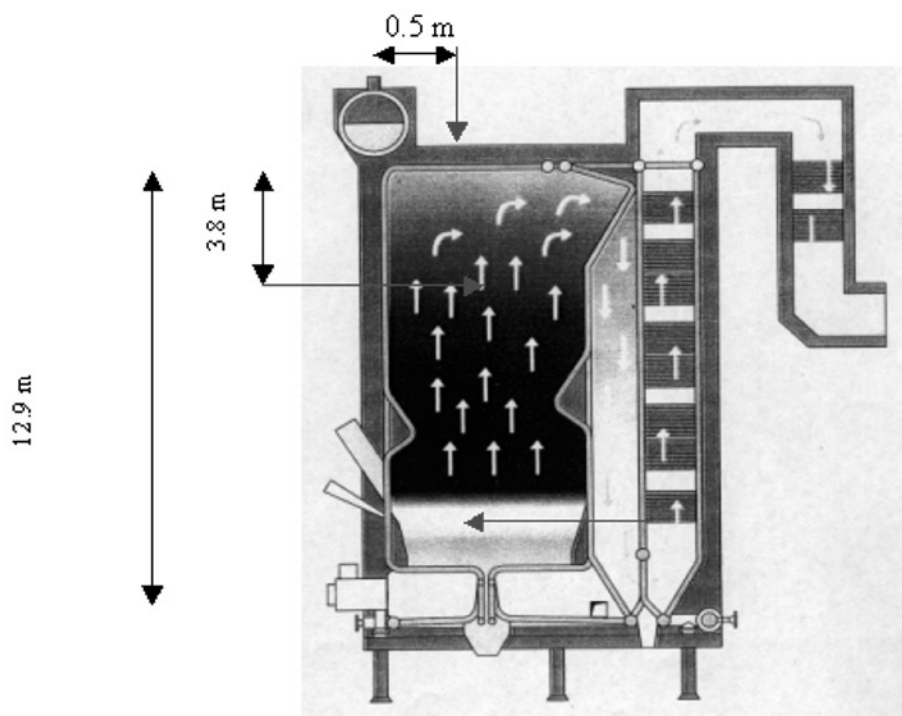
På pannans framsida och baksida gjordes mätningar med de kapslade termoelementen och med de längre mantlade elementen. Här kunde ej sugpyrometern användas eftersom hålen var alldeles för små och därmed fanns ingen referenstemperatur att tillgå.

För att ta reda på gränsskiktets tjocklek och utseende användes två st. 1 m termoelement i samma hål. Ett termoelement placerades fullt in i pannan och det andra flyttades successivt ut med en halvtimmes mellanrum. Därmed kunde gränsskiktets utseende fås fram på ett enkelt sätt.

Mätningarna pågick sammanlagt under ca 1 veckas tid för att temperaturvariationerna under en längre tid skulle kunna analyseras. Under mätperioden kördes pannan med en last som varierade mellan 9 och 12 MW. Det är ungefär 50 % av maxlasten som ligger på 20 MW.

Driftdata såsom effekt, syrehalt, koldioxidhalt etc. kontrollerades kontinuerligt för att se hur mätresultaten påverkades av transienter som orsakas av variationer i bränslet som t.ex. fuktighet. Figur 14 nedan visar också den sida som hänvisas som höger sida i rapporten, de röda pilarna anger ungefärliga mätpunkter som användes på sidorna och på taket. Vänstra sidan av pannan hade mätpunkter på motsvarande lägen som högra sidan.

Observera att i denna rapport räknas höger sida som den sida som har bränsleinmatningen till vänster och skorstenen till höger. Detta är den vokabulär driftpersonalen vid anläggningen använder.



Figur 13 BFB-pannan i Motala sedd från höger.

Figure 13 The BFB boiler in Motala drawn from the right side

5.4 Mätresultat

5.4.1 Temperaturgränsskikt

Ett temperaturgränsskikt kräver att temperaturgradienter finns i gasen. I en panna finns sådana gränsskikt främst vid väggarna, men kalla och varma stråk kan även finnas på andra ställen i pannan. Temperaturgradienterna intill väggarna beror bland annat på värmeutbytet mellan gasen och de vattenkylda väggarna.

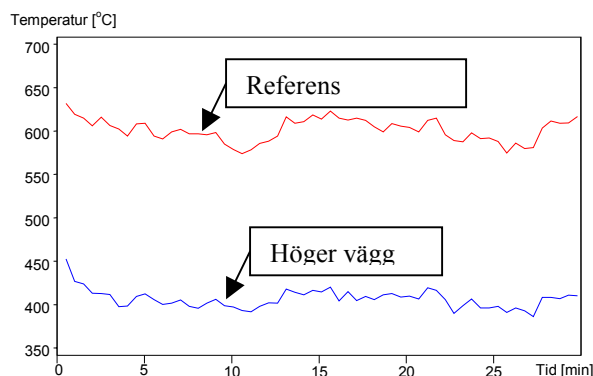
Vid temperaturmätningar är gränsskiktet av stort intresse så man vet om man mäter inuti eller utanför gränsskiktet. Enligt EU:s direktiv ska temperaturmätningen ske nära pannväggen eller vid en representativ punkt.

I fluidbäddpannan har gränsskiktsmätningar gjorts i den högra och vänstra delen av pannan på den nivå som beskrivs i figur 13.

Studien av gränsskiktet har gjorts på tre olika ställen för att se om skiktets tjocklek och utseende varierar i pannan. Som referens har ett termoelement i samma punkt använts.

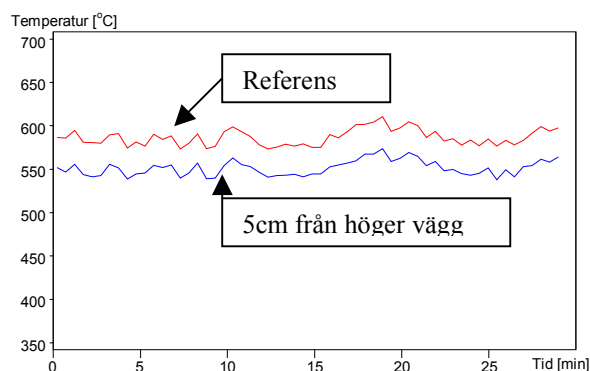
5.4.2 Högra sidan av pannan

Figureorna 14-18 visar temperaturen på olika positioner från väggen vid pannans högra sida, som referens finns temperaturen 35 cm in i pannan, d.v.s. så långt in som termoelementet når. Alla dessa mätningar har gjorts vid samma lastfall vilket innebär att den uppmätta temperaturen inne i pannan ligger på ungefär samma nivå hela tiden (ca 600 °C).



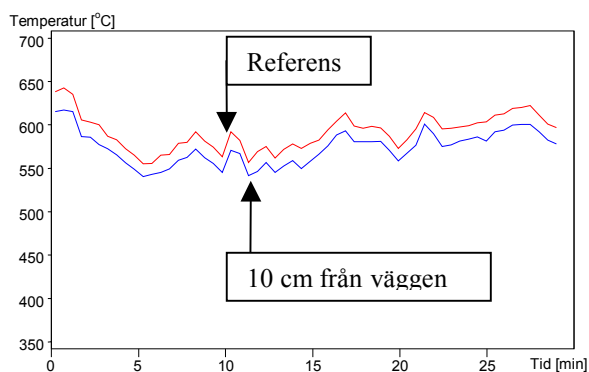
Figur 14 Temperatur höger vägg (blå), referens (röd)

Figure 14 Temperature at the right wall (blue), reference (red)

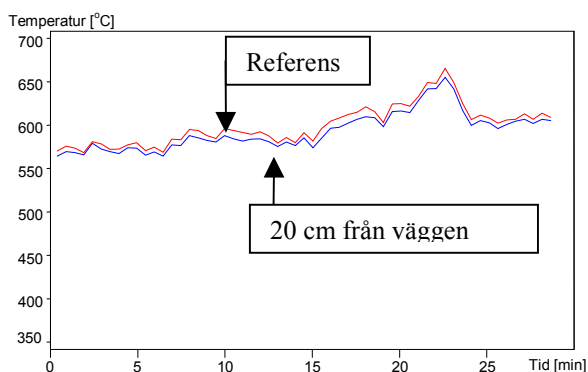


Figur 15 Temperatur 5 cm från den högra väggen (blå), referens (röd)

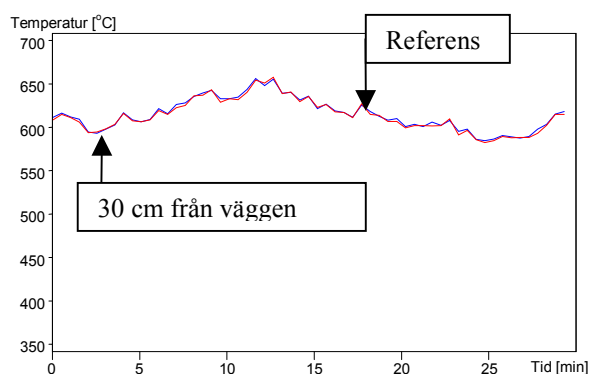
Figure 15 Temperature 5 cm from the right wall (blue), reference (red)



Figur 16



Figur 17



Figur 18

Figur 16 Temperatur 10 cm från den högra väggen (blå), referens (röd)

Figure 16 Temperature 10 cm from the right wall (blue), reference (red)

Figur 17 Temperatur 20 cm från den högra väggen (blå), referens (röd)

Figure 17 Temperature 20 cm from the right wall (blue), reference (red)

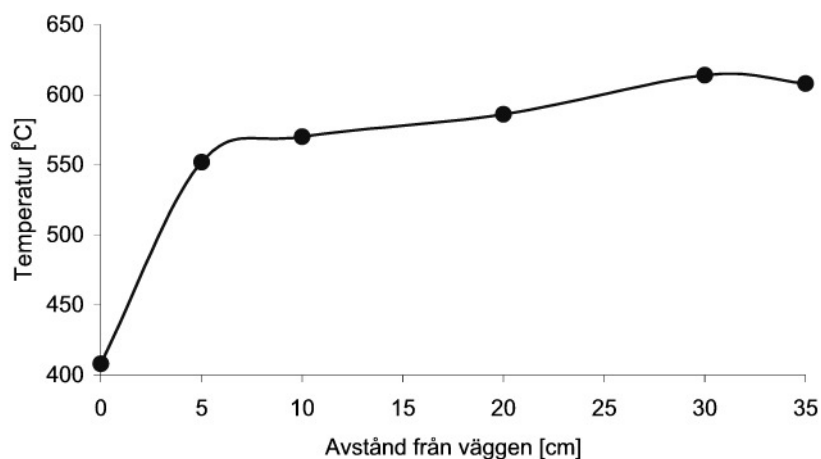
Figur 18 Temperatur 30 cm från den högra väggen (blå), referens (röd)

Figure 18 Temperature 30 cm from the right wall (blue), reference (red)

Man bör inte lägga allt för stor vikt vid de absoluta temperaturerna som uppmätts eftersom det inte är gasens verkliga temperatur, utan den temperatur som termoelementet har mätt upp. Istället bör differensen mellan temperaturen vid aktuell position och referenstemperaturen studeras. Som man kan se följer dessa

temperaturkurvor varandra när tiden ändras och temperaturdifferensen är så gott som konstant.

Den uppmätta temperaturen har plottats som funktion av avståndet från pannväggen, detta illustreras i figur 19.



Figur 19 Temperatur profil med gränsskikt på pannans högra sida.

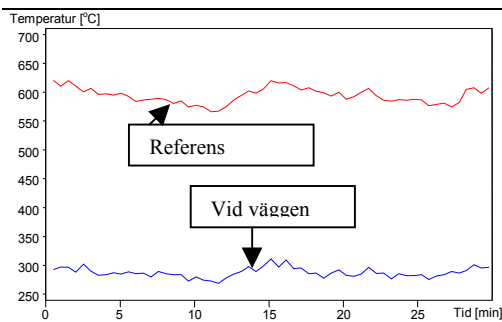
Figure 19 Temperature profile with thermal boundary layer on the right side of the boiler.

Man kan utläsa att temperaturgradienten är störst precis intill väggen för att sedan minska ju längre ut från väggen man kommer. Figur 19 visar också att gränsskiktets tjocklek i den aktuella mätpunkten är någonstans mellan 20 och 30 cm. Men utseendet av detta gränsskikt gäller bara under de omständigheter som gällde under denna mätserie. Vid ett annat driftfall kan mycket väl gränsskiktet se annorlunda ut.

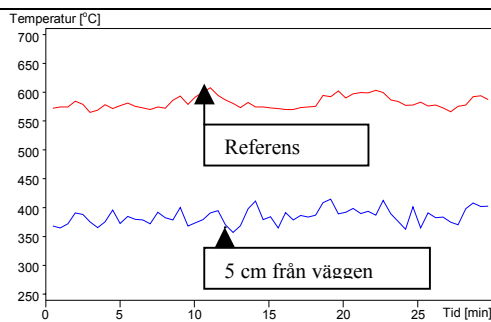
Gränsskiktets tjocklek och utseende påverkas även av gasens sammansättning. Fukthalten hos gasen har en inverkan på gränsskiktet eftersom den påverkar gasens viskositet och därmed utseendet på gränsskiktet. En ökande viskositet ger ett tjockare gränsskikt om hastighet och densitet är konstant.

5.4.2.1 Vänster sida av pannan

Figur 20-24 visar temperaturen på olika positioner från väggen vid pannans vänstra sida, som referens finns temperaturen 35 cm in i pannan, d.v.s. så långt in som termoelementet når. Mätningarna har tidsmässigt gjorts parallellt med de på högra sidan av pannan.



Figur 20



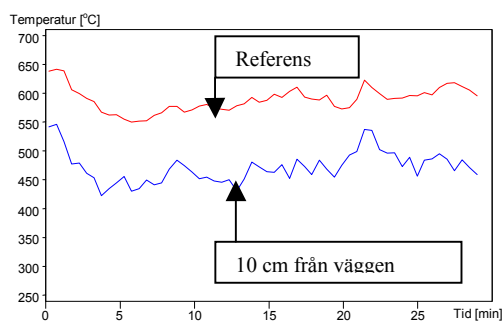
Figur

Figur 20 Väggtemperatur vänster sida (Blå) referens (Röd)

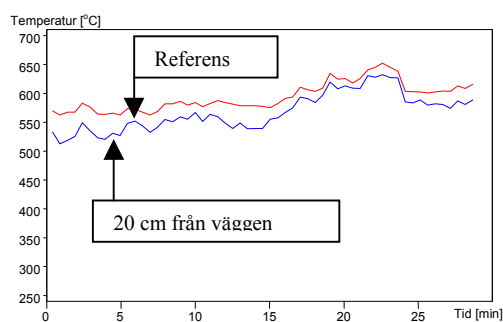
Figure 20 Wall temperature, left side (blue), reference (red)

Figur 21 Temperatur 5 cm från väggen på vänster sida (Blå), referens (Röd)

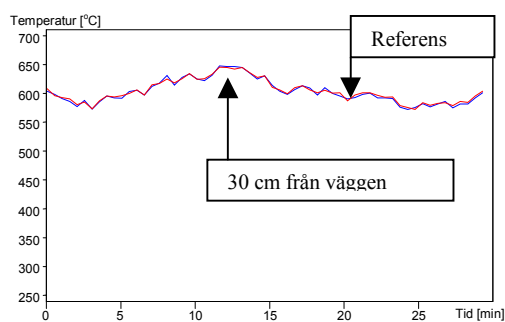
Figure 21 Temperature 5 cm from the wall, left side (blue), reference (red)



Figur 22



Figur 23



Figur 24

Figur 22 Temperatur 10 cm från väggen på vänster sida (Blå), referens (Röd)

Figure 22 Temperature 10 cm from the wall, left side (blue), reference (red)

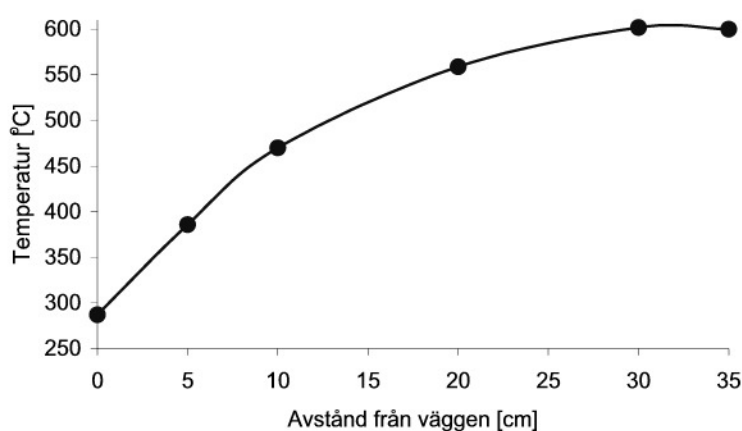
Figur 23 Temperatur 20 cm från väggen på vänster sida (Blå), Referens (Röd)

Figure 23 Temperature 20 cm from the wall left side (blue), reference (red)

Figur 24 Temperatur 30 cm från väggen på vänster sida (Blå) referens (Röd)

Figure 24 Temperature 30 cm from the wall left side (blue), reference (red)

Även här följer temperaturkurvorna varandra med en så gott som konstant skillnad sinsemellan. Skillnaden mot högra sidan av pannan är att temperaturgradienten vid denna mätpunkt är något lägre intill väggen och att gränsskiktet sträcker sig längre vilket åskådliggörs i figur 25. Detta fenomen kan inte förklaras på något enkelt sätt då sista luftintag är under denna nivå och symetriskt placerade på båda sidorna av pannan.

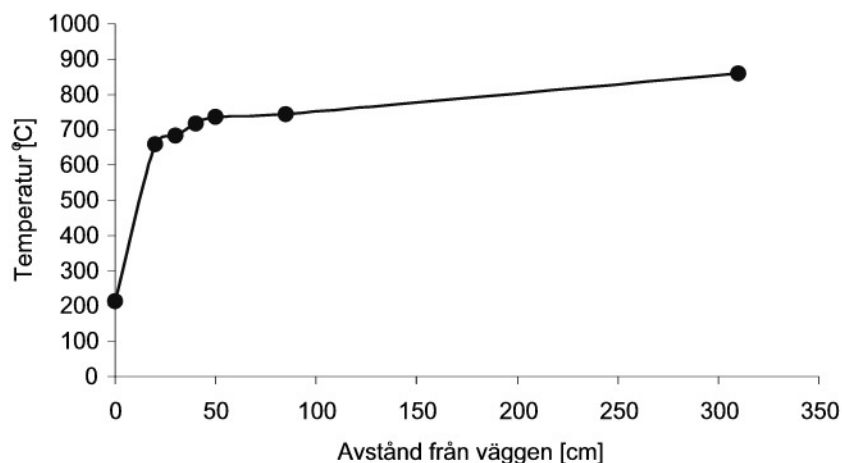


Figur 25 Temperaturprofil med gränsskikt på pannans vänstra sida uttryckt i skillnaden mellan den mätta temperaturen och referenstemperaturen

Figure 25 Temperature profile with thermal boundary layer on the left side of the boiler as difference between measured reference and measured temperature

5.4.2.2 Pannans tak

Temperaturen på olika positioner har mätts med sugpyrometern för att ta reda på hur gränsskiktet ser ut vid taket. Mätningarna har gjorts i minst en halvtimme på varje position och ett medelvärde av mätvärdena har räknats ut. Resultatet redovisas i figur 26. En viss osäkerhet ligger i mätvärdena närmast taket, orsakad av det luftdrag från hålet som uppstår på grund av undertryck i pannan. Hålet kunde inte tätas tillräckligt bra och detta medförde att sugpyrometern sög in kall luft och mätte fel.



Figur 26 Temperaturprofil med gränsskikt vid taket uppmätt med sugpyrometer

Figure 26 Temperature profile with thermal boundary layer at the ceiling measured with suction pyrometer

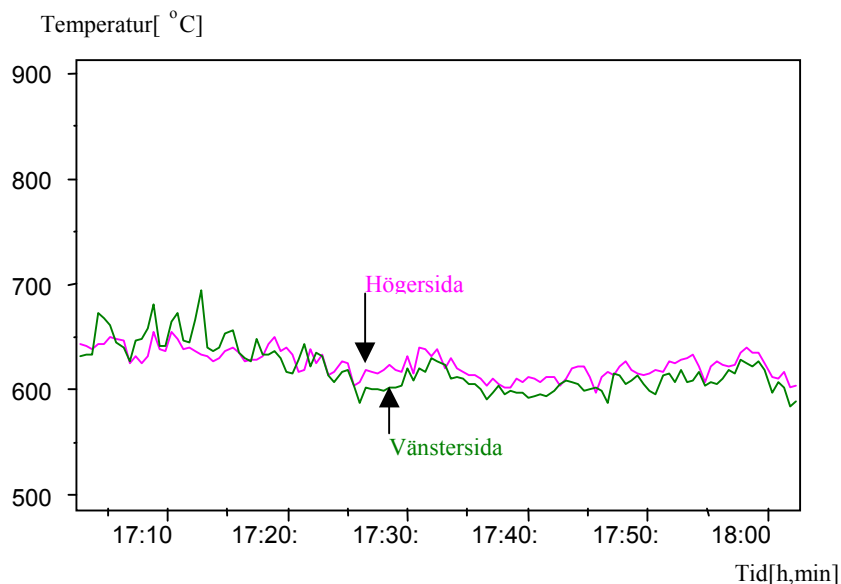
Gränsskiktet är tjockare här än det är på sidorna men det beror inte så mycket på vattenkylningen i taket. Den främsta anledningen kan vara att gasens temperatur minskar ju längre upp i pannan den rör sig.

5.4.3 Jämförelse mellan olika mätpunkter

För att kunna fastställa hur temperaturen varierar vid olika mätpunkter i pannan har jämförelser mellan höger och vänster sida gjorts, denna mätserie gjordes under ett intervall på ca 18 timmar. Mäthålen som har jämförts ligger på samma nivå och mitt emot varandra, samt samma nivå och 0.7 m ifrån varandra. Termoelementen var av typen N och instuckna 35 cm i pannan.

Två mätserier gjordes och resultatet visar att det inte går att säga att just en sida håller högre eller lägre temperatur än den andra. Den första mätserien gav att vänstra sidan genomsnittligt sett höll högre temperatur. Medelvärde av mätseriens temperatur beräknades för de ca 18 timmar som mätningen pågick och detta gav för högra sidan 654°C medan vänstra sidan hamnade på 673°C. Natten efter gjordes samma mätning och denna visade att högra sidan hade en högre medeltemperatur, 607°C mot vänstersidans 600°C.

Figur 27 nedan visar en sekvens där högra sidan vid en viss tidpunkt har en högre temperatur än vänstra sidan, vid en senare tidpunkt var det tvärtom, lasten låg på ca 12 MW i denna mätserie.

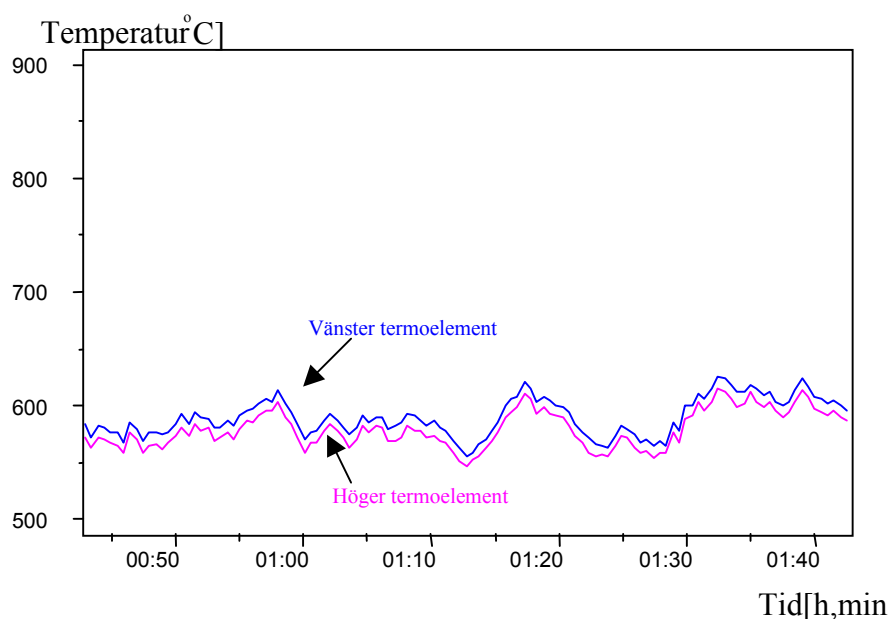


Figur 27 Skillnad i temperatur vid väggens höger respektive vänstersida vid 12 MW

Figure 27 Temperature difference between right and left side at 12 MW

Det som kan sägas om de termoelement som satt bredvid varandra är att det vänstra höll konstant en högre temperatur. Beräkning av medelvärdet av de båda mätserierna gav att det vänstra termoelementet var ca 15°C högre i de båda mätserierna.

Figur 28 visar temperaturskillnaden mellan två termoelement som ligger på högra sidan av pannan och på samma nivå men med ett avstånd av 0.7 m ifrån varandra.



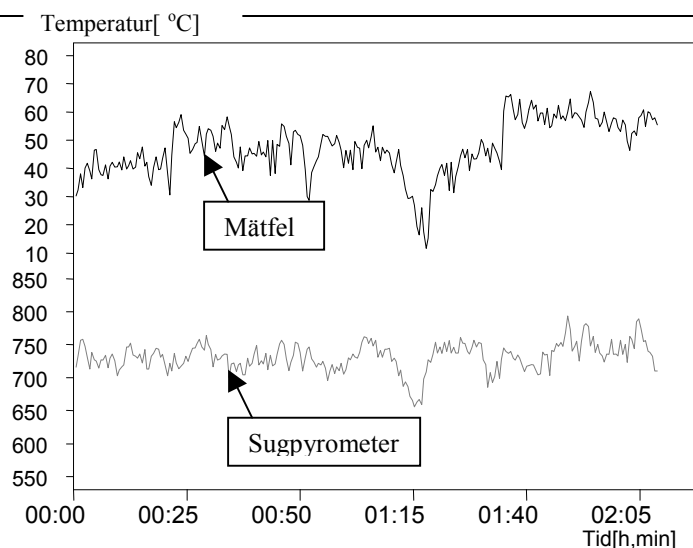
Figur 28 Temperaturskillnad mellan två termoelement på höger sida 0,7 m ifrån varandra

Figure 28 Temperature difference between two thermocouples on right side of the boiler with a distance of 0,7 m

5.4.4 Jämförelse med sugpyrometer och termoelement

Man kan anta att en sugpyrometer i princip visar gasens temperatur. För att undersöka hur stort mätfel man får har jämförelse mellan sugpyrometer och manteltermoelement av typ N gjorts i pannan. På grund av för små hål för sugpyrometern i sidorna på pannans vägg var enda möjligheten att göra denna jämförelse från pannans tak. Mätserierna genomfördes under drygt 2 timmar respektive 40 min och skedde 85 samt 40 cm ner i pannan från taket.

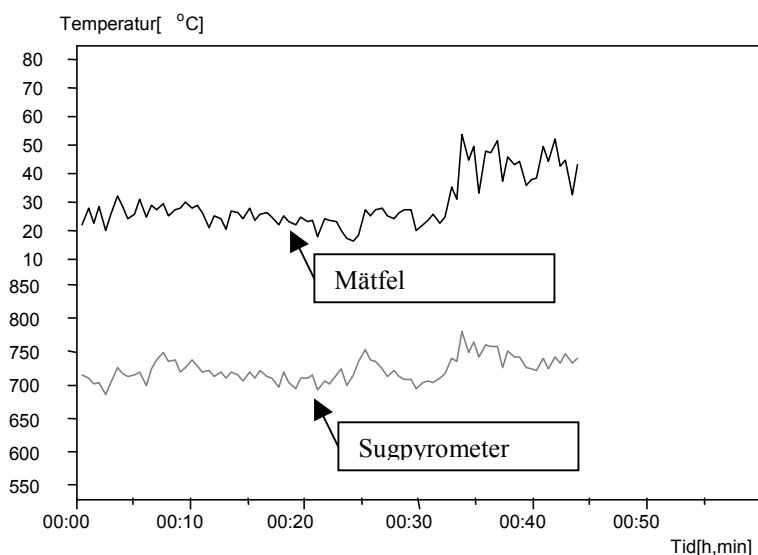
Resultatet av denna mätning framgår i figur 29, som visar differensen mellan sugpyrometern och termoelementet samt den uppmätta temperaturen av sugpyrometern. Man kan se i plotten att mätfelet varierar ganska kraftigt från ca 15°C till uppemot 70°C och det är i princip oberoende av temperaturen. Lasten under mätseriens gång låg konstant på 9 MW.



Figur 29 Mätfelet samt den uppmätta temperaturen med sugpyrometer mätt i panntaket

Figure 29 Measurement error and the measured temperature with suction pyrometer

En mätserie gjordes också 40 cm ner i pannan och denna visade att mätfelet varierade även då, men som grafen nedan visar så varierar det uppmätta felet inte lika kraftigt. Mätfelet i genomsnitt som uppmättes var inte heller lika stort som i fallet ovan vilket kan skådas i figur 30. Lasten låg konstant på 9.4 MW under mätseriens gång.



Figur 30 Mätfelet samt den med sugpyrometer uppmätta temperaturen 40 cm ner i pannan

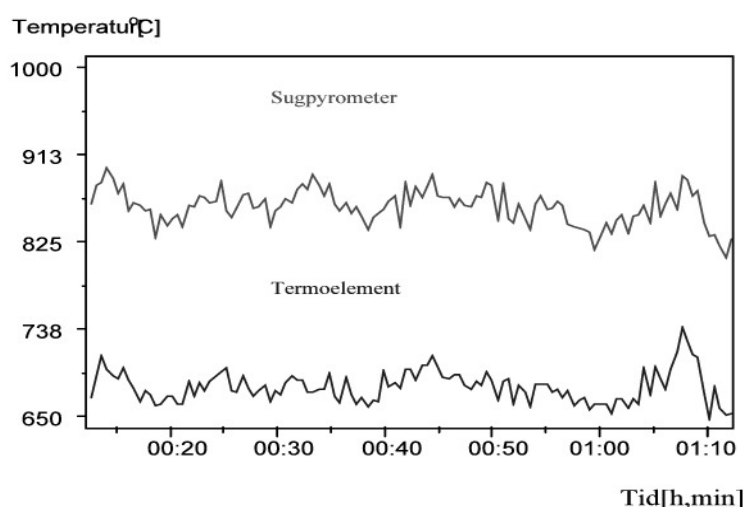
Figure 30 Measurement error and the temperature measured with suction pyrometer

Mätserier närmare panntaket har också genomförts men där gick det inte att erhålla ett acceptabelt mätresultat eftersom luftdrag från hålet som uppstår p.g.a. undertryck i

pannan inte har kunnat förhindras tillräckligt bra. Detta medförde att sugpyrometern sög in kall luft från detta hål, vilket gjorde att den mätte en för låg temperatur.

För att kunna få en uppskattning av temperaturen vid termoelementens mätpunkt stoppades sugpyrometern ned så långt som möjligt i pannan. Denna nådde ner ca 3.1 m i pannan vilket innebar att den mätte ca 0.7 m över de mätpunkter som termoelementen satt på samt 2 m längre in i pannan.

Den här mätningen skall inte ses som en riktpunkt för termoelementen utan endast en inblick i hur stor temperaturen är vid dessa termoelement. Figur 31 nedan ger temperaturen för sugpyrometern samt det termoelement som låg närmast d.v.s. termoelementet till vänster på högra sidan av pannan. Man kan se att skillnaden är ca 180°C mellan sugpyrometern och termoelementet.



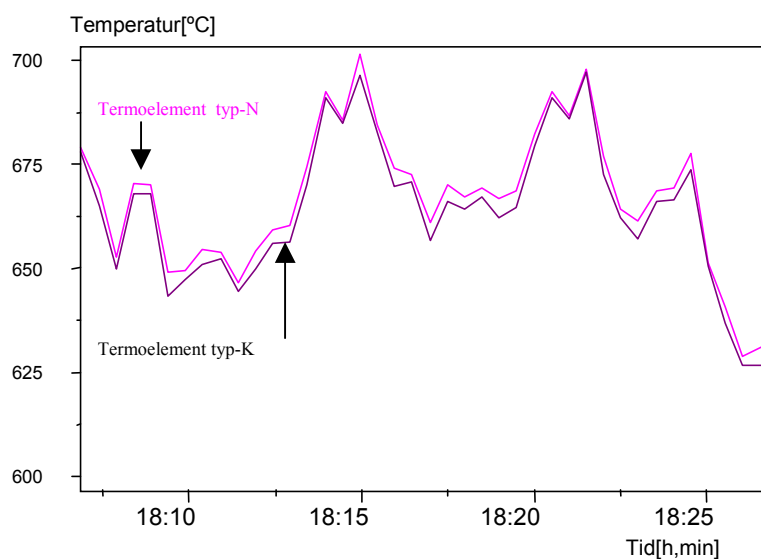
Figur 31 Temperatur uppmätt med sugpyrometer och termoelement

Figure 31 Temperature measured with suction pyrometer and thermocouple

5.4.5 Jämförelse mellan typ N och typ K

Vid mätningarna har en jämförelse gjorts mellan de olika typerna av termoelement som har använts vid mätningarna. Resultatet visar att termoelementet av typ N alltid ligger över eller lika med typ K. Detta har framkommit efter en natts mätningar i pannan i Motala och ett genomsnitt av mätserien visar på detta. Mätningarna genomfördes med termoelementen i samma hål, instuckna 35 cm i pannan. Vid beräkningen av genomsnittet för mätserien framkom att typ N låg ca 4°C över typ K.

I figur 32 visas ett snitt ur denna mätserie lasten var ca 12 MW under mätseriens gång.

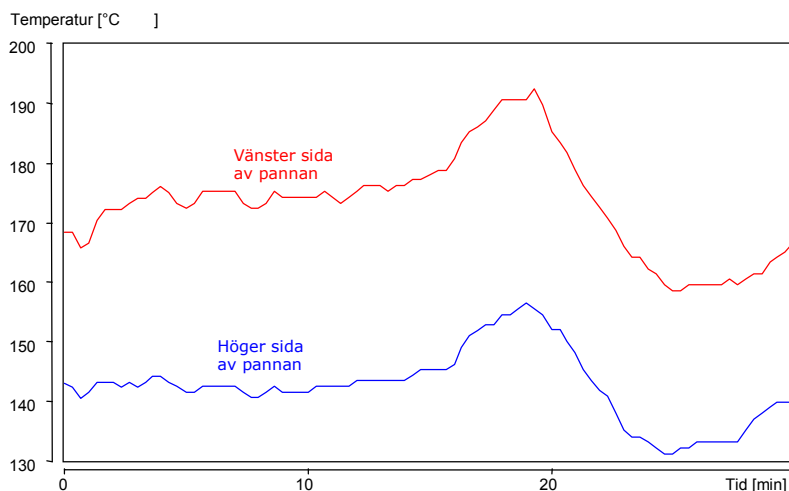


Figur 32 Jämförelse mellan temperaturer uppmätta med termoelement av typ K och typ N.

Figure 32 Comparison between temperature measured with thermocouples type-K and type-N.

5.4.6 Jämförelse mellan kapslat och mantlat termoelement

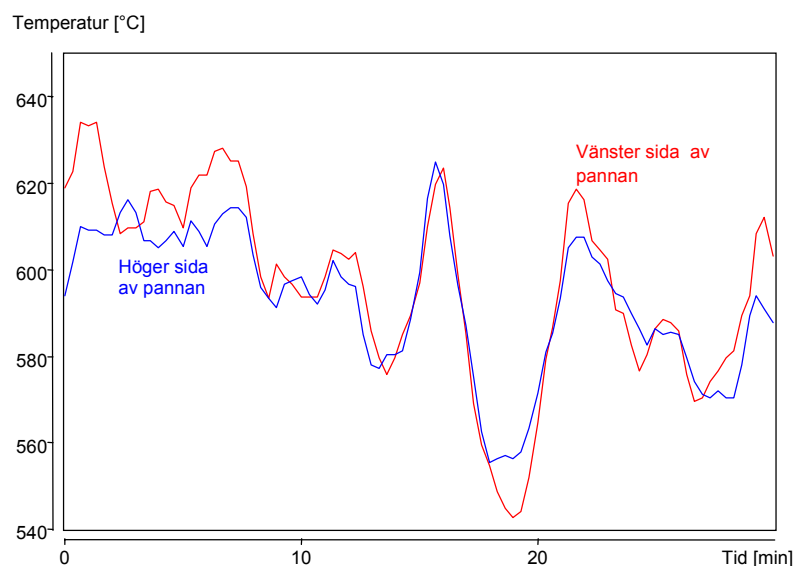
Figur 33 visar den uppmätta temperaturen intill pannväggen med kapslade termoelement av typ N. De uppmätta temperaturerna avviker ganska kraftigt från motsvarande för de mantlade termoelementen, se figur 14 och 24. En av förklaringarna är att rören in genom pannväggen precis passar de kapslade termoelementen. Vid mätningar med de mantlade termoelementen så finns en luftficka i hålet där gasen kan samlas och därmed mäts en högre temperatur. Vidare så kan värme transporteras bort från det kapslade termoelementet i form av ledning genom pannväggen eftersom detta i princip ligger helt an mot pannans vägg. Detta ger att det mantlade termoelementet mäter betydligt högre temperatur än det kapslade vid väggen.



Figur 33 Temperatur vid väggen på vänster respektive höger sida av pannan.

Figure 33 Temperature by the wall at the right side (blue) and left side (red) of the boiler.

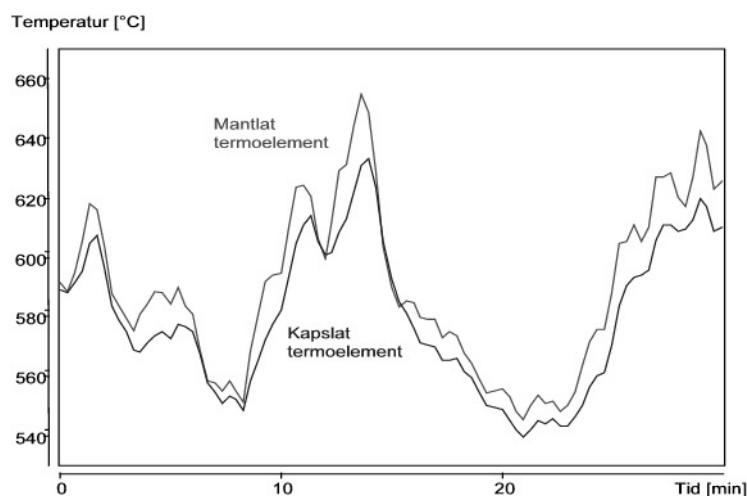
Temperaturen mättes även på högra och vänstra sidan när de kapslade termoelementen stacks in maximalt, d.v.s. 5 cm, i pannan. Ett snitt över en sådan mätserie visas i figur 34. Här är temperaturen ungefär lika hög på båda sidor av pannan till skillnad mot mätningen vid väggen.



Figur 34 Temperatur 5 cm från väggen på höger och vänster sida av pannan

Figure 34 Temperature 5 cm from the wall at the right and the left side of the boiler

Temperaturen har jämförts mellan mantlat och kapslat termoelement i en mätpunkt 5 cm från väggen vilket redovisas i figur 35.



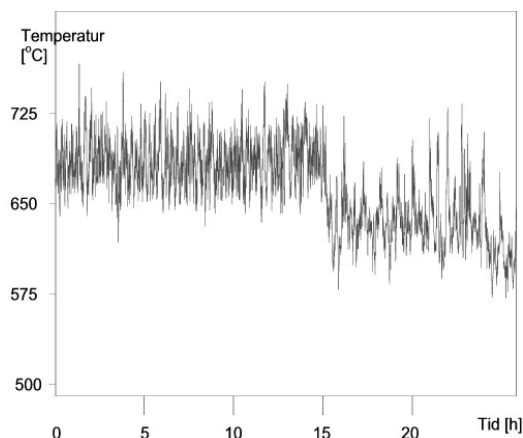
Figur 35 Jämförelse mellan kapslat och mantlat termoelement vid pannans högra sida med ca 20 cm mellanrum.

Figure 35 Comparison between sheathed thermocouple with and without protective tube in measure points at the wall with a distance of approximately 0,2 m.

Termoelementen sitter i hål bredvid varandra vilket gör att det är svårt att avgöra om de olika termoelementen mäter samma temperatur. Men mätningar med enbart mantlade termoelement visade att skillnaden i temperatur mellan två intilliggande hål inte handlar om allt för många grader. Därmed kan man konstatera att mantlade och kapslade termoelement uppmäter ungefär samma temperatur.

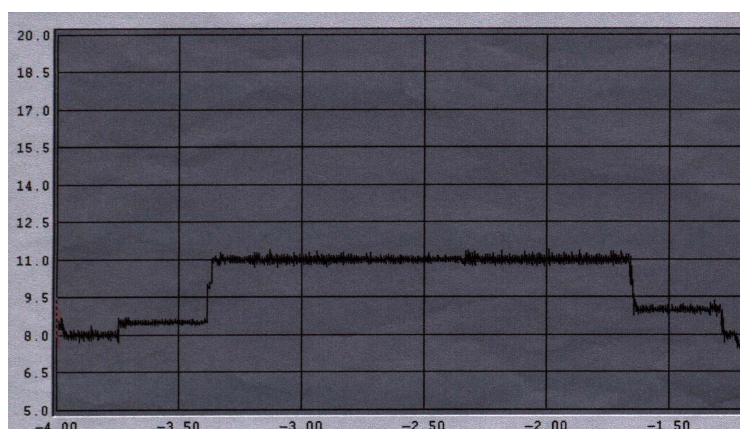
5.4.7 Temperatur vid olika laster

En sak som bör beaktas vid temperaturmätning i pannor är att temperaturen varierar beroende på vilket lastfall man har. Figur 36 visar ett snitt av en mätserie som varar i ett dygn. Som man kan se ligger temperaturen och varierar kring en nivå till en början då lasten är konstant 11 MW, figur 37. Sedan sjunker temperaturen efter 15 timmar då lasten sänks till 9 MW. Temperaturnivån i den aktuella mätpunkten sjunker ca 50°C vid lastsänkningen.



Figur 36 Medeltemperatursänkning p.g.a. effektminskning.

Figure 36 Mean temperature-lowering depending on load reduction.



Figur 37 Effektkurva; x-axeln är graderad i dygn och y-axeln är MW panneffekt

Figure 37 Power (MW) as a function of time

5.5 Resultatanalys Motala

Att mäta temperatur är känt för att vara förknippat med svårigheter. Detta beror på att termoelement endast mäter den temperatur som mätroppen känner och speciellt svårt blir det när strålning till och från mätobjekt sker. Vid de mätningar som har gjorts har strålningen varit ett dominerande inslag i värmeöverföringen vilket har gjort att den uppmätta temperaturen har haft ett stort mätfel.

Vad gäller mätningarna i Motala så har de inte genomförts på det sätt och pågått i den utsträckning som var tänkt från början. Det beror bl.a. på felaktiga mätinstrument (ej fungerande sugpyrometrar, för korta termoelement etc.) och sena leveranser. Därför är resultaten som redovisas inte en tillräcklig grund för att en fullständig analys skall kunna göras. Därmed är det svårt att avgöra om det går att använda konventionella termoelement för att övervaka om pannan upprätthåller de krav som ställs. Men en första analys har gjorts utifrån de underlag som finns att tillgå.

Jämförande mätningar mellan termoelement och sugpyrometer har endast kunnat genomföras på ett ställe i pannan och där har ej kapslade termoelement använts vilket var tänkt från början. Därför har mätningarna mer koncentrerats på att studera gränsskikt och jämföra temperaturen i olika mätpunkter

Vid jämförande mätningar på olika sidor i pannan (höger och vänster sida) kan man konstatera att temperaturen varierar. Vid vissa tillfällen kan medeltemperaturen vara klart högre på en sida vid en punkt för att vid nästa mätserie visa på en lägre temperatur vid jämförelse med samma mätpunkt. Det har inte kunnat fastställas varför temperaturen ”skiftar” sida, men att gränsskiktets variationer i tjocklek har en inverkan på temperaturen är konstaterat och det kan vara en orsak till de temperaturvariationer som uppstår. Tjockleksvariationerna påverkas bland annat av strömningen.

De jämförande mätningarna som gjorts mellan termoelement och sugpyrometer visar på svårigheter med att uppnå de krav som EU har ställt när det gäller förbränning av avfall i pannor. Svårigheterna ligger främst i arten av det mätfel som uppstår när man mäter med termoelement, det visar sig att mätfelet varierar oberoende av temperatur. I dessa mätningar har upp till 50°C skillnad mellan mätfelet uppmäts. Variationerna beror till viss del av att gasens emissivitet varierar med dess sammansättning men även på strömningarnas variationer i pannan vilket leder till att olika mycket värme förs till termoelementet med varierande mätfel som följd. De uppmätta serierna visar dock en tendens på att mätfelet varierar mindre och är mindre vid lägre temperaturer. Fortsatta mätningar kommer dock att krävas för att säkert kunna fastställa hur stora variationerna kan vara och vid vilka temperaturer. De transienter som har uppstått under mätningarnas gång har ej påverkat uppmätt temperatur och mätfel.

Det faktum att mätfelet ej är konstant gör det hela komplicerat. Hade det visat sig att mätfelet varit konstant vid en given gastemperatur så skulle möjligheten varit större att ta fram en metod som är applicerbar för att genomföra övervakningen. Dessutom måste man notera att även sugpyrometern mäter fel.

Efter mätningarna och den erfarenhet som införskaffats vid mätningarna i Motala så ses möjligheten att hitta en enkel metod som uppfyller EU-kraven inte vara allt för stor. Trots att fluidbäddpannan är ”snäll” i den mening att temperaturgradienterna är relativt små och förbränningen är förhållandevis jämn. Utgående från de hittills genomförda mätningarna kan man därför inte säga om metoden är användbar eller inte.

6 Gärstadverket

6.1 Anläggningsbeskrivning

Gärstadverket i Linköping är ett kraftvärmeverk, som tar emot och bränner 230 000 ton sorterat avfall varje år. Det är dels vanligt hushållsavfall dels industriavfall vilket svarar för cirka 30 %. Där finns tre avfallspannor och en gasturbin, vilket ger en kombiprocess. Under merparten av tiden som mätningarna för detta projekt gjordes har ingen el producerats, utan endast fjärrvärme.



Figur 38 Gärstadsverket, Linköping

Figure 38 Gärstad plant, Linköping

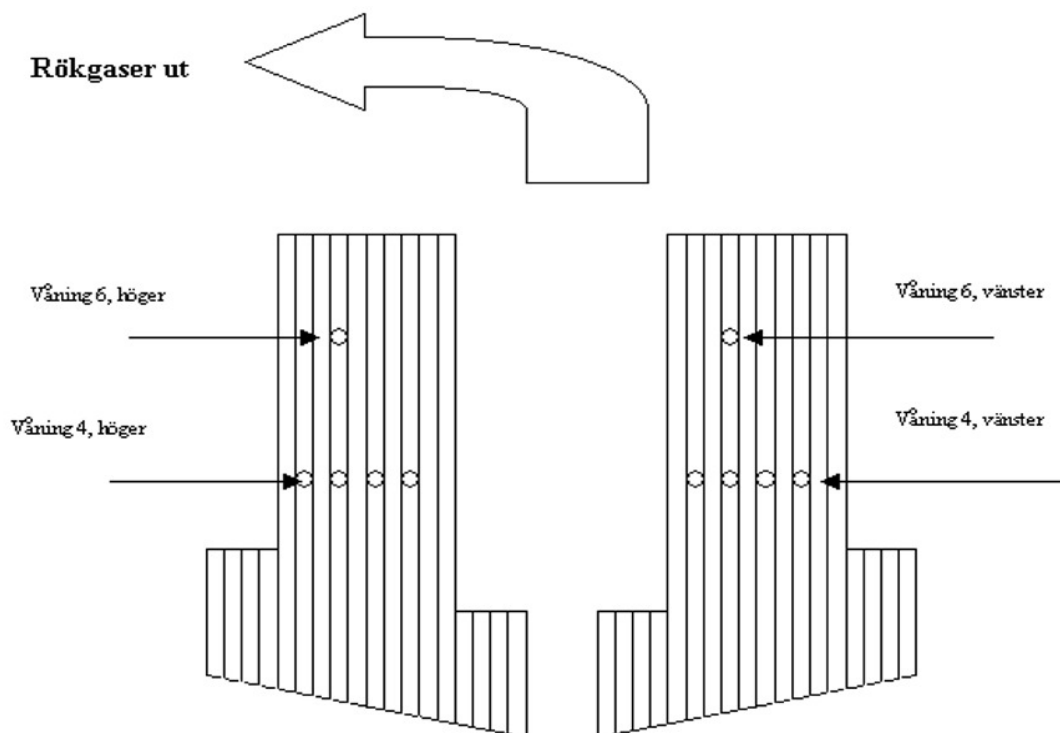
Mätningarna utfördes på en av avfallspannorna (panna 2). Det är en rosterpanna tillverkad av von Roll med rörlig snedroster, som har kapacitet att bränna 12 ton/h och kan då ge cirka 30 MW fjärrvärme. Pannan är en ångpanna och ger 13 kg/s vid 16 bar mättad ånga (201 °C). Totalt sett kan Gärstadverket producera 100 MW fjärrvärme och 50 MW el. Anläggning står i princip för basproduktionen av fjärrvärme i Linköping med omnejd och därför går alla tre avfallspannorna för fullt under större delen av året. Så var också fallet då verksamheten för detta projekt utfördes där; panna 2 eldades maximalt.

6.2 Mätuppställning

Mätningarna på Gärstadverket utfördes med sugpyrometer och termoelement. Tre olika sorters termoelement användes, kapslade typ N, mantlade typ N samt mantlade typ K. Samtliga kapslade var 0,7 m och de mantlade 1 m.

Sugpyrometern är 4 meter lång och drivs med tryckluft. För att klara temperaturen i pannan är den vattenkyld. Termoelementet i pyrometern är av typ K. Samma sugpyrometer som i Motala användes.

Figur 39 nedan visar en bild över pannan och var mätpunkterna sitter.



Figur 39 Princip ritning över pannan de två mitre hålen på varje sida används för urealansar.

Figure 39 Sketch of the boiler; The two holes in the middle are used for urea lances.

I figur 40 ses exempel på när sugpyrometer, kapslat termoelement av typ N och mantlat av typ N mätte temperaturen i pannan.



Figur 40 Sugpyrometer och termoelement vid mätning

Figure 40 Suction pyrometer and thermocouple used at the measurements

Loggern som användes var en PC-logger tillverkad av INTAB.

På den aktuella pannan fanns möjlighet att mäta på två sidor och på två våningar (våning 4 och våning 6). Detta utnyttjades, dock kunde sugpyrometern av praktiska skäl endast användas på våning 4. Avståndet i höjddled mellan de olika mätområdena var cirka 6,5 m. Pannväggarnas tjocklek varierade mellan mätpunkterna. På plan 6 var väggarna cirka 70 cm, medan de på plan 4 endast var dryga 50 cm. Inga mätpunkter inom det murade området användes då inget befintligt hål var tillgängligt.

I det fall någon medarbetare ur projektgruppen befann sig på plats lagrades mätdata från loggern direkt på en PC. Mätningarna pågick även på annan tid och då lagrades alla data i loggers minne för att sedan föras över till en PC i efterhand. Programvaran som användes för att analysera mätresultaten var EasyView 4 – Pro.

6.3 Mätförfarande

Mätningarna på våning 4 koncentrerades till att jämföra sugpyrometer med termoelement och samtidigt utnyttjades möjligheten att jämföra de olika termoelementen med varandra på olika avstånd från väggen. Dessutom studerades temperaturgränsskiktet vid pannväggen med hjälp av två eller flera mantlade, 1 m långa termoelement.

I figur 41 ses hur gränsskiktet mättes med ett mantlat typ N (rosa koppling och sladd) och två typ K (gråa sladdar). Proceduren innebar att ett av termoelementen satt så långt instuckt som möjligt och fungerade som någon form av referens, medan de andra två successivt flyttades till olika platser i gränsskiktet. I figuren ses även ett kapslat termoelement typ N (med rosa sladd och stort kopplingshuvud).



Figur 41 Tre olika termoelement i samma hål (extrahål för urealansar)

Figure 41 Three different thermocouples at the same hole

Oavsett vad mätningen gällde var det av högsta vikt att isoleringen i hålet var bra. Detta eftersom det rådde undertryck i pannan vilket gav ett kraftigt sug av sval luft utifrån pannan genom hålen med stort mätfel som följd. De mantlade termoelementen nådde knappt en halv meter in i pannan på våning 4 och de kapslade knappt två decimetrar. Vid mätningarna användes en samplingstid på 1 sekund och därefter gjordes en medelvärdesbildning av 20 avläsningar.

På våning 6 nådde de kapslade termoelementen endast några centimeter in i pannan, medan de mantlade räckte drygt tre decimeter in. Mätningarna där inriktades på att mäta upp gränsskikt samt att jämföra de olika termoelementen med varandra. Vidare mättes temperaturen med kapslade termoelement på båda våningarna under längre tidsperioder för att få en uppfattning om vilka effekter som uppstår då termoelementen sitter orörda i pannan flera dagar.

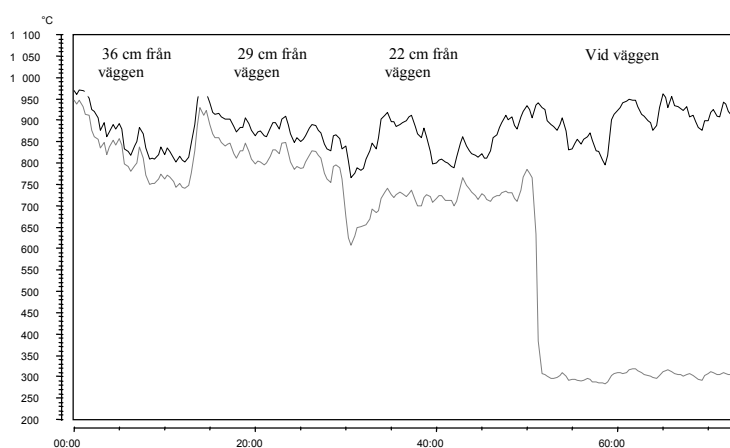
6.4 Mätresultat

6.4.1 Temperaturgränsskikt

Under mätningarna flyttades ett till två termoelement stegvis genom gränsskiktet med 7 cm per steg. Ett annat termoelement gav referenstemperaturen utanför gränsskiktet och flyttades inte. Detta element nådde olika långt in i pannan i olika hål beroende på att vägg tjockleken varierade. I figurerna nedan visas de diagram som erhållits vid gränsskiktsmätningarna. De svarta graferna visar referenstemperaturen och de röda och blå graferna visar temperaturen hos de rörliga mätpunkterna

6.4.1.1 Våning 4, vänster sida

Figur 42 visar temperaturen på olika positioner från väggen vid pannans vänstra sida, som referens finns temperaturen 0.5m in i pannan. Alla dessa mätningar har gjorts vid samma lastfall.

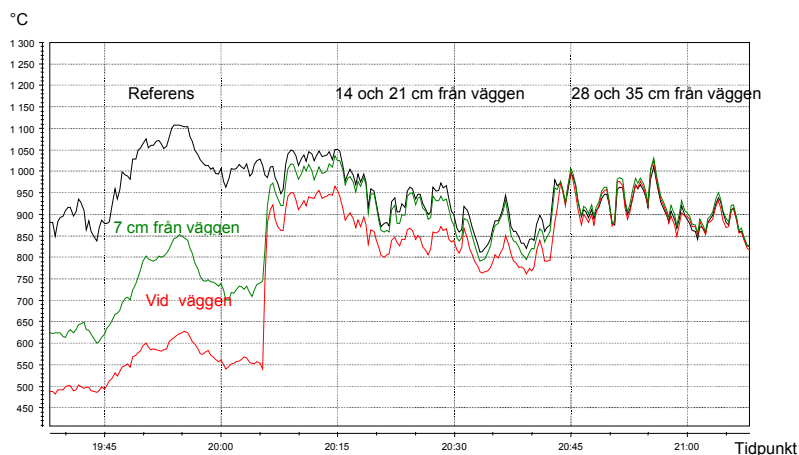


Figur 42 Gränsskiktsmätning i pannans vänstra sida; våning 4

Figure 42. Boundary layer measurement on the left side of the boiler at level 4

6.4.1.2 Våning 4, höger sida

Figur 43 visar gränsskiktsmätning våning 4. Den fasta mätpunktens läge var ca. 0.5 m från väggen medan två termoelement flyttades successivt från väggen.

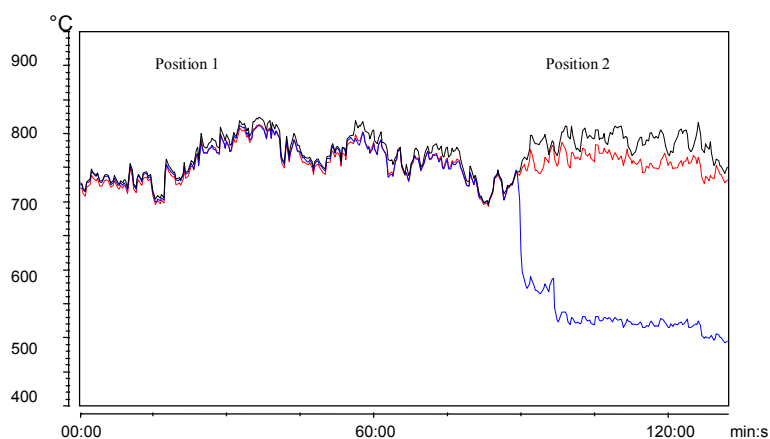


Figur 43 Gränsskiktsmätning i pannans högra sida på våning 4.

Figure 43 Boundary-layer measurements at the right side of the boiler at level 4.

6.4.1.3 Våning 6, höger sida

Den fasta mätpunktens läge var ca 30 cm från väggen. De rörliga mätpunkternas avstånd från väggen var i den första positionen 35 cm (röd graf) och 28 cm (blå graf). I den andra positionen var avståndet 21 respektive 14 cm. Det visas i figur 44.

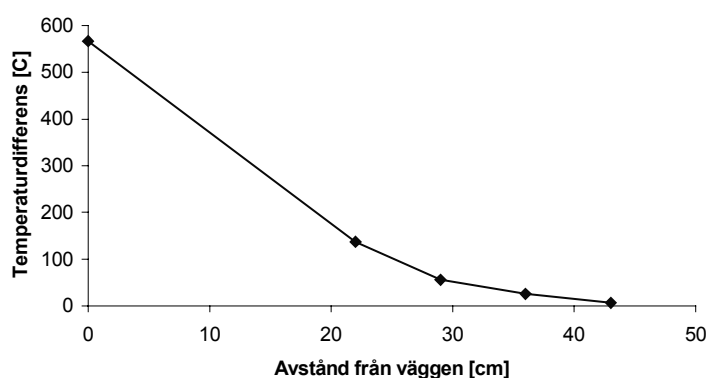


Figur 44 Gränsskiktsmätning i pannans högra sida på våning 6

Figure 44 Boundary layer measurement on the right side of the boiler at level 6

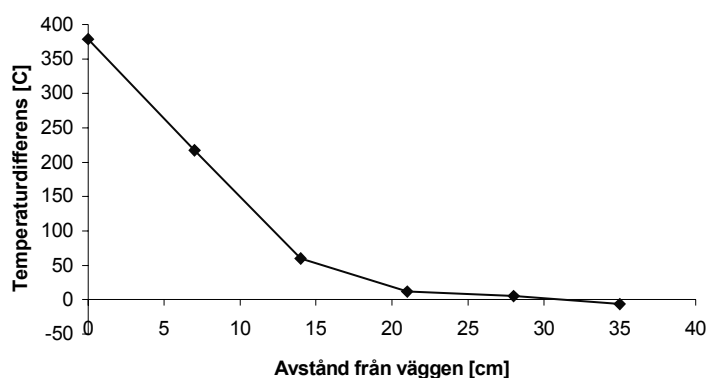
6.4.1.4 Gränsskiktets utseende

I figur 45-47 är gränsskiktet plottat med hjälp av mätvärdena. Att plotta gränsskiktets uppmätta temperatur direkt blir missvisande eftersom temperaturen i pannan varierade så kraftigt under mätningarna. Istället har en temperaturdifferens bestämts, som är skillnaden mellan referenstemperaturen och temperaturen på ett visst avstånd från väggen. Medelvärdet av temperaturdifferensen för varje avstånd har använts. Av figurerna framgår att temperaturgränsskiktet varierar kraftigt i pannan. Den fasta referensen antas ligga utanför gränsskiktet.



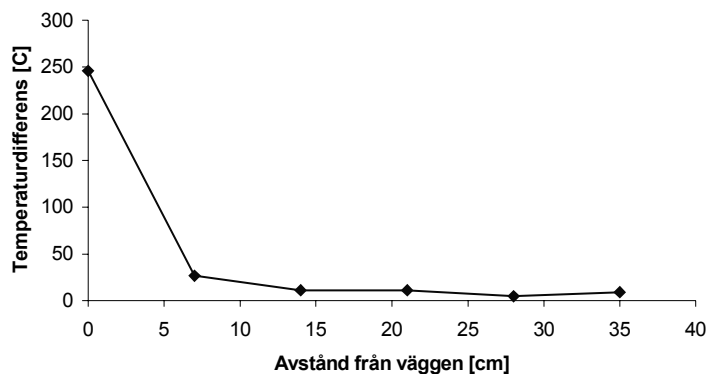
Figur 45 Temperaturdifferens mellan rörligt och fast termoelement på våning 4, vänster sida

Figure 45 Temperature difference between movable and reference thermocouple at level 4, left side of the boiler.



Figur 46 Temperaturdifferens mellan rörligt och fast termoelement på våning 4, höger pannsida

Figure 46 Temperature difference between movable and reference thermocouple at level 4, right side of the boiler



Figur 47 Temperaturdifferens mellan rörligt och fast termoelement på våning 6, höger pannsida

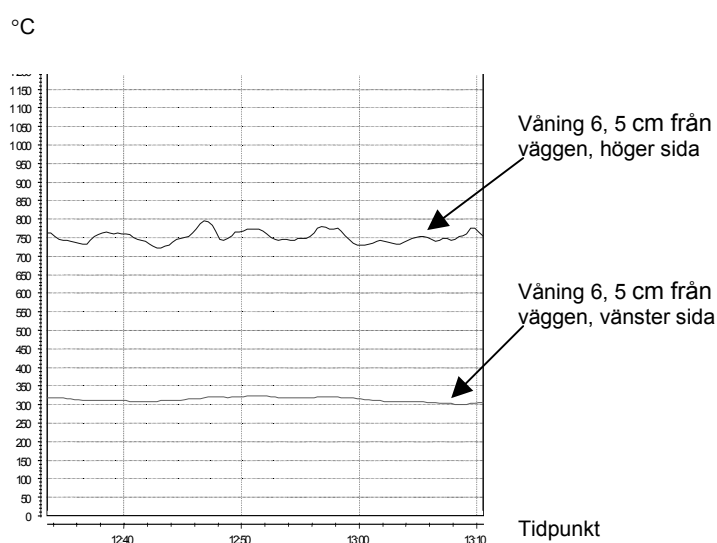
Figure 47. Temperature difference between movable and reference thermocouple at level 6, right side of the boiler.

Det kan konstateras att gränsskiktet är tunnare på våning 6 än på våning 4, vilket tyder på att omblandningen ökar högre upp.

6.4.2 Jämförelse mellan olika mätpunkter

Syftet med följande mätningar är att undersöka temperaturfördelningen i pannan, d.v.s. om somliga områden normalt tycks hålla högre temperatur än andra. Alla mätningar har utförts med kapslade termoelement av typ N.

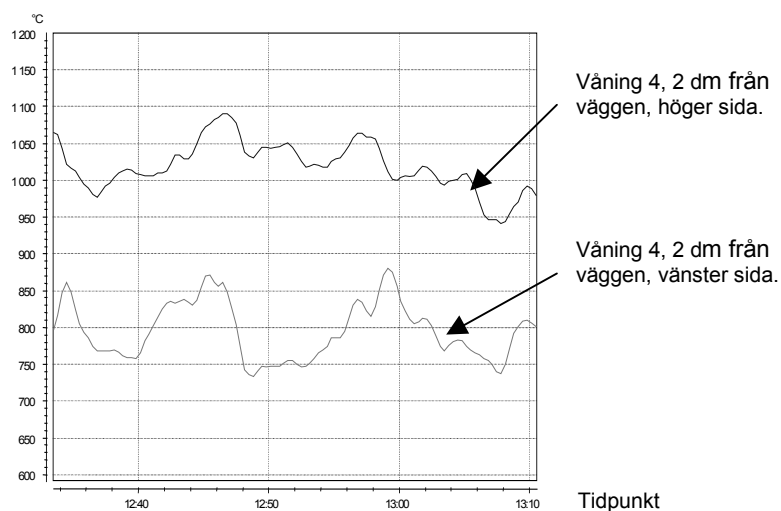
I figur 48 nedan ses en jämförelse mellan temperaturerna cirka 5 centimeter från väggen på motsatta sidor på våning 6. Som synes håller den ena sidan nästan 400 °C mer än den andra.



Figur 48 Temperaturen på motsatta pannsidor på våning 6.

Figure 48 Temperature on opposite sides of the boiler on level 6

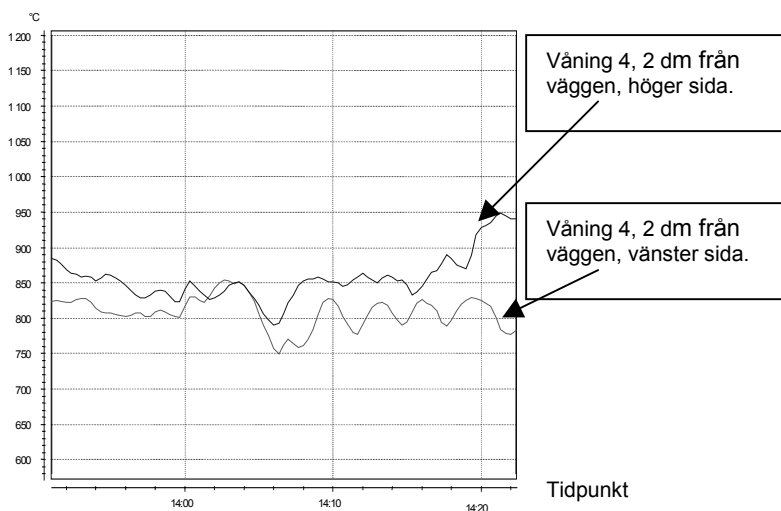
I figur 49 ses en jämförelse av termoelementen på våning 4. Diagrammet visar termoelement mitt emot varandra på våning 4.



Figur 49 Temperaturen på motsatta sidor i pannan på våning 4

Figure 49 Temperature on opposite sides of the boiler on level 4

I figur 50 följer nu motsvarande bild, men vid ett annat tillfälle.



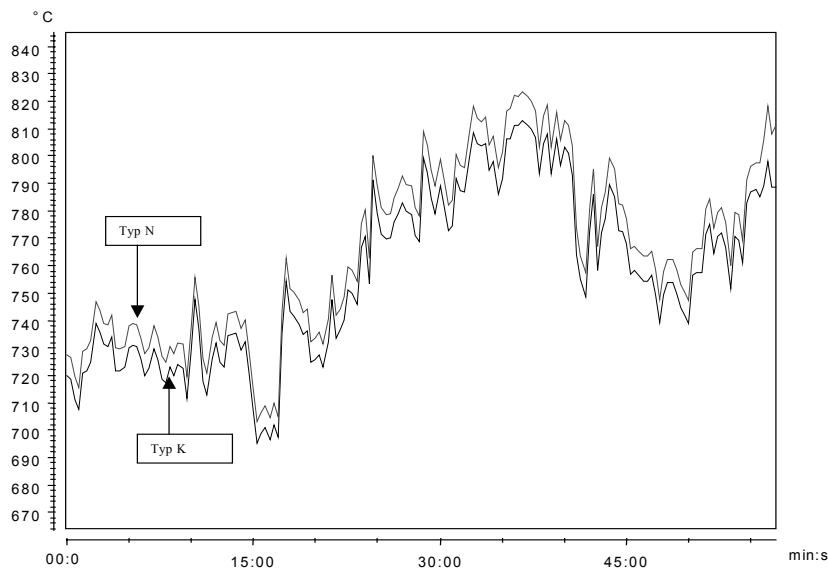
Figur 50 Temperaturen på motsatta sidor i pannan på våning 4

Figure 50 Temperature on opposite sides of the boiler on level 4

Man kan därmed konstatera att temperaturen varierar en hel del mellan olika positioner i pannan och med tiden.

6.4.3 Jämförelse mellan typ N och typ K

Vid en mätserie som framgår i figur 51 jämfördes mantlade termoelement av typ N och K. De två givarna var placerade på våning 6 höger sida och nådde 35 cm in i pannan. Typ N visade en temperatur som var 7–12 °C högre än typ K och i medeltal 9 °C högre.

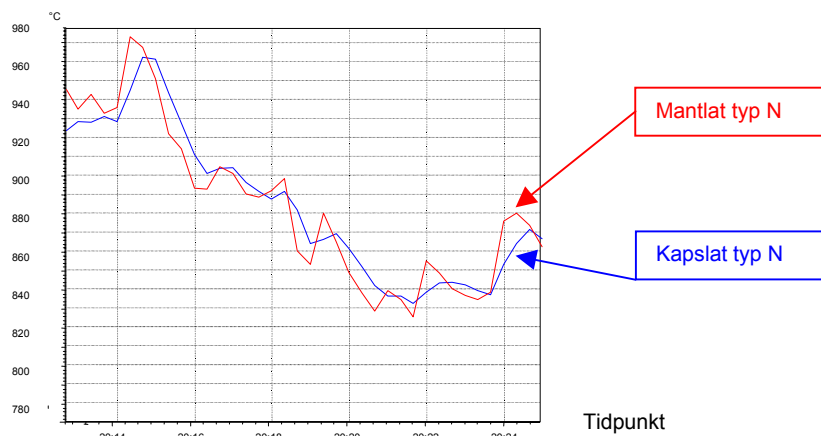


Figur 51 Jämförelse mellan termoelement av typ-N och typ-K på våning 6 på höger pannsida

Figure 51 Comparison between thermocouples type-N and type K at level 6; right side of the boiler

6.4.4 Jämförelse mellan sugpyrometer samt kapslat och mantlat termoelement

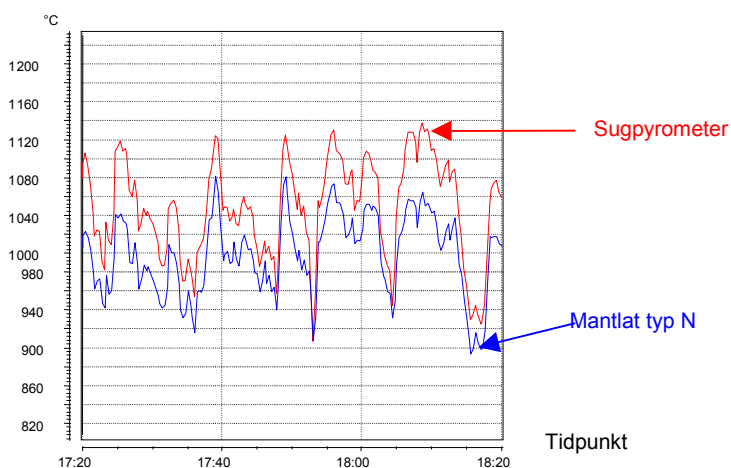
På våning 4 jämfördes temperaturen uppmätt med kapslade och mantlade termoelement. Mätningen skedde i en punkt ungefär 0,2 m in i pannan, d.v.s. så långt in det kapslade termoelementet räckte. I figur 52 ses resultatet av mätningen. Man kan notera en viss förskjutning mellan kurvorna, som indikerar en aning större tröghet i det kapslade termoelementet. Man kan konstatera att det kapslade och mantlade mäter tämligen lika, på sin höjd är skillnaden drygt tio grader.



Figur 52 Jämförelse mellan kapslat och mantlat termoelement typ-N på våning 4; vänster pannsida

Figure 52 Comparison between capsuled and sheathed thermocouple type-N at level 4; left side of the boiler.

I figur 53 nedan ses en jämförelse mellan sugpyrometer och mantlat termoelement av typ N. Mätningen är gjord på plan 4 cirka två dm in i pannan. Man kan till att börja med konstatera att de båda instrumenten visar en avsevärd skillnad. Vidare kan man dock se att de följer varandras rörelser och slutsatsen av det bör vara att de mantlade termoelementen torde ha en ganska liten tidskonstant, framförallt i förhållande till de kapslade termoelementen.



Figur 53 Jämförelse mellan temperatur uppmätt med sugpyrometer och mantlat termoelement på våning 4 ca 2 dm in i pannan

Figure 53 Comparison between temperature measured by suction pyrometer and sheathed thermocouple at level 4 ca 0.2 m from the boiler wall

6.5 Resultatanalys Gärstad

Resultatanalysen av mätningarna i Motala inleddes med ett resonemang om svårigheter i samband med temperaturmätning och dessa gäller naturligtvis i båda pannorna.

Dessvärre har även de materiella problemen drabbat mätningarna på Gärstadverket, varför alltför långtgående slutsatser knappast bör dras utifrån de presenterade resultaten.

När det gäller temperaturfördelningen i pannan kan man i alla fall vara ganska säker på att den varierar en hel del, både på olika platser och i tiden. Figurerna 50 och 52 är goda exempel på det. På våning sex uppmättes alltid högre temperatur på den högra sidan av pannan, och temperaturskillnaden mellan sidorna uppgår inte sällan till flera hundra grader som kan ses i figur 50. Mätningarna på våning 4 visade oftast detsamma, dock inte alltid. En teori om anledningen till den lägre temperaturen i överdelen på pannans vänstra sida, skulle kunna vara sämre omblandning av förbränningsgaserna, d.v.s. att gaserna helt enkelt blir mer stilla där.

När det gäller temperaturgränsskiktet vid väggarna indikerar mätningarna på att dessa varierar på olika platser i pannan.

Beträffande jämförelsen av termoelement med sugpyrometer, visar figur 55 att mätfelet inte sällan är ganska stort. Utöver detta kan konstateras att det varierar en hel del, från något enstaka tiotal grader till dryga 80°C. Orsakerna till detta är det svårt att ha någon uppfattning om, men eftersom det handlar om sopförbränning i pannan kommer bränslets innehåll att variera en hel del. Detta leder i sin tur till variation av rökgasernas sammansättning, vilken skulle kunna påverka förutsättningarna, exempelvis strålningsförhållandena, för de två instrumenten.

Vidare har även en jämförelse mellan kapslat och mantlat termoelement redovisats och en första kommentar till detta är att båda resultaten följer varandra ganska väl. En annan intressant iakttagelse är att man tydligt ser en förskjutning mellan de båda kurvorna. Den illustrerar att det kapslade termoelementet är en liten aning trögare än det mantlade. Jämförs exempelvis två motsvarande toppar på de olika kurvorna ses att förskjutningen är cirka 20 sekunder, vilket ungefär ligger i linje med resultaten som erhållits ur Femlab-modellen, se figurerna 8 och 9.

I avfallspannan far det omkring en hel del partiklar och när termoelementen suttit i några timmar har det ofta ansamlats en hel del skräp på dem. I mätresultaten i detta projekt har ingen effekt av detta kunnat ses, men rimligen borde påslag på termoelementet störa mätningarna en del. Mätningarna har pågått för kort tid för att sådana effekter skall kunna upptäckas.

Efter ovanstående diskussion är det således dags för ett resonemang om lämpligheten att använda termoelement för att övervaka uppfyllandet av det nya EU-direktivet. För det första kan frågan ställas om det över huvud taget är möjligt att garantera att samtliga rökgaser håller en temperatur på minst 850 °C under minst två sekunder? Mätningarna presenterade i denna rapport visar en ganska stor temperaturvariation, exempelvis mellan olika ställen i pannan och man kan fråga sig vad som krävs för att temperaturen skall bli åtminstone 850 °C.

Antar man dock att detta inte är något problem och istället börjar titta på vilken temperatur termoelementen egentligen mäter så innebär det stora och framför allt varierande mätfelet troligen ett rejält problem. Ett alternativ skulle kunna vara att hela tiden reglera driften efter det största kända mätfelet. Detta ter sig dock som en väldigt dyr metod, eftersom man reglerar fram en högre temperatur än nödvändigt.

En annan osäkerhet i mätningarna är tvåsekundersintervallet. Då en fullständig bild av strömningarna i pannan saknats, är det ytterst osäkert vad som går att säga om detta kravs uppfyllande. En grov uppskattning kan göras utifrån kännedom om luftflödet genom pannan, vilket kan ge en strömningshastighet. Före rökgasåterföringen är volymflödet cirka $13 \text{ m}^3/\text{s}$. Vidare har pannans tvärsnittsarea i genomsnitt uppskattats till drygt 20 m^2 mellan våningarna fyra och sex. Detta skulle ge en strömningshastighet på cirka $0,6 \text{ m/s}$.

Enligt tidigare är det drygt 6 meter mellan mätpunkterna på våning fyra och våning sex och därmed skulle rökgaserna åtminstone behöva tio sekunder att ta sig däremellan. Är temperaturen sedan med säkerhet minst $850 \text{ }^\circ\text{C}$ i de båda mätpunkterna torde kravet vara uppfyllt med råge. Osäkerheten är dock som sagt mycket stor eftersom strömningen inte går spikrakt upp genom pannan utan att det uppstår virvlar. Vidare varierar säkerligen sammansättningen av rökgaserna mellan våning 4 och före rökgasåterföringen, vilket kan ge varierande täthet och en annan hastighet.

En slutsats utifrån ovanstående är att en noggrannare uppskattning av mätfelet (exempelvis genom vidareutveckling av modellerna i detta projekt eller utvecklande av nya), bör krävas för att termoelement skall vara användbara för övervakning enligt EU-direktivet. Kan man skaffa sig detta i kombination med en ordentlig bild över strömningen i pannan borde det finnas vissa förutsättningar för att metoden skall kunna användas.

7 Resultatanalys

7.1 Kommentarer angående val av termoelement

Valet av termoelement föll efter diskussioner med leverantören, Pentronic, på typ N. Det hittillsvarande normala valet i denna applikation har varit typ K men typ N är framtagen för att klara något högre temperaturer än typ K och är därför stabilare.

Det har visats i denna mätning att felet vid mätning med typ N är något mindre än mätningen med typ K som används som referensgivare. I sugpyrometern har givare av typ K använts men med tanke på de resultat som har visats här bör det övervägas att övergå till typ N även här.

7.2 Analys av mätningarna

Vid jämförelse på olika sidor i pannorna av temperaturen kan man konstatera att temperaturen varierar. Vid vissa tillfällen kan medeltemperaturen vara klart högre på en sida vid en punkt för att vid nästa mätserie visa på en lägre temperatur vid jämförelse med samma mätpunkt. Detta har konstaterats på de båda pannor som mätningarna har genomförts på.

De mätningar som har jämförts gällande mätfelet på pannorna visar på svårigheter med att uppnå de krav som EU har ställt när det gäller förbränning av avfall i pannor. Svårigheterna ligger främst i arten av det mätfel som uppstår när man mäter med termoelement. Det visar sig att mätfelet varierar oberoende av temperaturen på gasen

I dessa mätningar har skillnader i mätfel på upp till 80°C i Gärstad och 50°C i Motala uppmätts. Variationerna i mätfel och temperatur beror till vissa delar av att:

- Gasens halt av syre, koloxid, vatten, koldioxid och kväveoxid kommer att påverka gasens emissivitet och därmed strålningen från gasen till termoelementet.
- Lasten i pannan kommer påverka förbränningen och därmed gasens temperatur vilket även mätningarna har visat (se figur 38).
- Strömningsbilden varierar med lasten vilket påverkar temperaturen i pannan.
- Gasflödet har inverkan på det konvektiva bidraget till termoelementet vilket påverkar dess temperatur.
- Termoelementets yta kommer att påverkas med tiden i form av beläggningar av oxid och aska. Därmed ändras dess emissivitet och strålningen till väggen.
- Ett sätt att minska påverkan från pannväggen vore att sätta en ”krage” på termoelementet. Det finns dock tveksamheter om detta kan fungera.

Mätfelet visar dock en tendens på att variera mindre samt vara mindre vid lägre temperaturer.

Mätningarna angående tvåsekundersintervallet har inte kunnat analyseras. Eftersom en fullständig bild av strömningarna i pannorna saknats, går det inte att säga om detta krav

går att uppfylla. Man kan genom en grov uppskattning utifrån kännedom om luftflödet genom pannan erhålla strömningshastigheten vilket skulle kunna visa på om kravet uppfylls.

De problem som finns med mätning med termoelement i denna miljö kan skrivas i ett antal punkter.

- Värmeledning genom termoelementet, kapslingar och mantlar
- Strålning från gas till termoelement
- Strålning från termoelementet till pannväggen.
- Temperaturskillnader mellan gas och termoelement ger också ett litet konvektivt fel.

7.3 Simuleringsmodellerna

Beräkningsmodellerna som beskrivs i kapitel 3 gäller bara för ett stationärt fall d.v.s. om förhållandena i pannan är konstanta med tiden och läget vilket inte är fallet i verkligheten. Förhållandena som påverkar den temperatur som termoelementet mäter upp är bl.a. gasens sammansättning, gasens temperatur, lasten i pannan, strömningen och gasflödet. Problemet med att beräkna termoelementets mätfel är alltså mycket komplext och påverkas av en mängd faktorer.

Problemet kan delvis ligga i att dämpningen i beräkningen är för låg. Ett sätt vore att pröva dämpningstillskottet till $T_{\text{termo},n}$ genom att man bara accepterar en bråkdel av det beräknade: $I_{n,\text{tillskott}} = x * I_{n,\text{beräknat}} + (1-x) * I_{n-1}$, $x = 0,1 - 0,5$. En annan väg att gå är att ta initialvärdet för n'te från resultatet i det n-1'te elementet.

Modellerna i dess nuvarande skick kommer att visa på ett specifikt mätfel vid en given gastemperatur men så är inte fallet i verkligheten. Det belyses i bl.a. kap 4.4.3 där resultaten visar att mätfelet kan variera i ett intervall om 50°C vid en och samma gastemperatur. Detta beror på det som tagits upp ovan, d.v.s. att förhållandena i pannan varierar med tid och läge.

Vilken potential har då modellerna att beräkna mätfelet?

För att temperaturen skall kunna beräknas m.h.a. modellen måste värmeövergångskoefficienten och emissiviteterna kunna varieras med tiden vilket innebär att faktorerna som påverkar dessa måste övervakas kontinuerligt. Sen måste ett samband mellan dessa faktorer (last, gassammansättning, gasflöde etc.) och de parametrar som styr randvillkoren hittas. Det skulle kunna bli någons slags iterationsprocess mellan mätningar och hur modellen ska ställas in. Men steget dit kräver mätningar under långa tidsperioder för att få den erfarenhet som krävs.

Det bör även påpekas att förenklingar har gjorts i modellen vad gäller geometri och randvillkor, t.ex. att konstant temperatur satts vid ena änden. Det kan visa sig att förenklingarna är i grövsta laget för att en bra modell skall fås fram.

8 Förslag till fortsatt forskningsarbete

De mätningar som har genomförts vid detta projekt ger inte en tillräcklig grund för att dra de slutsatser som krävs. De rekommendationer till fortsatt arbete som kan ges utifrån de mätningar som har gjorts är främst att mätningar bör göras under längre tidsperioder för att täcka de variationer som uppstår i pannan på grund av de ändringar i lasten som uppträder. Dessutom behöver mätningar göras under full last vilket inte alltid kunde göras under denna period eftersom sommaren närmade sig. Dessa mätningar kan ge ett bättre samband om variationer i mätfelet än vad som har erhållits i detta projekt. Dessutom krävs att jämförande mätningar kan genomföras med sugpyrometer vid flera mätpunkter i pannorna, detta för att erhålla en bra bild av mätfelet vid dessa positioner.

De modeller som utvecklats under projektets gång har en potential att lösa det värmeöverföringsproblem som uppstår i pannan. Den analytiska modellen är dock inte riktigt fullt utvecklad med svängningsproblem och instabilitet som följd. Denna lösning skulle om mätfelet kan uppskattas på ett bra sätt, kunna användas till den reglerloop som används för att reglera temperaturen. Detta kräver emellertid att svängnings- och instabilitetsproblemet kan lösas på ett bra sätt.

Ett förslag är göra jämförande mätningar mellan sugpyrometer och termoelement under en längre tid där lasten varierar mellan max och min och sedan ta fram det största mätfelet som varit under mätperioden. Om detta mätfel används som korrigering vid mätning med termoelement så vet man att man är på säkra sidan vad gäller temperaturkravet. Nackdelen är att pannan måste regleras så att gasen till största delen av tiden håller en högre temperatur än vad som krävs.

Det krav som EU ställt beträffande gasens uppehållande vid 850°C i 2 sekunder pannan har inte heller kunnat utvärderas på grund av att pannan hade för få mätpunkter i höjdlängd (speciellt Motala) och att en bild av strömning och gashastigheter inte är kända. Därför krävs att också detta utvärderas för att få en komplett bild av temperaturvariationerna i pannan.

En slutsats utifrån ovanstående är att en noggrannare uppfattning om mätfelet (exempelvis genom vidareutveckling av modellerna i detta projekt eller utvecklande av nya), bör krävas för att metoden skall vara användbar. Kan man dock skaffa sig det i kombination med en ordentlig bild över strömningsbilden i pannan kan det finnas vissa förutsättningar för att övervakningen enligt det nya EU direktivet skall kunna uppfyllas med hjälp av termoelement.

I ett nästa steg kan man tänka sig att göra en installation med fler termoelement.

9 Kommentar

Under försöken har bra resultat angående mätning i pannor uppnåtts. Det kan konstateras att omblandning, stråk och gränsskikt påverkar mätningarna kraftigt men dessa problem är ändå av den naturen att felen blir någorlunda linjära och därför kan ... Under projektet har det framkommit att dagens teknologer har alltför låg praktisk erfarenhet av mätsituationer. Detta är i grund och botten en ekonomisk fråga för högskolan då många av de tidigare dyra laborationerna lagts över till att vara datorsimuleringar. Det bör också påpekas att teknologgruppen under arbetets gång erhöll erforderlig laborationsvana. Tyvärr krävde detta icke förutsedd tid och icke kalkylerade problem med mätutrustningen.

Simuleringar kan vara ett bra hjälpmedel men kan inte ersätta praktiskt handlag och ”olja under naglarna”. Detta är troligtvis ett generellt problem inom tekniska utbildningar.

10 Referenser

1. B. Zethraeus. Mätning av gastemperaturer, delrapport 4, Projekt 2012. "Ersättning av petroleumbaserade bränslen inom järn- och stålindustrin", Stockholm 1982-12-15.
2. L. Rudling. Temperaturmätning vid förbränning enligt EU:s nya direktiv för avfallsförbränning. Värmeforsk Orientering 116. Stockholm juni 2000
3. De. " Measurement of flame temperature with a multielement thermocouple" Journal of the institute of energy [113]. June 1981
4. L Wrangensten, R Schuster, R Ingman, M Sendelius, R Ehleskog. "Aktiva murverk – etapp 1". Värmeforsk 743, oktober 2001.

A Bilaga

Lösning av analytiska modellen

Värmeflödena insatta i jämviktsekvationen ger

$$T''_{termo}(x) + AT_{termo}^4(x) + BT_{termo}(x) = CT_{gas}^4(x) + DT_{gas}(x) + E$$

där A, B, C, D, E och F räknas som konstanter och är

$$[A, B, C, D, E] = \frac{2R}{k(R^2 - r^2)} \left[\sigma(\epsilon_{tot} + \epsilon_{termo}), h, \epsilon_{tot}\sigma, h, \epsilon_{termo}\sigma T_{vägg}^4 \right]$$

I det följande antas att termoelementets temperatur är sökt och att gastemperaturen är känd. Randvillkoret vid väggen där $x=0$ är

$$T_{termo}(0) = T_{vägg}$$

På den fria änden där $x=L$ verkar värmeflödena över samma area och gastemperaturen har sin maxtemperatur. Randvillkoret blir

$$k \frac{dT_{termo}(L)}{dx} = h(T_{gas_max} - T_{termo}(L)) + \epsilon_{tot}\sigma(T_{gas_max}^4 - T_{termo}^4(L)) - \epsilon_{termo}\sigma(T_{termo}^4(L) - T_{vägg}^4)$$

Det sista randvillkoret kan skrivas

$$T'_{termo}(L) = FT_{termo}^4(L) + GT_{termo}(L) + H$$

där F, G och H räknas som konstanter och är

$$[F, G, H] = \frac{1}{k} \left[-\sigma(\epsilon_{tot} + \epsilon_{termo}), -h, hT_{gas_max} + \epsilon_{tot}\sigma T_{gas_max}^4 + \epsilon_{termo}\sigma T_{vägg}^4 \right]$$

Om gastemperaturen antas stiga linjärt inom gränsskiktet, som har tjocklek δ , och antas vara konstant utanför så blir

$$T_{gas}(x) = \begin{cases} T_{vägg} + \frac{T_{gas_max} - T_{vägg}}{\delta} x, & x \leq \delta \\ T_{gas_max}, & x > \delta \end{cases}$$

Differentialekvationen saknar troligen metod för att lösas analytiskt men kan lösas numeriskt med t.ex. differensmetoden. Derivatorna ersätts med differenser och ekvationen diskretiseras i N punkter med steglängden s mellan punkterna. Ekvationen blir då i punkt n

$$\frac{(T_{termo})_{n+1} - 2(T_{termo})_n + (T_{termo})_{n-1}}{s^2} + A(T_{termo})_n^4 + B(T_{termo})_n = C(T_{gas})_n^4 + D(T_{gas})_n + E$$

Randvillkoren blir

$$(T_{termo})_0 = T_{vägg}$$

$$\frac{(T_{termo})_{N+1} - (T_{termo})_{N-1}}{2s} = F(T_{termo})_N^4 + G(T_{termo})_N + H$$

och gastemperaturen

$$(T_{gas})_n = \begin{cases} T_{vägg} + \frac{T_{gas_max} - T_{vägg}}{\delta} sn, & sn \leq \delta \\ T_{gas_max}, & sn > \delta \end{cases}$$

Den diskretiserade differentialekvationen och det sista randvillkoret skrivs om så att kvoterna försvinner och termerna flyttas om. Randvillkoren sätts in i ekvationen i punkt 0 och N. Det ger ett olinjärt ekvationssystem som kan lösas med Newton-Raphsons metod

$$Jl = -f \Leftrightarrow l = J^{-1}(-f)$$

där f är vektor där det n :te matriselementet är differentialekvationen satt lika med noll i punkt n , J är jakobianen av f deriverad med avseende på varje $(T_{termo})_n$ och l är vektor med tillskottet till varje $(T_{termo})_n$ vid itereringar.

Om istället gastemperaturen är sökt och den uppmätta temperaturen $T_{mät}$ i mätpunkten vid termoelementets ände är känd så tillkommer randvillkoret

$$T_{termo}(L) = T_{mät}$$

Som vid diskretiseringen blir

$$(T_{termo})_N = T_{mät}$$

I funktionen för gastemperaturen antas nu alla konstanter vara kända utom T_{gas_max} . I ekvationssystemet är då T_{gas_max} okänd men istället är $(T_{termo})_N$ känd. Då finns lika många ekvationer som okända och ekvationssystemet bör kunna lösas.

Matlab kod analytisk

I följande kod är gastemperaturen ansatt

```
clear
```

%Konstanter

```
R=0.005;
r=0.004;
L=0.3;
delta=0.2;
Tvagg=473;
Tgas_max=1123;
k=24;
h=100;
eps_tot=0.8;
eps_termo=0.5;
sigma=5.669e-8;
```

%Sammanfattande konstanter i differentialekvationen

```
A=2*R/(k*(R^2-r^2))*sigma*(eps_tot+eps_termo);
B=2*R/(k*(R^2-r^2))*h;
C=2*R/(k*(R^2-r^2))*eps_tot*sigma;
D=B;
E=2*R/(k*(R^2-r^2))*eps_termo*sigma*Tvagg^4;
F=-(sigma*(eps_tot+eps_termo))/k;
G=-h/k;
H=(eps_tot*sigma*Tgas_max^4+h*Tgas_max+eps_termo*sigma*Tvagg^4)/k;
```

%Punkter och steglängd

```
N=100;
s=L/N;
```

%Antagen gastemperatur, temperaturen antas variera som en

%andragradsfunktion inom gränsskiktet

```
p=round(delta/L*N) %Gränspunkt för övergång från gränsskiktet
```

```
for n=1:p-1
```

```
    Tgas(n)=Tgas_max-(Tgas_max-Tvagg)*(s*n-teta)^2/delta^2;
```

```
end
```

```
for n=p:N
```

```
    Tgas(n)=Tgas_max;
```

```
end
```

%Initialvärden på temperaturen i termoelementet.

```
Ttermo=Tgas-100;
```

%Beräkning av termoelementets temperatur

l=inf;

while abs(max(l))>1e-2

%Funktionsvektor

f(1)=s^2*A*Ttermo(1)^4+(s^2*B-2)*Ttermo(1)+...

Ttermo(2)- s^2*(C*Tgas(1)^4+D*Tgas(1)+E)+Tvagg;

for n=2:N-2

f(n)=Ttermo(n-1)+s^2*A*Ttermo(n)^4+(s^2*B-2)*Ttermo(n)+...

Ttermo(n+1)-s^2*(C*Tgas(n)^4+D*Tgas(n)+E);

end

f(N)=2*Ttermo(N-1)+(s^2*A+2*s*F)*Ttermo(N)^4+...

(s^2*B-2+2*s*G)*Ttermo(N)-s^2*(C*Tgas(N)^4+D*Tgas(N)+E)+2*s*H;

%Jakobian

for n=1:N-1

J(n,n)=4*s^2*A*Ttermo(n)^3+s^2*B-2;

end

J(N,N)=4*(s^2*A+2*s*F)*Ttermo(N)^3+s^2*B-2+2*s*G;

for n=1:N-1

J(n,n+1)=1;

end

for n=1:N-2

J(n+1,n)=1;

end

J(N,N-1)=2;

%Tillskott l till Ttermo

l=J\(-f)';

Ttermo=Ttermo+l';

end

%Plottning av temperaturgrafer

x=1:N;

plot(x*s,Tgas-273,'--',x*s,Ttermo-273)

xlabel('Avstånd från vägg (m)')

ylabel('Temperatur (°C)')

grid on

Legend('Antagen temperatur hos gas','Beräknad temperatur hos termoelement',4)

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem.

Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig industri

VÄRMEFORSK SAMARBETAR MED
STATENS ENERGIMYNDIGHET

VÄRMEFORSK SERVICE AB
101 53 Stockholm
Tel 08-677 25 80
Fax 08-677 25 35
www.varmeforsk.se

Beställning av trycksaker
Fax 08-677 25 35