VÄLIVLEFOISI

Rapport SGC 056

UTVÄRDERING AV EN INDUSTRIELL GASELDAD IR-STRÅLARE

Stig Stenström Sten Hermodsson Kemisk Apparatteknik, LTH

Michael Johansson Driftteknik, LTH-Malmö

November 1994



Rapport SGC 056 ISSN 1102-7371 ISRN SGC-R--55--SE Rapport SGC 056

UTVÄRDERING AV EN INDUSTRIELL GASELDAD IR-STRÅLARE

Stig Stenström Sten Hermodsson Kemisk Apparatteknik, LTH

Michael Johansson Driftteknik, LTH-Malmö

November 1994

.

sgc

SGC:s FÖRORD

Föreliggande rapport utgör resultatet av två forskningsprojekt där det ena projektet drivits gemensamt av SGC och Värmeforsk och det andra gemensamt av SGC och Nordisk Gasteknisk Center (NGC). Som finansiärer har dessutom NUTEK och Neste Gas medverkat.

SGC svarar för utgivningen av rapporten, medan rapportförfattarna svarar för rapportens innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat e dyl i rapporten gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapporten får återges med angivande av källan.

En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns i slutet på denna rapport.

Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) är ett samarbetsorgan för företag verksamma inom energigasområdet. Dess främsta uppgift är att samordna och effektivisera intressenternas insatser inom områdena forskning, utveckling och demonstration (FUD). SGC har följande delägare: Svenska Gasföreningen, Sydgas AB, Sydkraft AB, Göteborg Energi AB, Lunds Energi AB och Helsingborg Energi AB.

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB

förgen V hunde

Utvärdering av en industriell Gaseldad IR-strålare

Del 1, Teoretisk beräkningsmodell

Del 2, Praktiska mätningar

Metod för bestämning av totalverkningsgrad för Gaseldade IR-strålare

Stig Stenström, Avd. för Kemisk Apparatteknik, LTH Sten Hermodsson, Avd. för Kemisk Apparatteknik, LTH

Michael Johansson, Avd, för Driftteknik, LTH-Malmö

Sammanfattning

į.

En industriell gaseldad IR-strålare har undersökts med avseende på energiverkningsgraden. IR-strålaren används i en pappersmaskin till att torka pappersbanan efter det att den bestrukits med ett ytskikt.

I del 1 av projektet har en matematisk modell utvecklats som beräknar strålningsintensiteten och övriga energiflöden i bestrykningstorken. Utifrån detta är det enkelt att få en klar bild av hur energin används i bestrykningstorken och vilken energiverkningsgrad som uppnås. Beräkningsprogrammet kan med fördel också användas för att studera hur olika parametrar påverkar bestrykningstorkens verkningsgrad.

I del 2 av projektet har mätningar utförts på IR-strålaren monterad i pappersmaskinen. Mätningarna avsåg strålningsfördelningen och ur denna har sedan strålningsverkningsgraden beräknats.Mätningar gjordes dels på relativt nya strålarelement dels på något äldre strålarelement.

Som bilaga återfinns en rapport som beskriver den använda mätutrustningen. Rapporten beskriver också hur ett befintligt mätsystem anpassats för att möjliggöra industriella mätningar i pappersmaskiner.

För att utvärdera beräkningsmodellens noggrannhet har resultaten från denna jämförts med resultaten från de praktiska mätningarna.

Beräkningsmodellen visar att IR-strålarens strålningsverkningsgrad är 39% då den körs på full effekt. Då endast halva effekten utnyttjas är strålningsverkningsgraden beräknad till 35%. Strålningsverkningsgraden anger i detta fall hur stor andel av bränslets effektiva värmeenergi som avges från strålarelementen i form av strålningsenergi. Den totala verkningsgraden för papperstorkningen är beräknad till 31% vid full effekt och 28% vid halv effekt. Totala verkningsgraden är ett mått på hur stor andel av den tillförda energin som totalt tas upp av papperet.

De praktiska mätningarna gjordes vid halv effekt och strålningsverkningsgraden uppmättes till 31% för nyare strålarelement och 28% för äldre strålarelement. Mätningarna gjordes på ett avstånd av ca 50 mm från strålarelementet. Det gör att värdet skall jämföras med ett värde som ligger mellan beräkningsmodellens strålningsverkningsgrad och dess verkningsgrad för strålning som träffar papperet.

Slutsatsen är att beräkningsmodellen stämmer väl överens med vad som praktiskt har uppmätts.

LUTKDH/(TKKA-7001)/1-37/(1994)

Utvärdering av en industriell Gaseldad IR-strålare

Delrapport 1 Teoretisk beräkningsmodell

Sten Hermodsson Stig Stenström

. .

· · ·

Utvärdering av en industriell Gaseldad IR-strålare

Delrapport 1 Teoretisk beräkningsmodell

> Sten Hermodsson Stig Stenström

Februari 1994 Kemisk Apparatteknik Lunds Tekniska Högskola

Sammanfattning

Den industriella gaseldade IR-strålaren som undersökts används i en pappersmaskin till att torka pappersbanan efter det att ytan bestrykits med ett ytskikt. Avsikten med föreliggande arbete har varit att utvärdera anläggningen avseende dess energiverkningsgrad. För att få en bra förståelse för energianvändningen i anläggningen har en matematisk beräkningsmodell utvecklats som beräknar strålningsintensiteter och övriga energiflöden i anläggningen. Utifrån detta är det enkelt att få en klar bild av hur energin används i anläggningen och vilken energiverkningsgrad som uppnås. Beräkningsprogrammet kan med fördel också användas för att studera hur olika parametrar påverkar anläggningens verkningsgrad.

Beräkningsmodellens riktighet har utvärderats genom att uppmätta och beräknade värden jämförts för strålningsintensiteter och den förångade mängden fukt från pappersytan. Dessa jämförelser visar att modellen stämmer väl överens med verkligheten, och därför bör kunna användas för att simulera energiflödena i den industriella anläggningen. Modellen kan sannolikt användas även för andra liknande anläggningar, men för att få belägg för detta krävs flera mätningar vid varierande tillstånd.

Resultaten från utvärderingen visar att anläggningens strålningsverkningsgrad i dagsläget är 39% då strålaren körs på full effekt, dvs då alla strålarelement är tända. Då endast halva effekten utnyttjas är strålningsverkningsgraden 35%. Strålningsverkningsgraden anger i detta fall hur stor andel av bränslets effektiva värmeenergi som avges från strålarelementen i form av strålningsenergi. Verkningsgraden avseende den strålning som träffar pappersytan är 35% respektive 33%. Den totala verkningsgraden för papperstorkningen är 31% vid full effekt och 28% vid halv effekt. Totala verkningsgraden är ett mått på hur stor andel av den tillförda energin som totalt sett tas upp av papperet.

: .

Innehållsförteckning

...

.

1. Inledning	1
2. Gaseldade IR-strålarens uppbyggnad	2
3. Beräkningsmodell.	6
3.1 Modellens uppbyggnad	6
3.2 Beräkningsgång	6
3.3 Förbränningsmodell	9
3.4 Strålningsmodell	11
3.4.1 Strålningsbalanser	11
3.4.2 Bestämning av gasskiktets emissivitet och absorptivitet	11
3.4.3 Bestämning av de s k vinkelkoefficienterna	13
3.5 Bestämning av förångad mängd fukt från pappersytan	14
3.6 IR-strålarens och gasskiktets temperatur	15
4. Mätningar för utvärdering av den teoretiska modellen	17
4.1 Utförda mätningar och mätutrustning	17
4.1.1 Aktuella produktionsförhållanden	17
4.1.2 Uppmätta parametrar och mätinstrument	17
4.2 Mätresultat	19
5. Simuleringsberäkningar	22
5.1 Indata till beräkningarna	22
5.2 Resultat från beräkningarna	24
5.3 Energiflödesschema för anläggningen	25
6. Slutsatser	27
6.1 Beräkningsmodellens överrensstämmelse med mätdata	27
6.1.1 Förångad fukt från papperet	27
6.1.2 Strålningintensitetet	27
6.2 Energiverkningsgrader	28
6.3 Jämförelse med Centre Technique du Papier (CTP)	30
7. Förslag till förbättrad energiverkningsgrad	31
7.1 Ytterligare förvärmning av förbränningsluften	31
7.2 Minskat luftöverskott och spolluftflöde till förbränningen	31
7.3 Minskad nedsmutsning av IR-strålarens yta	32
8. Använda formelbeteckningar	35
9. Referenser	37

. ..

.

τ. ·

1. Inledning.

Teorin kring gaseldade IR-strålare och dess användning för papperstorkning är i dagsläget tämligen okänd. För att få förståelse för vilka parametrar som inverkar på en IR-strålares funktion och energiverkningsgrad har därför en matematisk beräkningsmodell utvecklats. Modellen har därefter använts till att beräkna energianvändningen i en industriell anläggning. IR-strålaren används där till att torka en bestruken pappersyta.

En utvärdering av modellen har gjorts genom att uppmätta värden på strålningsintensiteten vid strålarytan och vid pappersytan har jämförts med beräknade värden. En jämförelse kan också göras för den förångade mängden fukt från pappersytan. Resultaten från båda dessa jämförelser visar på en god överrensstämmelse mellan beräknade och uppmätta värden. Det tyder på att den matematiska beräkningsmodellen bör kunna användas för att på ett riktigt sätt simulera energiflödena i anläggningen. Strålningsintensiteterna har uppmätts av Drifttekniska Institutionen i Malmö och en beskrivning av mätmetod och resultat ges i del två av denna rapport.

Beräkningsmodellen har använts till att simulera olika parametrars inverkan på IR-strålarens strålningsverkningsgrad och den totala energiverkningsgraden för papperstorkning. Utifrån det ges förslag på hur anläggningens effektivitet kan förbättras.

Arbetet har initierats av Per-Arne Persson på Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) och förutom SGC har arbetet finansierats av Nordiskt Gastekniskt Center, NUTEK och Neste Gas.

1

2. Gaseldade IR-strålarens uppbyggnad.

I gaseldade IR-strålare utnyttjas energin hos förbränningsgaser till att alstra värmestrålning. Förbränning av gas sker vid en yta som därigenom värms upp till en hög yttemperatur. Från ytan avges värmestrålning som är proportionell mot ytans temperatur enligt följande samband:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{A}_{\mathbf{s}} \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{s}} \boldsymbol{\sigma} \mathbf{T}_{\mathbf{s}}^{4} \tag{2.1}$$

Den energi som avges som värmestrålning från ytan kan beräknas utifrån hur mycket energi som avges från förbränningsgaserna enligt:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{m}_{avgas} \mathbf{C}_{p, avgas} (\mathbf{T}_{ad} - \mathbf{T}_{g})$$
(2.2)

Den IR-strålare som studerats i detta fall, och som är avsedd att förånga fukt från en pappersyta, illustreras i nedanstående figur.



Figur 1. Principen för den gaseldade IR-strålaren.

Bränslet, som i detta fall är gasol, och förbränningsluften blandas vid strålarens yta. Bränslet antänds och avger förbränningsvärme till ytan som därmed uppnår en hög temperatur. Från den heta ytan avges värmestrålning till en bestrålad yta (i detta fall en pappersyta). Strålarytan består av ett flertal mindre strålarelement av en porös metall som är placerade intill varandra. Längs ytterkanterna av strålaren blåses spolluft in för att kyla metallramen. Dessutom sänker spolluften partialtrycket av vattenånga i gasskiktet, vilket förbättrar avdunstningen av fukt från den bestrålade pappersytan. I längdriktningen finns i mitten ett utsug av avgaser, där såväl förbränningsgaser som spolluft sugs ut (se figur på nästa sida).



Figur 2. Schematisk bild av IR-strålaren sedd underifrån. Endast tre strålarelement är utritade, totalt har den industriella anläggning som undersökts 44 st i varje rad.

Tillflödet av bränsle och luft värmeväxlas mot utgående avgaser genom att kanalerna löper parallellt mot varandra enligt figur 3 och 4. Detta medför att temperaturen på bränsle och förbränningsluft inte är känd vid inloppet till förbränningen. Inte heller spolluftens temperatur vid utloppet mot pappersytan är känd.







Figur 4. Tvärsnitt av IR-strålaren. Ingående luft och bränsle värmeväxlas mot utgående avgaser.

IR-strålaren används till för att torka pappersbanans yta efter det att papperet bestrykits på båda sidor med ett ytskikt. Efter IR-torken går pappersbanan vidare till ett torkparti där papperet sluttorkas till färdig produkt. Eftersom papperet bestrykes på båda sidor finns en IR-strålare riktad mot både ovan- och undersidan (se fig 5 nedan).



Figur 5. IR-strålarens placering i pappersmaskinen.

För att ytterligare förvärma förbränningsluften finns en värmeväxlare som överför värme från de utgående avgaserna till den ingående förbränningsluften. Hur stor av de utgående avgaserna som ska värmeväxlas kan regleras genom att leda avgaserna förbi värmeväxlaren. Detta görs helt enkelt med ett spjäll. Hela den anläggning som innefattar IR-strålaren visas schematiskt i figur 6 nedan.



Figur 6. Processchema för IR-strålaren.

3. Beräkningsmodell.

3.1 Modellens uppbyggnad.

Den beräkningsmodell som utvecklats avser att bestämma energiöverföringen från IR-strålaren till pappersytan. Strålare finns riktade både mot ovan och undersidan av pappersytan och förhållandena antas symmetriskt lika på de båda sidorna. Strålningen som emitteras från IR-strålaren transmitterar mestadels genom gasskiktet och träffar pappersytan. Största delen absorberas av papperet, men en liten del kommer även att reflektera tillbaka eller transmittera genom pappersytan. Papperet kommer även att tillföras energi via konvektiv värmeöverföring från gasskiktet. Energin som tas upp av papperet åtgår till att förånga fukt eller till att höja papperets temperatur.

Utifrån en strålningsbalans och flera olika energibalanser kan strålningsintensiteter och den avdunstade mängden vatten från pappersytan beräknas. Beräkningarna ger också en bild av vart den tillförda energin tar vägen i anläggningen och vilken energiverkningsgrad anläggningen har. Schematiskt kan energiöverföringen mellan IR-strålarna och pappersytan, och de parametrar som ingår i beräkningarna, illustreras enligt figur 7 nedan. För pappersbanan begränsas systemområdet till ytan rakt under IR-strålaren. Någon hänsyn tas i detta läge alltså inte till att en del av strålningen även träffar pappersbanan utanför systemområdet. Hänsyn till det tas dock vid beräkning av den avdrivna mängden fukt totalt sett och anläggningens totala verkningsgrad.



Figur 7. Energiöverföring mellan IR-strålaren och pappersytan. IR-strålaren sedd från pappersbanans riktning.

3.2 Beräkningsgång.

Beräkningarna kan övergripande delas in i fyra olika steg:

1. En förbränningsmodell som bestämmer förbränningstemperaturen och de olika komponenternas koncentrationer i avgaserna.

- 2. En strålningsmodell som bestämmer värmestrålningen från strålarens yta, gasskiktet och pappersytan.
- 3. En energibalans över pappersytan som bestämmer mängden avdriven fukt från papperet.
- 4. Energibalanser över IR-strålarens yta och över gasskiktet för att bestämma dess respektive temperaturer.

Resultaten från steg 2, 3 och 4 är beroende av varandra, varför beräkningarna måste göras iterativt. Beräkningsgången kan schematiskt illustreras enligt figur 8 på nästa sida.

Indata till beräkningarna är följande:

- Temperatur, flöde och sammansättning på ingående bränsle, förbränningsluft och spolluft.
- IR-strålarens effektiva yta, totala konvektionsytan och strålande ytans emissivitet.
- Tjockleken på gasskiktet mellan strålarytan och pappersytan.
- Papperets emissivitet och absorptivitet, samt värmekapacitet.
- Papperets temperatur före och efter IR-strålaren.
- Produktionshastighet för papperet.
- Avgasernas hastighet över pappersytan och karakteristiska längden för flödet.

De utgående data som modellen beräknar är

- Avgasernas flöde och sammansättning, samt förbränningstemperaturen.
- Strålarens yttemperatur och gasskiktets (avgasernas) temperatur.
- Strålningsintensiteten från strålaren, gasskiktet och pappersytan.
- Strålningsförluster.
- Konvektiva värmeöverföringen från strålarytan till gasskiktet respektive från gasskiktet till pappersytan.

- Avdriven mängd fukt från pappersytan.

- IR-strålarens strålnings- och energiverkningsgrad.



Figur 8. Beräkningsgång för modellen.

3.3 Förbränningsmodell.

Vid bestämning av koncentrationerna i avgaserna antas att förbränningen av kolväten är fullständig och att förbränningsluften och spolluften endast består av kvävgas och syrgas. I modellens formler har komponenterna följande index:

i=1	Metan	i=5	Kvävgas
i=2	Etan	i=6	Syrgas
i=3	Propan	i=7	Koldioxid
i=4	Butan	i=8	Vattenånga

Minimala behovet av förbränningsluft för att få en fullständig förbränning beräknas enligt:

$$F_{l,t} = \frac{4.76 F_{gas}}{100} \left[\sum_{i=1}^{4} (i + \frac{i+1}{2}) y_{gas,i} \right]$$
(3.1)

Överskottsluften beräknas som

$$\mathbf{F}_{\text{överskott}} = \mathbf{F}_{l} - \mathbf{F}_{l, t} \tag{3.2}$$

och överskottsfaktorn är

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{F}_1}{\mathbf{F}_{1,t}} \tag{3.3}$$

Avgasflödet kan nu beräknas som

$$\mathbf{F}_{\text{avgas}} = \mathbf{F}_{\text{avgas}, t} + \mathbf{F}_{\text{överskott}} \tag{3.4}$$

där Favgas,t är det teoretiska avgasflödet enligt

$$F_{avgas, i} = 0.79 F_{I} + \left[\frac{F_{gas}}{100} \left(\sum_{i=1}^{4} \left(i + \frac{2i+2}{2} \right) y_{gas, i} + \sum_{i=5}^{8} y_{gas, i} \right) \right]$$
(3.5)

Koncentrationerna i avgaserna ges av

$$y_{avgas, N_2} = \frac{y_{gas, N_2} F_{gas} + 79 F_1}{F_{avgas}}$$
(3.6)

$$y_{avgas, O_2} = \frac{21F_{överskot}}{F_{avgas}}$$
(3.7)

$$y_{avgas, CO_{2}} = \frac{F_{gas} \left[y_{gas, CO_{2}} + \sum_{i=1}^{4} i y_{gas, i} \right]}{F_{avgas}}$$
(3.8)
$$y_{avgas, H_{2}O} = \frac{F_{gas} \sum_{i=1}^{4} (i+1) y_{gas, i}}{F_{avgas}}$$
(3.9)

Koncentrationerna i de utspädda fuktiga avgaserna, dvs de som även innehåller spolluft och förångad fukt från papperet, beräknas på motsvarande sätt. Skillnaden är att spolluften och den avdrivna volymsmängden fukt adderas till F_{avgas} i nämnaren så att totala avgasflödet blir något högre. Spolluftens och fuktens bidrag ska givetvis också adderas till täljaren i uttrycken för kvävgas-, syrgas- och vattenångkoncentrationen.

Entalpin hos förbränningsgaserna beräknas ur en energibalans över förbränningen enligt:

$$H_{avgas} = \frac{F_{gas}(H_{gas} + H_{eff}) + F_{I}H_{I}}{F_{avgas}}$$
(3.10)

Entalpin för de olika komponenterna i gaserna beräknas ur

$$H(y_i, T) = \int_{273.15}^{T} \sum_{i=1}^{8} y_i C_{p,i} dT$$
(3.11)

Temperaturen är given i Kelvin och värmekapaciteten för de olika komponenterna beräknas ur följande korrelation

$$C_{p,i}(J/molK) = A + BT + CT^{2} + DT^{3}$$
 (3.12)

Konstanterna A, B, C och D är för kolvätena tagna från Reid et al [1] och för övriga gaser anpassade till data i Mörtstedt [2].

Entalpierna görs om till lämplig enhet enligt

$$H(J/kg) = \frac{H(J/mol) 1000}{M}$$
 (3.13)

Entalpin hos förbränningsgaserna kommer att vara en funktion av den adiabatiska förbränningstemperaturen, koncentrationen av de olika komponenterna och värmekapaciteten. Den adiabatiska förbränningstemperaturen kan alltså beräknas med en iterativ teknik enligt Newton-Raphson.

$$T_{ad} = f(H_{avgas}, y_{avgas, i}, C_p)$$
(3.14)

3.4 Strålningsmodell.

3.4.1 Strålningsbalanser

Den strålning som förekommer härrör från tre olika källlor; IR-strålarens yta, gasskiktet mellan strålaren och papperet, och strålning från pappersytan.

Med beteckningar enligt figur 7 kan strålningen beräknas enligt följande samband:

$$J_1 = \varepsilon_s \sigma T_s^4 + \rho_s G_1 = \varepsilon_s \sigma T_s^4 + (1 - \varepsilon_s) G_1$$
(3.15)

$$G_1 = \varepsilon_g \sigma T_g^4 F_{gs} + \tau_g J_2 F_{ps} = \varepsilon_g \sigma T_g^4 F_{gs} + (1 - \alpha_g) J_2 F_{ps}$$
(3.16)

$$J_2 = \varepsilon_p \sigma T_p^4 + (\rho_p + \tau_p) G_2 = \varepsilon_p \sigma T_p^4 + (1 - \alpha_p) G_2$$
(3.17)

$$G_2 = \varepsilon_g \sigma T_g^4 F_{gp} + \tau_g J_1 F_{sp} = \varepsilon_g \sigma T_g^4 F_{gp} + (1 - \alpha_g) J_1 F_{sp}$$
(3.18)

Dessa strålningsbalanser löses genom att eliminera J_1 och J_2 , och därefter lösa ut G_1 och G_2 med matrismultiplikation.

För IR-strålaren gäller

$$\alpha_s + \rho_s = 1$$

$$\rho_s = 1 - \alpha_s = 1 - \varepsilon_s$$
(3.19)

För papperet gäller

$$\alpha_{\rm p} + \rho_{\rm p} + \tau_{\rm p} = 1 \tag{3.20}$$

Reflektiviteten för gasskiktet sätts till noll, vilket ger

$$\begin{aligned} \alpha_g + \tau_g &= 1 \\ \tau_g &= 1 - \alpha_g \end{aligned} \tag{3.21}$$

Emissiviteten ε_s har i beräkningarna approximerats till 0.9. Papperets emissivitet (ε_p) och absorptivitet (α_p) har i enlighet med mätningar (delrapport 2, [10]) antagits vara 0.8. För gasskiktet har ε_g och α_g beräknats enligt kapitel 3.4.2.

 F_{gp} , F_{gs} , F_{ps} och F_{sp} är de s k vinkelkoefficienterna som utgör ett mått på hur stor andel av den avgivna strålningen från en yta som träffar den bestrålade ytan. Metoden att beräkna dessa visas i kapitel 3.4.3.

3.4.2 Bestämning av gasskiktets emissivitet och absorptivitet.

Gaser är i många fall transparenta för strålning. Icke-polära gaser som N₂ och O₂ är generellt sett transparenta vid låga temperaturer, medan polära gaser som CO₂, H₂O och vissa kolväten till viss del kommer att avge strålning. I denna modell kommer hänsyn till gassstrålning att tas

för CO₂ och H₂O. Ekvationerna är hämtade från VDI-Värmeatlas [3] som baseras på resultat av Schack [4].

Emissiviteten för koldioxid beräknas enligt:

$$\varepsilon_{\rm CO_2} = a_0 + a_1 \gamma + a_2 \gamma^2 + a_3 \gamma^3 \tag{3.22}$$

$$\gamma = (1273 - T_g) / 1000 \tag{3.23}$$

$$\mathbf{a}_{i} = \frac{\mathbf{b}_{i}(\mathbf{p}_{CO_{2}}\mathbf{s})^{\mathbf{n}_{i}}}{\mathbf{c}_{i} + (\mathbf{p}_{CO_{2}}\mathbf{s})^{\mathbf{n}_{i}}} + (\mathbf{a}_{\infty i} - \mathbf{b}_{i})\frac{(\mathbf{p}_{CO_{2}}\mathbf{s})^{\mathbf{m}_{i}}}{\mathbf{d}_{i} + (\mathbf{p}_{CO_{2}}\mathbf{s})^{\mathbf{m}_{i}}}$$
(3.24)

$$s = \frac{3.6 V_g}{A_s}$$
(3.25)

Temperaturen anges i K, partialtrycken i bar och ekvivalenta skikttjockleken i m. Koefficienterna ges av följande tabell.

Tabell 1. Koefficienter till ekvation 3.24.

i	800	b	с	d	m	n
0	0.252	0.1166	0.04	0.477	1.542	0.802
1	0.01	0.0658	0.0245	1.712	0.25	0.715
2	-0.0955	-0.0535	0.013	0.115	2.45	1.076
3	-0.0303	-0.0806	0.0816	0.691	0.13	0.495

Emissiviteten för vatten ges av:

$$\varepsilon_{\rm H_{2O}} = \varepsilon_{\infty} (1 - \exp(-f(p_{\rm H_{2O}}s)g(p_{\rm H_{2O}}s,T_{\rm g})))$$
(3.26)

$$\varepsilon_{\infty} = 0.747 - 0.168 \cdot 10^{-3} T_{g} \tag{3.27}$$

$$f(p_{H_2OS}) = (1.785 - 0.039 p_{H_2OS} + 0.2436 (p_{H_2OS})^2) p_{H_2OS}$$
(3.28)

$$g(p_{H_2OS}, T_g) = 1 + \frac{0.11923}{0.137 + (p_{H_2O})^{0.79}} (10^{-3} T_g - 0.273 - \frac{0.99}{0.495 + (p_{H_2OS})^4})^2$$
(3.29)

Den totala gasemissiviteten beräknas enligt

$$\varepsilon_{\text{gas}} = (\varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}})\mathbf{f}_k \tag{3.30}$$

$$f_{k} = 1 + \frac{0.25\sum ps}{0.11 + \sum ps} (1 - z) \ln(1 - z)$$
(3.31)

$$z = \frac{p_{CO_2}s}{\sum ps}$$
(3.32)

$$\sum \mathbf{ps} = \mathbf{p}_{\mathrm{CO}_2}\mathbf{s} + \mathbf{p}_{\mathrm{H}_2\mathrm{O}}\mathbf{s} \tag{3.33}$$

Absorptiviteten beräknas på motsvarande sätt, vilket ger:

$$\alpha_{gas} = \alpha_{CO_2} + \alpha_{H_2O} - (\Delta \varepsilon)_w \tag{3.34}$$

$$-\Delta \varepsilon = (\varepsilon_{\rm CO_2} + \varepsilon_{\rm H_2O})(1 - f_k) \tag{3.35}$$

$$\alpha_{\rm CO_2} = \varepsilon_{\rm CO_2} (T_{\rm w}, {\rm sp}_{\rm CO_2} \frac{T_{\rm w}}{T_{\rm g}}) (\frac{T_{\rm g}}{T_{\rm w}})^{0.65}$$
(3.36)

$$\alpha_{\rm H_{2O}} = \epsilon_{\rm H_{2O}} (T_{\rm w}, sp_{\rm H_{2O}} \frac{T_{\rm w}}{T_{\rm g}}) (\frac{T_{\rm g}}{T_{\rm w}})^{0.45}$$
(3.37)

 T_w är väggtemperaturen för en innesluten gas. I detta fall sätts T_w till medelvärdet mellan strålarens temperatur och pappersytans temperatur. Absorptiviteten är inom det aktuella temperaturintervallet bara svagt beroende av vilken temperatur som används.

3.4.3 Bestämning av de s k vinkelkoefficienterna.

Vinkelkoefficienterna utgör ett mått på hur stor andel av den strålning som lämnar en yta som träffar den bestrålade ytan (se figur 9). I vårt fall utgörs ytorna av IR-strålarens effektiva strålaryta och den pappersyta som befinner sig vinkelrät under strålarytan. Ytorna är lika stora.



Figur 9. Strålning mellan två ytor.

Den strålning som faller utanför den strålande respektive mottagande ytan, och som kan reflekteras tillbaks till strålarytan, försummas då strålningsintensiteten beräknas ur strålningsbalanserna. Enligt referens 5 kan vinkelkoefficienterna då beräknas enligt ekvation 3.38. En stor del av den "förlorade" strålningen kommer dock att träffa pappersytan utanför den yta som ligger vinkelrät under IR-strålaren, och där ha möjlighet att absorberas av pappersytan. Hänsyn till denna del tas vid beräkning av den avdrivna mängden fukt från papperet och IR-torkens totala verkningsgrad.

$$F_{ytor} = \frac{2}{\pi xy} \left(\ln \left[\frac{(1+x^2)(1+y^2)}{1+x^2+y^2} \right]^{0.5} + x\sqrt{1+y^2} \tan^{-1}(\frac{x}{\sqrt{1+y^2}}) + y\sqrt{1+x^2} \tan^{-1}(\frac{y}{\sqrt{1+x^2}}) - x\tan^{-1}(x) - y\tan^{-1}(y) \right) + y\sqrt{1+x^2} \tan^{-1}(\frac{y}{\sqrt{1+x^2}}) + x\sqrt{1+y^2} \tan^{-1}(\frac{y$$

(3.38)

$$\mathbf{x} = \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{c}} \tag{3.39}$$

$$y = \frac{b}{c}$$
(3.40)

a och b är rektangelns längd respektive bredd, och c avståndet mellan rektanglarna. Vid beräkning av F_{gp} och F_{gs} , dvs vinkelkoefficienten för strålning till/från gasskiktet, har c satts till halva avståndet mellan strålarens yta och pappersytan.

3.5 Bestämning av förångad mängd fukt från pappersytan.

Strålningen beror av strålarens yttemperatur (T_s) och gasskiktets temperatur (T_g) . Dessutom beror den indirekt av hur stor mängd fukt som förångas, eftersom koncentrationen av de olika komponenterna i gasen påverkar gasens absorbans och emittans (se kap 3.4.2). Hur stor mängd fukt som förångas från ytan under IR-strålaren bestäms ur en energibalans över pappersytan enligt:

$$2(G_2 - J_2)A_s + 2E_{konv, gp} = m_{p,ut}H_{p,ut} - m_{p,in}H_{p,in} + m_{fukt}H_{fukt}$$
(3.41)

Ekonv,gp utgör den konvektiva värmeöverföringen från gasskiktet till pappersytan enligt:

$$\mathbf{E}_{konv,gp} = \mathbf{h}\mathbf{A}_{konv}(\mathbf{T}_{g} - \mathbf{T}_{p,m}) \tag{3.42}$$

Papperet består av fibrer, bestrykningsmaterial och fukt. Papperets entalpi kan därför delas upp enligt följande:

$$m_{p, ut} H_{p, ut} = m_{p, ut} C_{p, p, ut} T_{p, ut} = (m_f C_{p, f} + m_b C_{p, b} + m_v C_{p, v}) T_{p, ut}$$
(3.43)

$$m_{p,in} H_{p,in} = m_{p,in} C_{p,p,in} T_{p,in} = (m_f C_{p,f} + m_b C_{p,b} + m_v C_{p,v} + m_{fukl} C_{p,v}) T_{p,in}$$
(3.44)

$$H_{\text{fukl}} = C_{p,v} T_{p,in} + C_{p,v} (T_{p,m} - T_{p,in}) + \Delta H_{vap} + C_{p,a} (T_g - T_{p,m})$$
(3.45)

där index f, b och v betecknar fiber, bestrykningsmaterial respektive vatten. Förångningen av fukt från papperet antas ske vid pappersytans temperatur. Pappersytans temperatur varierar över intervallet och approximeras därför med medeltemperaturen $T_{p,m}$.

$$T_{p,m} = (T_{p,in} + T_{p,ut})/2$$
(3.46)

Då ekvation 3.41 kombineras med 3.42-3.45 erhålles:

$$(G_2 - J_2)2A_s + 2E_{konv,gp} = m_{p,ut}C_{pp,ut}(T_{p,ut} - T_{p,in}) + m_{fukt}(C_{p,v}(T_{p,m} - T_{p,in}) + \Delta H_{vap} + C_{p,a}(T_g - T_{p,m}))$$
(3.47)

 $C_{\text{D},å}$ är värmekapaciteten för mättad ånga vid $T_{å,m}$ som är medeltemperaturen för förångning.

$$T_{a,m} = (T_{p,m} + T_g)/2$$
(3.48)

Förångningsentalpin Δ Hvap beräknas vid papperets medeltemperatur T_{p,m}.

Värmeöverföringstalet h vid den konvektiva värmeöverföringen beräknas ur Nusselttalet enligt följande korrelation [6]:

$$Nu = \frac{0.037 \text{Re}^{0.61} \text{Pr}}{1 + 2.443 \text{Re}^{-0.1} (\text{Pr}^{2/3} - 1)}$$
(3.49)
$$Nu = h \frac{L}{k} \qquad \text{Re} = vL \frac{\delta}{\mu} \qquad \text{Pr}=0.72$$

Den avdrivna fukten kommer för varje T_s och T_g att beräknas iterativt tills gasskiktets emissivitet och absorptivitet inte längre varierar mellan itereringsstegen.

Som kommenterades i kapitel 3.4.3 kommer även en del strålning att träffa pappersytan utanför området under IR-strålaren. I energibalansen över pappersytan har denna strålningsmängd inte medräknats. Hänsyn till detta tas dock vid beräkning av det slutliga värdet för den avdrivna mängden fukt i kapitel 5.2.

3.6 IR-strålarens och gasskiktets temperatur.

IR-strålarens yttemperatur Ts kan bestämmas ur en energibalans över strålarens yta enligt:

$$F_{ut}H_{ut} + G_1 2A_s = F_{ut}H_b + J_1 2A_s + 2E_{konv,sg}$$
(3.50)

Ekonv, sg utgör den konvektiva värmeöverföringen från strålarens yta till gasskiktet enligt:

$$\mathbf{E}_{\text{konv, sg}} = \mathbf{h} \mathbf{A}_{\text{konv}} (\mathbf{T}_{\text{s}} - \mathbf{T}_{\text{g}}) \tag{3.51}$$

Arean och konvektiva värmet multipliceras med en faktor två eftersom balansen innefattar två strålarytor.

Gasskiktets temperatur T_g bestäms på motsvarande sätt ur en energibalans över gasskiktet enligt ekvation 3.52 på nästa sida.

 $F_{avgas}H_s + F_{spol}H_{spol} + (J_1 + J_2)2A_s + 2E_{konv,sg} + m_{fukl}H_{fukl} = F_{favgas}H_g + (G_1 + G_2)2A_s + 2E_{konv,gp} + Strålförl$

(3.52)

Strålningsförlusterna beräknas enligt:

Strålförl =
$$(J_1 + J_2)(1 - F_{sp}(1 - \alpha_g) - F_{gs}\alpha_g)2A_s + 2\varepsilon_g\sigma T_g^4(1 - F_{gs})2A_s$$
 (3.53)

Som nämnts tidigare (bl a kapitel 3.1 och 3.4.3) kommer en del av strålnings-"förlusterna" enligt ekvation 3.53 att absorberas av pappersytan utanför systemområdet.

Hela beräkningsgången itereras med avseénde på T_g och T_s tills energibalanserna 3.50 och 3.52 ovan uppfylls. I itereringarna ingår alltså beräkning av värmestrålningen ur strålningsbalanserna och förångad mängd fukt ur energibalansen över pappersytan, samt bestämning av de ingående entalpierna i energibalanserna ovan. Itereringen görs utifrån de två energibalanserna balanserna med en multidimensionell Newton-Raphson metod.

4. Mätningar för utvärdering av den teoretiska modellen.

4.1 Utförda mätningar och mätutrustning.

4.1.1 Aktuella produktionsförhållanden.

För att verifiera den teoretiska modellen utfördes mätningar på en industriell anläggning. Mätningarna gjordes vid två olika tillfällen. Vid första tillfället producerades ett papper med ytvikten 98 g/m² och IR-strålaren kördes då på full effekt. Vid andra tillfället hade papperet ytvikten 70 g/m² och då utnyttjades bara IR-strålarens halva effekt, dvs en rad på vardera sidan var tänd. Produktionsförhållandena vid de två tillfällena var följande.

	Fyra rader tända (1:a tillfället)	Två rader tända (2:a tillfället)
Ytvikt pope (g/m ²)	98	70
Fukt pope (vikt%)	5.6	5.4
Torr ytvikt (medelvärde) (g/m ²)	92	66.3
Pålagd bestrykningssmet (g/m ²)	16	9.7
Produktionshastighet (ton/h)	27.6	21.5
Pope hastighet (m/min)	713	792
Pappersbredd (m)	6.62	6.62

4.1.2 Uppmätta parametrar och mätinstrument.

De parametrar som uppmättes var:

- Flöden och temperaturer på ingående bränsle, förbränningsluft och spolluft.
- Avgasernas flöde och temperatur, samt absoluttrycket vid den aktuella mätpunkten.
- Papperets temperatur före respektive efter IR-strålaren.
- Förångad mängd fukt från pappersytan.

- IR-strålarens dimensioner.

Mätningarna utfördes med följande instrument:

- Flöde och temperatur på ingående bränsle avlästes på befintlig instrumentering. Även aktuellt matningstryck för bränsle, förbränningsluft, spolluft vid inloppet till IR-strålaren avlästes på instrumenteringen.

- Flödet hos förbränningsluft och spolluft uppmättes genom att mäta differensen mellan statiska och dynamiska trycket i luftkanalerna. Tryckdifferensen uppmättes med ett pitotrör. De erhållna värdena stämde bra överens med fläktarnas driftskurvor. Temperaturen hos förbrännings- och spolluften uppmättes med ett termoelement i luftkanalerna.

- Avgasernas flöde var svårt att mäta pga att ingen bra mätpunkt hittades. Det värde som använts vid beräkningarna har hämtats ur avgasfläktens driftskurva.

- Pappersbanans temperatur uppmättes med ett IR-instrument från Linear Laboratories typ

M 400-A, som var placerat i en metallcylinder. Instrumentet kyldes med tryckluft som spolades in i toppen av cylindern. Luften spolades också ut på mätlinsen för att undvika kondensation. Då instrumentet användes sattes det fast på en träpinne som kunde stickas in parallellt med pappersbanan (figur 10 nedan). Mätningarna gjordes på ett avstånd av ca 0.5-1 meter från IRstrålaren. IR-instrumentet registrerar värmestrålningen som sedan omräknas till aktuell yttemperatur.



Figur 10. Principen för hur IR-instrumentet användes.

- Förångade mängden fukt beräknades utifrån papperets ytvikt före och efter strålaren. Ytvikten uppmättes med ett instrument av typen NDC 100 T från NDC Systems i USA (figur 11 a och 11 b). På samma sätt som med IR-instrumentet fästes instrumentet på en pinne som fördes in parallellt med pappersbanan. Även i detta fall låg mätpunkten ca 0.5-1 meter från IRstrålaren. I instrumentet sitter en svag radioaktiv källa som utsänder γ -strålning. Principen för instrumentet är att mäta hur mycket av den emitterade strålningen som reflekteras mot mätaren. Reflektionen är endast beroende av den totala massan som ligger framför fönstret. Hänsyn måste dock tas till reflektion från bakomliggande ytor då dessa ligger inom nära avstånd (ca 1 meter). Mätobjektet måste ligga på ett bestämt avstånd från strålkällan, vilket åstadkoms genom att pappersbanan vilar mot en rund distansring på instrumentet. Felmarginalen för avläsning ligger i storleksordningen ±1 g/m².



Figur 11a. Ytviktsmätare (sedd från sidan)

Figur 11b. Bottenplattan (sedd underifrån)

4.2 Mätresultat.

Gasernas flödeshastighet:

De flöden som uppmättes vid första tillfället gjordes med ett otillförlitligt pitotrör och kunde inte användas. Eftersom de fläktar som blåser in luft, respektive suger ut avgaser, arbetar vid samma effekt oavsett hur många rader som är tända på IR-strålaren är det dock möjligt att använda de flöden som uppmättes vid det andra tillfället. De uppmätta differenstrycken för förbrännings- och spolluft räknades om till volyms- och massflöden med nedanstående samband.

Flödet beräknas ur differenstrycket enligt:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \delta v^2 \tag{4.1}$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{v}\mathbf{A}_{\mathbf{t}\mathbf{v}} \tag{4.2}$$

Normalflödet beräknas därefter enligt allmänna gaslagen:

$$\mathbf{F}_{n} = \frac{\mathbf{p}\mathbf{F}\mathbf{T}_{n}}{\mathbf{p}_{n}\mathbf{T}} \tag{4.3}$$

där index n står för normaliserat tillstånd (1 bar, 273 K).

Volymsflöden kan omräknas till massflöden med allmänna gaslagen enligt

$$\mathbf{m} = \mathbf{F}_{\mathbf{n}} \frac{\mathbf{M} \mathbf{p}_{\mathbf{n}}}{\mathbf{R} \mathbf{T}_{\mathbf{n}}} \tag{4.4}$$

där M är molvikten för den aktuella gasen.

Följande resultat erhölls (vid andra mättillfället):

	Bränsle	Förbr.luft	Spolluft -	Avgaser
Uppmätt diffcrenstryck (Pa)		430	210	
Beräknad strömn.hast. (m/s)		26	19	
Tvärsnittsarea (m ²)		0.031	0.13	
Beräknat volymsflöde (m ³ /s)		0.80	2.4	4.4
Aktuellt absoluttryck (bar)	1.63	1.06	1.00	1.00
Temperatur (°C)	31	39	24	166
Beräknat volymsflöde (Nm ³ /s)	0.0087	0.70	2.3	2.8 (via utlopp)
Beräknat massflöde (kg/s)	0.017	0.90	2.9	3.5

Endast halva mängden av ovan angiven förbränningsluft används till förbränning då bara två rader är tända. Den andra hälften fungerar som extra spolluft.
Vid det första mättillfället var bränsletillförseln dubbelt så hög och temperaturen upp.mättes då till 35 °C.

Papperets fukthalt och temperatur:

Den förångade mängden fukt beräknas ur papperets ytvikt hos färdigt papper och pappershastigheten enligt:

(4.5)

$$m_{\text{first}} = \Delta \text{ ytvikt } \cdot \mathbf{v}_{p} \cdot \text{bredd}$$

Resultat:

	Fyra rader tända	Två rader tända
Ytviktsifferens (g/m ²)	1-2	0-1
Förångad mängd fukt (kg/s)	0.08-0.17	0-0.09
Pappersytans temperatur (°C)	In: 45 Ut: 66	In: 46 Ut: 57

Eftersom såväl temperatur som ytvikt uppmättes på avståndet 0.5-1 m från IR-strålaren kan det uppmätta värdet avvika lite från det verkliga *direkt* efter strålaren.

Strålarens dimensioner:

Strålaren utgörs av två rader på vardera sidan med 44 st värmeelement per rad. Värmeelementen har måtten 19x14 cm (höjd x bredd). Den totala längden för strålningsytan är alltså 6.26 m och bredden 0.38 m då alla fyra raderna är tända. De totala måtten på hela ytan, dvs ytan som är mottaglig för konvektion, är 6.70 m resp 0.43 m. Då endast en rad på vardera sidan är tänd halveras både effektiva ytan och konvektiva ytan. Avståndet mellan strålarens yta och pappersytan är ca 10 cm.

Vid beräkning av Reynolds tal för den strömmande luften över pappersytan används värden på lufthastigheten och flödets karakteristiska längd. Lufthastigheten har approximativt antagits vara densamma som pappersbanans hastighet. Det approximativa värde som använts för karakteristiska längden är avståndet från mitten av strålaren till den punkt där pappers-banan ändrar riktning (dvs vid en cylinder). Medelvärdet av längsta och kortaste avståndet används $(L_1 \text{ resp } L_2 \text{ i figuren nedan})$. L₁ uppmättes till ca 1.8 m och L₂ till 1.6 m.



Figur 12. Karakteristiska längden för luftflödet.

Sammanfattande bild över uppmätta flöden och temperaturer:



Figur 13. Uppmätta flöden och temperaturer i anläggningen. (1 representerar tillfället då fyra rader var tända, 2 då två rader var tända).

5. Simuleringsberäkningar.

5.1 Indata till beräkningarna.

Följande indata till beräkningarna har använts:

Flödeshastigheter (enligt mätningar):

	Fyra rader tända	Två rader tända
Bränsle (Nm ³ /s)	0.018	0.0087
Förbränningsluft (Nm ³ /s)	0.74	0.37
Spolluft (Nm ³ /s)	2.3	2.7

Temperaturer på ingående flöden:

Som nämts tidigare (kapitel 2) värmeväxlas ingående bränsle, förbränningsluft och spolluft mot utgående avgaser inuti IR-strålarens hölje. Hur effektiv denna värmeväxlingen är till de olika ingående gaserna är obekant. Temperaturerna måste därför antagas utifrån bränslets och luftens uppmätta temperaturer innan värmeväxlaren. Antagandet kan göras så att den sammanlagda temperaturökningen motsvarar avgasernas energiavgivning enligt ekvation 5.1 nedan. Index i representerar de ingående flödena bränsle, förbränningsluft och spolluft. För värmekapaciteten har medelvärden för de aktuella temperaturintervallen använts.

$$m_{avgas}C_{p, avgas}\Delta T_{avgas} = \sum_{3}^{i=1} m_i C_{p, i}\Delta T_i$$
(5.1)

Detta ger dock en orimligt hög temperatur om den beräknade avgastemperaturen används. Det tyder på att kall luft dras med papperet in till IR-strålaren där den blandas med de varma avgaserna. Avgastemperaturen vid utsuget måste därför också betraktas som okänd. Det enda sättet att få en uppfattning om energiöverföringen från avgaserna, och därmed ingående flödens temperatur, är därför att beräkna ett approximativt värde på värmegenomgången genom kanalernas väggar utifrån ekvation 5.2 nedan. Ytornas storlek och temperaturerna inuti IR-strålaren är dock okända, vilket gör att beräkningarna bara ger ett mycket grovt värde.

$$\sum_{3}^{i=1} k_{i} A_{i} \Delta T_{i} = \sum_{3}^{i=1} m_{i} C_{p,i} \Delta T_{i}$$
(5.2)

Temperaturna på flödena har efter resonemang enligt ekvation 5.2 approximerats till följande:

	Fyra rader tända		Två rader tända	
	Till vvxl (uppmätt)	Från vvxl (antaget)	Till vvxl (uppmätt)	Från vvxl (antaget)
Bränsle (°C)	34	135	31	125
Förbränningsluft (°C)	80	135	73	125
Spolluft (°C)	35	45	34	40

Avgasernas temperatur efter värmeväxlingen var 199°C vid första tillfället och vid det andra tillfället 166°C.

Papperets temperatur och produktionsdata:

-	Fyra rader tända	Två rader tända
Temperatur före IR (°C)	45	46
Temperatur efter IR (°C)	66	57
Banhastighet (m/min)	713	792
Papperets bredd (m)	6.6	6.6
Total ytvikt (g/m ²)	98	70
Ytvikt fibrer (g/m ²)	76	57
Ytvikt bestr.material (g/m ²)	16	9.7
Fukthalt (efter IR-torken) (%)	5.6	5.4
Produktionshastighet (kg/s)	7.7	6.0

Dimensioner:

Effektiv strålaryta: 4.8 m² (4 rader). Konvektiv värmeöverföringsyta: 5.8 m² (4 rader). Avstånd mellan papperet och gasskiktet: 0.1 m (uppmätt approximativt). Karakteristiska längden för luftflödet:1.7 m.

Fysikaliska data:

De fysikaliska data som använts vid beräkningarna är följande:

Bränslets effektiva värmevärde (H _{eff})	90.3 MJ/Nm ³ [2]
(99 vol% propan, 1 vol% butan)	
Fuktens förångningsentalpi (ΔHvap)	2369 kJ/kg (55.5 °C)
	2378 kJ/kg (51.5 °C) [8]
Värmekapaciteten för torrt papper (Cp,f)	1256 J/kgK [6]
Värmekapaciteten för fukten i pappret (C _{p,v})	4180 J/kgK (60 °C). [2]
Värmekapaciteten för bestr.mtrl (Cp,bestr)	800 J/kgK (CaCO3 antaget) [7].
Värmekapaciteten för ånga (Cp,å)	1870 J/kgK (120 °C)
	1924 J/kgK (210 °C) [9]
Dynamiska viskositeten för luft (µ)	3.1·10 ⁻⁵ Pas (362 °C)
	2.5 10-5 Pas (193 °C) [3]
Värmekonduktiviteten för luft (k)	0.050 W/m°C (362 °C)
	0.039 W/m°C (193 °C) [3]
Papperets emissivitet (ε_p)	0.8
Papperets absorptivitet (α_p)	0.8
Strålarens emissivitet (E _s)	0.9
Avgasernas densitet (approximeras med	0.74 (1 atm, 193 °C)
densiteten för luft)	0.55 (1 atm, 362 °C)

Fuktens förångningsentalpi, värmekapaciteten för ånga, dynamiska viskositeten för luft och luftens värmekonduktivitet beräknas enligt korrelerade polynom, givna i respektive referenser.

5.2 Resultat från beräkningarna.

Från beräkningarna erhålles följande resultat:

	4 rader tända	2 rader tända
Flöden		<u>:</u>
Luftöverskottsfaktor (n)	1.63	1.69
Avdriven mängd fukt (m _{fukt}) ¹⁾	0.097 kg/s	0.049 kg/s
Tillfört effektivt värme (H _{eff})	1625 kW	785 kW
Temperaturer		
Gasskiktets temperatur (Tg)	362 °C	193 °C
Strålarytans temperatur (T _s)	995 °C	949 °C
Förbränningstemperatur (T _{ad})	1542 °C	1495 °C
Strålning		
Intensitet från strålarytan (J ₁)	133 kW/m²	115 kW/m ²
Intensitet till strålaytan (G1)	14 kW/m ²	7.7 kW/m ²
Intensitet från pappersytan (J ₂)	19 kW/m ²	13 kW/m ²
Intensitet till pappersytan (G ₂)	93 kW/m ²	65 kW/m ²
Total strålning från strålarytan	635 kW	273 kW
Total strålning till strålarytan	67 kW	18 kW
Total strålning från pappersytan ¹⁾	116 kW	51 kW
Total strålning till pappersytan ¹⁾	575 kW	255 kW
Totala strålningsförluster	49 kW	33 kW
Gasens absorptivitet (α_g)	0.09	0.05
Gasens emissivitet (Eg)	0.09	0.05
Vinkelfaktorer		
Mellan strålaren och papperet (F _{sp})	0.761	0.597
Mellan strålaren/papperet och gasskiktet (Fsg/Fgp)	0.871	0.766
Konvektiv värmeöverföring		
Mellan strålarytan och gas- skiktet (Ekony sg)	102 kW	78 kW
Mellan gasskiktet och papperet	50 kW	15 kW
(Ekonv,gp)		10
Verkningsgrad		
Strålningsverkningsgrad 1 ²⁾	39 %	35 %
Strålningsverkningsgrad 2 ³⁾	35 %	33 %
Total verkningsgrad ⁴⁾	31 %	28 %

 Beräknat med hänsyn till den strålning som träffar ytan utanför området under IR-strålaren (se ekvation 6.1 för avdriven mängd fukt).

- ²⁾ Strålningsverkningsgrad 1: Den andel av bränslets tillförda effektiva värmeenergi som avges som strålningsenergi från strålarytan ($2J_1A_s/H_{eff}$).
- ³⁾ Strålningsverkningsgrad 2: Den andel av bränslets tillförda effektiva värmeenergi som träffar pappersytan som strålningsenergi. Hänsyn tas även till den strålning som träffar ytan utanför området under IR-strålaren. ((2G₂A_s + J_{1,förl}(1-α_g))/H_{eff})
- ⁴⁾ Total verkningsgrad: Den andel av bränslets tillförda effektiva värmeenergi som upptas av pappersytan. Hänsyn tas även till den strålning som träffar pappersytan utanför området under IR-strålaren((2G₂A_s -2J₂A_s+2E_{konv,gp}+ J_{1,förl}(1-α_g)α_b)/H_{eff}).

5.3 Energiflödesschema för anläggningen.

Genom att lägga samman de enskilda energibalanserna för strålarytan, gaskiktet och pappersytan fås en total energibalans för hela anläggningen. Utifrån de beräknade energierna kan ett energiflödesschema ritas som enkelt visar hur energin används i anläggningen (figur 14 och 15). Schemat bygger på simuleringsberäkningar med indata enligt kapitel 5.2. Det bör poängteras att även den strålning som träffar pappersytan utanför området under IR-strålaren ingår i den mängd som betecknats som strålningsförluster.



Figur 14. Energiflödet i anläggningen det tillfälle då fyra rader var tända.



Figur 15. Energiflödet i anläggningen det tillfälle då två rader var tända.

6. Slutsatser.

6.1 Beräkningsmodellens överensstämmelse med mätdata.

6.1.1 Förångad fukt från papperet.

En jämförelse mellan beräknade och uppmätta värden kan göras dels för den förångade mängden fukt och dels för strålningsintensiteten vid IR-strålarens yta och pappersytan. Följande värden har uppmätts respektive beräknats för avdrivna fukten:

	Fyra rader tända		Två rader tända	
•	Beräknat	Uppmätt	Beräknat	Uppmätt
Avdriven mängd fukt (kg/s)	0.097	0.07-0.014	0.049	0-0.08

Den svaga avvikelsen, mellan modellens beräknade värde och det uppmätta värdet, ligger inom mätningarnas felmarginal. Mätningarna kan bara avläsas med en noggrannhet på 1 g/m², vilket motsvarade 0.07 kg/s vid första tillfället och 0.08 kg/s vid andra tillfället. Under första tillfället uppmättes en ytviktsdifferens på 5-6 g/m², men bakgrundsreflektionen motsvarade vid det tillfället ca 4 g/m². Vid det andra tillfället uppmättes differensen 0-1 g/m² utan bakgrundsreflektion.

Som nämndes tidigare kommer en del av den "förlorade" strålning som inte träffar pappersytan vinkelrät under strålaren ändå att ha möjlighet att absorberas av papperet utanför detta område. Eftersom ytvikten uppmättes ca 0.5-1 meter från IR-strålaren bör hänsyn därför tas till denna absorbtion, vid en jämförelse med det beräknade värdet. Det beräknade värdet blir annars för lågt. Hänsyn bör bara tas till förlusterna från J₁. Förlusterna från pappersytans strålning (J₂) kommer inte att träffa pappersytan och förlusten från gasstrålningen är i sammanhanget försumbar. Den avdrivna mängden fukt kan då beräknas enligt

 $E = (G_2 - J_2)2A_s + 2E_{konv,gp} + J_{1, forl}(1 - \alpha_g)\alpha_p$ $E = m_{p,ut}C_{pp,ut}(T_{p,ut} - T_{p,in}) + m_{fukt}(C_{p,v}(T_{p,m} - T_{p,in}) + \Delta H_{vap} + C_{p,\dot{a}}(T_g - T_{p,m}))$ (6.1)

E betecknar den energimängd som tas upp av papperet och $J_{1,förl}$ den strålning från J_1 som träffar pappersytan utanför systemområdet (enhet W). Jämför ekvation 3.47.

6.1.2 Strålningsintensitet.

För strålningsintensiteten från IR-strålarens yta (J_1) och pappersytan (J_2) kan följande värden jämföras:

-	Fyra rader tända		Två rader tända	
	Beräknat	Uppmätt	Beräknat	Uppmätt
Strålning från strålarytan (kW/m ²)	133		115	90-95 [10]
Strålning från pappersytan (kW/m ²)	19		13	13 [10]

Den stor avvikelsen för strålarytan förklaras av att effekten från strålarytan inte uppmätts precis vid ytan, och därför inte är jämförbar med det beräknade värdet för J_1 . Mäthuvudet var enligt uppgift placerat ungefär mitt emellan pappersbanan och strålarytan. Det uppmätta värdet bör därför jämföras med medelvärdet av strålarytans effekt (J_1) och den infallande strålningen

mot pappersytan (G₂). Detta värde ligger i storleksordningen 90 kW/m², vilket alltså stämmer bra med det uppmätta värdet.

För pappersytan har emissivitetstalet valts till 0.8 för att det beräknade och uppmätta värdet ska överensstämma.

6.2 Energiverkningsgrader.

Som även redovisats i kapitel 5.1 har nedanstående energiverkningsgrader beräknats. Förklaring till de olika verkningsgraderna ges i kapitel 5.1.

	Fyra rader tända	Två rader tända
Strålningsverkningsgrad 1	39%	35%
Strålningsverkningsgrad 2	35%	33%
Total verkningsgrad	31%	28%

Resultaten bygger till viss del på indata vars värden har antagits. De antagna indata som framförallt påverkar är följande:

- Temperaturen på ingående luft- och bränsleflöden.

- Emissivitetstalen för IR-strålaren och pappersytan.
- Absorptivitetstalet för papperet.
- Avståndet mellan strålarytan och pappersytan.

Hur stor påverkan dessa indata har på resultaten visas i figur 16-23 nedan. Basfall då en indataparameter varieras har varit de indata som angivits i kapitel 5.1.



Figur 16 och 17. Förvärmningstemperaturens inverkan på strålningsintensiteten J_1 , strålningsverkningsgrad 1 och totala energiverkningsgraden då fyra respektive två rader är tända.



Figur 18 och 19. Inverkan av strålarytans emissivitet på J_1 och strålningsverkningsgrad 1 då fyra respektive två rader är tända.



Figur 20 och 21. Inverkan av pappersytans emissivitet och absorptivitet på totala energiverkningsgraden då fyra respektive två rader är tända.



Figur 22 och 23. Inverkan av avståndet mellan strålarytan och pappersytan på totala energiverkningsgraden då fyra respektive två rader är tända.

6.3 Jämförelse med mätningar vid Centre Technique du Papier.

Det franska pappersforskningsinstitutet Centre Technique du Papier (CTP) har i en studie undersökt totala energiverkningsgraden vid torkning av bestruket papper för bl a den gaseldade IR-strålaren Solaronics [11]. Resultaten är presenterade som en funktion av ingående fukthalt i papperet enligt figur 24 nedan.

Fukthalten vid mätningarna på den industriella anläggningen beräknas ur uppmätt ytvikt till följande värden.

	Fyra rader tända	Två rader tända
Uppmätt ytvikt före IR (g/m ²)	99-100	72-73
Papperets torrhalt (g/m ²)	92	67
Beräknad fukthalt (%)	7-8	7-8

En jämförelse med CTP visar därmed:

	Fyra rader tända	Två rader tända
Total energiverkningsgrad enligt CTP (%)	28-30	28-30
Total beräknad energiverkningsgrad (%)	31	28

Det kan konstateras att CTP's värden överrensstämmer med de som beräknats för den industriella anläggningen. För den beräknade verkningsgraden har hänsyn, liksom tidigare, tagits till den strålning som träffar papperet utanför området rakt under strålaren (se även kapitel 6.1.1). Detta bör vara riktigt eftersom CTP's mätningar har gjorts på ett avstånd av 6-8 m från IR-strålaren.



Figur 24. Totala energiverkningsgraden som funktion av ingående fukthalt.

7. Förslag till förbättrad energiverkningsgrad.

7.1 Ytterligare förvärmning av förbränningsluften.

Som visats i figur 6 innefattar anläggningen en värmeväxlare som har till uppgift att förvärma den ingående förbränningsluften mot utgående avgaser. Spjället som styr hur stor del av avgaserna som passerar värmeväxlaren var halvöppet, och en stor del av avgasernas leddes förbi värmeväxlaren. Förbränningsluften förvärmdes bara från 36 °C till 80 °C och från 39 °C till 73 °C, då fyra respektive två rader var tända. Avgastemperaturen före värmeväxlaren var 199 °C respektive 166 °C. Utifrån dessa temperaturer och ekvation 7.1 kan snabbt konstateras att en stor del av avgasernas energiinnehåll inte utnyttjades.

$$\mathbf{m}_{\text{avgas, vvxl}} \mathbf{C}_{\text{p, avgas}} (\mathbf{T}_{\text{avgas, in}} - \mathbf{T}_{\text{avgas, ut}}) = \mathbf{m}_{l} \mathbf{C}_{\text{p, l}} (\mathbf{T}_{l, ut} - \mathbf{T}_{l, in})$$
(7.1)

Som visades i figur 16-17 ökar IR-strålarens verkningsgrad med temperaturen på ingående förbränningsluft. Ökningen är visserligen inte stor, bara ca 1.5% vid en temperaturökning på 40 grader. Finns det inget material- eller kapacitetsmässigt hinder mot att värmeväxla en större mängd avgaser, bör detta ändå vara en god idé.

7.2 Minskat luftöverskott och spolluftflöde till förbränningen.

Den faktor som har mest betydelse för IR-strålarens verkningsgrad är förbränningsluftflödet. Genom att hålla ett lågt luftöverskott till förbränningen behöver ingen onödigt stor mängd luft värmas och strålarytan får en högre temperatur. Betydelsen av luftöverskottsfaktorn visas i figur 25-26 nedan. Basfall vid beräkningarna har varit de indata som ges kapitel 5.1.



Figur 25 och 26. Luftöverskottets inverkan på J_1 , strålningsverkningsgrad 1 och totala energiverkningsgraden då fyra respektive två rader är tända.

Av samma anledning som med förbränningsluften bör inte spolluftflödet vara onödigt högt. Resultatet blir bara att extra luft måste värmas till avgastemperaturen. Spolluften sänker också temperaturen i gasskiktet vilket påverkar verkningsgraden till följd av att den konvektiva värmeöverföringen försämras. Spolluften inverkar visserligen inte lika mycket på verkningsgraden som förbränningsluftflödet, men utifrån vilken temperatur som kan tillåtas i gasskiktet bör mängden spolluft ändå minimeras. Spolluftflödets inverkan på verkningsgraden och gasskiktets temperatur visas i figur 27-28. Som nämnts tidigare kommer dock gasskiktets temperatur vara lägre än den beräknade, p g a den luft som dras med pappersbanan.



Figur 27 och 28. Spolluftflödets inverkan på T_g , strålningsverkningsgrad 1 och totala energiverkningsgraden då fyra respektive två rader är tända.

7.3 Minskad nedsmutsning av IR-strålarens yta.

För att den gaseldade IR-strålaren ska fungera väl, både avseénde energiverkningsgrad och funktionalitet, krävs att de effektiva strålarytorna håller en hög kvalitet. Personalen vid den undersökta anläggningen har konstaterat problem med att tända strålaren och också att ytorna strålar ojämnt. Svårigheten att tända strålaren upplevs som mest störande eftersom det utgör att irritationsmoment för personalen. Orsaken till problemen anses framförallt vara att strålarytan smutsas ned av pappersdamm då strålaren inte används, dvs när obestryket papper produceras. Pappersdammet gör att porerna hos den porösa metallen i strålarelementen fylls igen, och att strålarytan brinner ojämnt. Förutom att detta alltså medför rent praktiska problem kommer sannolikt också strålarens emissivitet, och därmed energiverkningsgraden, att försämras.

I dagsläget tvingas man ofta byta ut strålarelementen, vilket inte bara är dyrt utan även omständigt eftersom nya element beställs från USA. Om problemet med nedsmutsning kan lösas slipper företaget alltså inte bara praktiska problem utan även onödiga kostnader. Några av de förslag som uppkommit på hur problemet kan lösas är följande:

1. Borrade hål i strålarelementen.

Utomlands har man provat att borra hål jämnt fördelat över strålarelementets yta. Hålen har en diameter på ca 1 mm, och är placerade i ett rutnät med ca 5 mm avstånd. Avsikten är att gasen lätt ska kunna passera genom dessa hål även om de finare porerna har fyllts igen. Omgivande smuts på ytan kommer då att brännas bort. Enligt uppgift har detta visat sig fungera tillfreds-ställande [12]. Försöken har gjorts av det holländska företaget Arcotech som tillverkar strålarelement.





2. Skyddsplåt eller skyddsduk över strålarytan.

Genom att lägga en plåt över strålarytan då den inte används förhindras att dammpartiklarna belägger ytan. Det enklaste vore om plåten kunde skjutas med handkraft över ytan med hjälp av stödskenor. Eventuellt är det också möjligt att ha plåten permanent fäst på kanten av strålarens ovansida med gångjärn, och att vika fram den vid behov. Ett problem är att stödskenorna eller fästanordningarna riskerar att vara i vägen för pappersbanan då strålaren används. Ett alternativ till plåt är att använda en temperaturtålig duk, som likt en rullgardin kan dras över strålarytan. Fästanordningarna skulle då sannolikt kunna vara placerade på sidan av strålaren och inte vara i vägen för pappersbanan. Denna lösning är troligtvis också enklare och billigare än att använda en plåt.



Figur 30. Strålarytan kan skyddas med exempelvis en plåt eller skyddsduk. Strålarytan sedd snett underifrån.

3. Utblåsning av smuts med luftflöde.

Genom att hålla igång fläktarna för tillförsel av förbränningsluft och spolluft, även då strålarna inte används, kan dammpartiklarna blåsas bort från strålarytan. Detta görs i dagsläget men flödeshastigheten räcker inte för att hålla helt rent. Om flödet kan ökas tillräckligt med befintliga fläktar är lösningen enkel, men om ytterligare fläktbehov krävs blir det givetvis genast dyrt och komplicerat.

8. Använda formelbeteckningar.

...

Α	Yta (m ²)
а	Strålarytans längd (m)
b	Strålarytans bredd (m)
bredd	Pappersytans bredd (m)
с	Avståndet mellan strålarytan och pappersytan (m)
Cp	Värmekapacitet (J/molK)
E	Energi (W)
Ekonv	Konvektionsvärme (W)
F	Gasemas volymsflöde (Nm ³ /s)
Fgp/gs/sp/ps	Vinkelkoefficienter mellan aktuella ytor
G ₁ , G ₂	Infallande värmestrålning till IR-strålarens yta resp pappersytan (W/m ²)
h	Värmeöverföringstal (W/m ² K)
H	Entalpi (J/kg)
∆Hvap	Förångningsentalpi (W/kg)
J_1, J_2	Utgående värmestrålning från IR-strålarens yta resp pappersytan (W/m ²)
J _{1, förl}	Strålningsförluster från J ₁ (W)
k	Termisk konduktivitet (W/mK)
L	Karakteristisk längd (m)
М	Molvikt (g/mol)
m	Massflöde (kg/s)
m _{fukt}	Förångad fukt från pappersytan (kg/s)
n	Överskottsfaktor (-)
Nu	Nusselts tal (-)
р	Tryck (Pa)
Pr	Prandtls tal (-)
Q	Strålningsenergi (W)
Re	Reynolds tal (-)
S	Ekvivalent gasskikttjocklek (m)
Т	Temperatur (K)
u	Fukthalt (kg/kg)
v	Hastighet (m/s)
V	Volym (m ³)
у	Koncentration (vol%)
ytvikt	Papperets ytvikt (kg/m ²)
α	Absorptivitetstal (-)
ε	Emissivitetstal (-)
ρ	Reflektans (-)
τ	Transmittans (-)
σ	Konstant = $5.669 \ 10^{-8} \ W/m^2 K^4$
δ	Densitet (kg/m^3)
	Dynamisk viskositet (Pas)
м	Dynamiok viskosier (* do)

Index:

ad	Adiabatisk (förbränningstemperatur)
avgas	Avgaser från förbränning
bestr	Bestrykningsmaterial
eff	Effektivt (värmevärde)
f	Fiber (torrt papper utan bestrykningsmaterial)
favgas	Avgaser som lämnar IR-strålaren (förbränningsgaser, spolluft och avdriven fukt)
g	Gasskikt mellan IR-strålare och pappersyta
gas	Gasol
gs	Överföring mellan gasskikt och IR-strålare
gp	Överföring mellan gasskikt och papper
i	Komponent i gas
in	Ingående
k	Konvektiv
I	Förbränningsluft
m	Medelvärde
n	Normaliserat värde
Р	Papper
S	Strålaryta.
sg	Överföring mellan IR-strålare och gasskikt
sp	Överföring mellan IR-strålare och papper
spol	Spolluft
t	Teoretiskt minsta mängd för fullständig förbränning
tot	Totalt
tv	Tvärsnitt
u	Fukthalt
ut	Utgående
vap	Förångning
w	Vägg
å	Mättad ånga
överskott	Överskottsluft vid förbränning

9. Referenser.

- 1. Reid R.C., Prausnitz J.M., Sherwood T.K., The properties of gases and liquids, Third Edition, McGraw-Hill, 1977.
- 2. Mörtstedt S-E., Data och diagram, 1970.
- 3. VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1977.
- 4. Schack K., Berechnung der Strahlung von Wasserdampf und Kohlendioxid, Chemie Ingenieur Technik, 42(2), 53-58, 1970.
- 5. Ojala K.T, Lampinen M.J., Optical Properties of Wet Paper and Simulation of the Effect of Autoprofiling on Gas-fired IR Drying, Helsinki University of Technology, 1991.
- Wilhelmsson B.I., Nilsson L.S., Stenström S.G., Measurements of Mass Transfer Resistance of Paper Dryer Fabrics, Department of Chemical Engineering I, University of Lund, Fagerholm L., Nordiska Filt AB.
- 7. P.W Atkins, Physical Chemistry, Third Edition, Oxford University Press, 1988.
- 8. Schmidt E., Properties of Water and Steam in SI-Units, Springer, 1969.
- 9. Baehr H.D. Mollier i,x Diagramme für feuchte Luft, Springer, 1961.
- 10. Utvärdering av en industriell gaseldad IR-strålare, Delrapport 2. Johansson M., Drifttekniska Institutionen vid LTH, 1994.
- 11. Lemaitre A., Glise D., Le Sechage par Rayonnement pour Augmenter la Production des Machines, Centre Technique du Papier, 1989.
- 12. Samtal med Ingemar Gunnarsson, fd Nordiskt Gastekniskt Center.

1 ł ł .



LUNDS UNIVERSITET LTH-Malmö Avd. för Driftteknik

Utvärdering av en industriell Gaseldad IR-strålare

Delrapport 2 Praktiska mätningar

Michael Johansson Augusti 1994

.

.

. . .

`

Sammanfattning

En industriell gaseldad IR-strålare undersökts med avseende på strålningsverkningsgraden. IR-strålaren är placerad i torkpartiet till en bestrykningsmaskin i en pappersmaskin. Undersökningen gjordes då 2 av 4 strålarmoduler var tända. Då IR-strålarens plattor uppvisade synliga skillnader inbördes beroende på hur länge de varit i drift gjordes mätningar dels på relativt nya plattor och dels på något äldre plattor.

Resultaten användes för att utvärdera en beräkningsmodells riktighet, se delrapport 1 [3].

Anläggningens strålningsverkningsgrad uppmättes till 28 respektive 31%. Beräkningsmodellens motsvarande resultat var 35%. Orsaker till skillnaden mellan uppmätta värden och beräkningsmodellens värde diskuteras i kapitel 5.1. Resultat var något lägre än det väntade. I det avslutande kapitlet 5.2 samt i delrapport 1 ges en del förslag på hur denna verkningsgrad och därmed även den totala verkningsgraden kan ökas. ł ł

1

ł

ł

ł

ł

ł

.

Innehåll

1	Inledning	1
2	Bakgrund	2
2.1	Anläggningen	2
3	Förutsättningar	4
4	Resultat	5
4.1	Spektrala analyser	5
4.2	Yteffekter	8
4.3	Verkningsgrad	9
5	Slutsatser och rekomendationer	10
5.1	Jämförelser mellan praktiska mätningar och beräkningsmodellen	10
5.2	Förslag till förändringar	11
6	Referenser	12

..

.

. .

·

1 Inledning

Vid avdelningen för Driftteknik, LTH-Malmö, har ett antal laboratoriemätningar gjorts för att undersöka effektiviteten hos gaseldade IR-strålare. Dessa mätningar har gjorts på mindre enheter och under laboratoriemässiga förhållanden. För att få en bättre förståelse för hur dessa apparater uppför sig under industriella förhållanden har detta projekt genomförts som ett sammarbetsprojekt mellan Avd. för Driftteknik och Avd. för Kemisk Apparatteknik, båda vid LTH.

Avd. för Kemisk Apparatteknik har konstruerat en matematisk modell som beskriver IR-strålarens egenskaper och påverkan på pappersbanan. Denna modell redovisas i delrapport 1 av detta projekt. Avd. för Driftteknik har gjort praktiska mätningar på en befintlig anläggning under full drift.

I denna delrapport redovisas resultaten från de praktiska mätningarna som även jämförs med värden från den matematiska modellen. Det ges också förslag till förändringar och förbättringar för att öka effektiviteten hos papperstorken.

Projektet har initierats av Per-Arne Persson vid Svenskt Gastekniskt Center (SGC) och finansierats av SGC, Nordiskt Gastekniskt Center (NGC), NUTEK och Neste Gas. Kaj Larsson, Q-Lambda, har anlitats som expert på optik för spektrala mätningar av infraröd strålning.

Dessutom har personal, vid den fabrik där mätningarna genomfördes, ställt upp med nödvändiga insatser utan kostnad.

2 Bakgrund

Föreliggande rapport är den tredje i en serie av etapper. Första etappen, [1], bestod i att bygga upp en instrumentering för att i laboratoriemiljö kunna mäta och analysera den strålning som emitteras från en IR-strålare.

Etapp två, [2], hade som mål att förbättra mätutrustningen efter de brister som redovisades i etapp ett. Instrumentet kompletterades med en monokromator för att utvidga mätområdet till att innefatta $0,4 - 1 \mu m$, alltså det område där elektriska IRstrålare emitterar en stor del av sin strålning. Dessutom försågs instrumentet med en Light-pipe. Dennas uppgift är att vid mätningar i industrimiljö transportera ljuset, som skall analyseras, till instrumentet.

Etapp tre är indelad i två delar. Del 1 beskriver en matematisk modell över anläggningensom mätningarna utförts på, Stenström [3]. Del 2 är den föreliggande som redovisar de praktiska mätningarna som gjorts på anläggningen

2.1 Anläggningen

I den aktuella pappersfabriken installerades hösten 1991 en gaseldad IR-tork i en pappersmaskin. Strålaren är placerad efter bestrykaren. I bestrykaren läggs ett tunt skikt av smet på en eller två sidor av papperet för få en slätare yta. Strålarens uppgift är att få ytan på smeten så torr att den inte klibbar fast vid de första efterföljande torkvalsarna. Strålaren är av fabrikat Impact, se fig 2.1, och består av en fiberbrännare av metalltyp. IR-torken är uppbyggd av 4 separata moduler, två placerade på ovansidan och två på undersidan av papperet. Den effektiva bredden, CD (Cross Direction, tvärs maskinen) är 6700mm och den effektiva längden, MD (Machine Direction, längs maskinen), 360mm. Var modul är indelad i 48 st strålarenheter, 140 x 180 mm, som har egen gastillförsel. Tillförd gaseffekt är ca 400 kW per modul, alltså totalt 1 600 kW. Anläggningen eldas med Propan 95. Strålarna är försedda med ett värmeåtervinningssystem där förbränningsluften värmeväxlas med rökgaserna i en separat värmeväxlare. Dessutom överförs en del värme från rökgaserna till gas-/ luftblandningen och till spolluften just före förbränningen.



Fig 2.1. Uppbyggnad av IR-tork. 4 separata moduler fördelade på 2 över och 2 under pappersbanan. I maskinen är pappersbanan riktad 30° snett uppåt.

3 Förutsättningar

Mätningarna gjordes under det att anläggningen var i full drift. Det aktuella papperet var ett 70 grams papper bestruket på båda sidor. Vid mättillfället var två moduler tända, en över och en under pappersbanan. Den relativt lätta kvaliteten gav stora variationer i avståndet mellan pappersbana och strålare. Pappersbanan fladdrade med en amplitud av ca 20 mm. Av någon anledning som driftpersonalen inte kunde svara på, är pappersbanan inte centrerad vid lättare papperskvaliteter. Detta gjorde att avståndet mellan pappersbana och övre strålarram endast var 20-40 mm, och avståndet till undre strålarram 60-80 mm. Då draglinorna är placerade så att de löper relativt nära undre modulen var vi tvungna att placera light-pipen mellan pappersbana och övre ramp, för att inte riskera att fastna i draglinorna. För att kunna föra in light-pipen mellan pappersbana och strålare krävdes det att pappersbanan styrdes ner drygt 20mm och stabiliserades. Denna styrning gjordes för hand med stålrör av driftpersonalen. Av denna anledning reducerades antalet mätningar till ett minimum, då risken för banbrott var överhängande.

Mätningarna fördelades så att en mätning gjordes på en äldre platta och en mätning på en nyare platta. Den nyare plattan hade bytts ut ca 4 månader före mätningen, vilket innebär att drifttiden på denna var ca 2,5 månad. Den äldre plattan hade suttit i brännaren över ett år, förmodligen närmare 1,5 år, vilket innebär att drifttiden på denna var mellan 8 och 11 månader. Denna äldre platta uppvisade tydliga tecken på beläggningar. Ytan på plattan var under drift betydligt ojämnare i temperatur och för ögat märkbart mörkare i färgen. Orsaken till detta är förmodligen i grunden en förslitningsskada men en inverkande faktor är troligtvis även drifttiden. Endast ca 60% av tiden körs denna pappersmaskin med bestruket papper, vilket gör att under 40% av året är strålarna ur drift. De sitter då i ett väldigt utsatt läge och smutsas ned av stänk och pappersdamm.

Mätningar gjordes dels direkt mot strålarens yta på ett avstånd av ca 50 mm från ytan, och dels mot pappersbanan på avståndet 10 mm från banan. Detta gör att mätresultaten visar hur mycket strålningsenergi som lämnar strålaren och hur mycket av denna energi som kommer att passera igenom pappersbanan. En del av strålningen som träffar pappersbanan kommer ett reflekteras bort från ytan. Huvuddelen av denna reflekterade energin träffar den strålande ytan och kommer därmed strålaren tillgodo. Differensen mellan den strålning som emitteras från strålaren och den strålning som passerar genom pappersbanan är i princip den energimängd som absorberats av pappersbanan.

4 Resultat

4.1 Spektrala analyser

Mätningarna av strålningsenergin från strålarens yta gjordes på ca 50mm avstånd från ytan. Mellan strålaren och light-pipen fanns då ett gasskikt bestående av en blandning av rökgaser från förbränningen och spolluft. Detta gasskikt kommer att både absorbera och emittera strålning. De uppmätta spektran visas i diagram 4.1. Den undre kurvan visar strålningen från en äldre platta och den övre kurvan strålningen från en nyare platta. Som jämförelse finns även kurvor som visar strålningen från en svartkroppsstrålare med temperaturer mellan 800°C och 900°C. I diagrammet ses mellan 2,5 och 3 µm närvarande vattenångas påverkan på spektran. Vattenångan både absorberar och emitterar strålning i detta område. I området 4,2 till 4,6 µm, med maximum vid 4,4 µm har koldioxid en kraftig emissionstopp.

Det syns en relativt stor skillnad mellan äldre och nyare platta. Skillnaden motsvarar en skillnad på drygt 20°C i yttemperatur, vilket ger en tydlig sänkning av utstrålad energi från den äldre plattan.



Diagram 4.1. Strålningsemissionsspektra för nyare och äldre plattor. Svartkroppsspektra för 800 till 900°C.

I diagram 4.2 visas spektra från mätningar av strålningsenergi som passerat pappersbanan. Den största differensen mellan det direkta spektrumet mätt mot strålarytan och transmissionsspektrumet mätt mot pappersbanan, finns i våglängdsområdet 2,7 till 4 μ m. Inom detta område är transmittansen lägst (jämför ref [6] bilaga 17 och 18). Toppen för koldioxid är betydligt dämpad men fullt synlig i spektrumet.

6



Energy [W/m2.mymeter]*E+10

Diagram 4.2. Strålningsenergispektra för strålning som passerat genom pappersbanan. För jämförelse finns också direkta spektra från IR-strålarna med i diagrammet.

I både diagram 4.1 och 4.2 syns att kurvorna tenderar till att svagt stiga vid våglängder över 6,5 µm. Detta beror på att vi här är nära den våglängdsgräns över vilken safirfönstret i light-pipens ände inte längre transmitterar strålning.. Den minskade transmissionen gör att instrumentets totala känslighet i detta övre område är så låg att noggrannheten i kalibreringen blir dålig. 7

4.2 Yteffekter

Genom att integrera spektumet med avseende på våglängden kan strålarens yteffekt beräknas [2]. I tabell 4.1 redovisas resultaten från dessa beräkningar. Här redovisas dessutom värden på yteffekterna kompenserade för mätområdet enligt [2] och beräknade effekter enligt delrapport 1 till detta projekt, Stenström [3].

		Yteffekt [kW/m2]
Strålning från nyare platta		88
Strålning från nyare platta,	mätområdeskompenserat	103
Strålning från äldre platta		79
Strålning från äldre platta,	mätområdeskompenserat	92
Modellberäknat enl [3]		115
Strålning genom papper, nyare platta	,,	12,3
Strålning genom papper, nyare platta,	mätområdeskompenserat	14,1
Strålning genom papper, äldre platta		10,4
Strålning genom papper, äldre platta,	mätområdeskompenserat	11,9
Modellberäknat enl [3]		13

Tabell 4.1. Yteffekter beräknade ur uppmätta spektra.

4.3 Verkningsgrad

Med verkningsgrad menas här strålningsverkningsgrad, dvs hur stor del av tillförd effekt kommer att avges från IR-strålaren som strålningsenergi per tidsenhet. Här jämför vi tillförd bränsleeffekt omräknad till yteffekt, 326 kW/m², med värden från tabell 4.1.

	η
Nyare platta	31%
Äldre platta	28%
Modellberäknat enl. [3] avgivet från strålarytan	35%
Modellberäknat enl. [3] som träffar pappersytan	28%

Tabell 4.2. Strålningsverkningsgrad för IR-strålaren.

5 Slutsatser och rekommendationer

5.1 Jämförelser mellan praktiska mätvärden och beräkningsmodellen

Man kan konstatera att de praktiska mätningarna i huvudsak stämmer överens med den matematiska modellen av anläggningen. Strålningsverkningsgraden avviker ca 5% från beräknat värde.

Jämför man de uppmätta värdena på strålarens yteffekter, 103 respektive 92 kW/m², med beräknat värde enligt [3], 115 kW/m², ser man att det finns en avvikelse. Denna kan förklaras på två sätt, dels att beräkningsmodellen inte tar hänsyn till nedsmutsning av strålarytan, dels att beräkningsmodellen beräknar den strålningsenergi som lämnar strålarens yta medan mätningen skedde på ett avstånd av ca 50 mm från ytan vilket innebär att det gasskikt som finns mellan strålarytan och light-pipen absorberat en del av strålningen. Detta gasskikt består av en blandning av rökgaser och spolluft, som tillförs med relativt låg temperatur, varför denna gasblandning kommer att absorbera energi. Det uppmätta värdet bör jämföras med ett värde från beräkningsmodellen som ligger mellan den beräknade intensiteten från strålarytan (115 kW/m²) och den beräknade intensiteten till pappersytan (65 kW/m²). Troligen samverkar dessa faktorer och ger upphov till en avvikelse mellan uppmätt och beräknat värde.

När det gäller skillnaden på uppmätta och beräknade värden för strålning genom pappersbana kan skillnaden vara lite större än vad som syns i tabellen beroende på ovanstående resonemang, p.g.a. nedsmutsning är yteffekten lägre. Beräkningsmodellen, [3] sid 11, sätter papperets emissivitet och absorptivitet till 0,8. Diagram 4.2 visar på att transmissionen genom pappersbanan varierar ganska kraftigt med våglängden, vilket kan förklara en skillnad. I medeltal ligger kvoten (ett approximativt mått på transmittansen) mellan strålningsenergi genom papper och strålningeenergi från strålaren på 0,13 respektive 0,15, vilket skulle indikera att emissiviteten är något lägre än 0,8.

Orsakerna till skillnaderna mellan uppmätta och beräknade värden på verkningsgraderna kan bero på de faktorer som redovisades här ovan. Noteras kan att den hårt nedsmutsade äldre plattan har 3 %-enheters lägre verkningsgrad än den lätt nedsmutsade nyare plattan, vilket är knappt 10% skillnad.

5.2 Förslag till förändringar

I delrapport 1, [3] nämns följande förslag:

- Förvärmningen av förbränningsluften bör kunna förbättras. I nuläget förvärms förbränningsluften endast 40° vilket enligt beräkningsmodellen ökar verkningsgraden 1,5 %-enheter. Finns inga praktiska hinder bör denna förvärmning ökas med ökad verkningsgrad som resultat.
- Minskning av luftöverskott och spolluftflöde. Av dessa är det luftöverskottet som har den största inverkan på verkningsgraden. Vid mätningarna var luftöverskottet 1,63 resp 1,69. Teoretiskt och i laboratorium kan denna typen av IR-strålare fungera vid luftöverskott under 1,1. Praktiskt sett kan det vara rimligt att justera i luftöverskottet runt 1,15. Detta skulle kunna ge en ökning av verkningsgraden på mellan 10 och 12 %-enheter, se [3] sid 31.
- Minskning av ytans nedsmutsning. Det visades tydligt i kapitel 4 att plattans ålder och nedsmutsning relativt kraftigt påverkade resultatet. I [3] föreslås att man antingen förser plattorna med ett stort antal små hål för att bränna bort smuts som fastnar på ytan. Eller att man arrangerar en form av täckning av strålarytorna under den tid de inte användes.

Förutom det i [3] föreslagna sättet att minska nedsmutsningen kan man regelbundet rengöra strålarytorna. Enligt uppgifter från tillverkaren av strålarmaterialet skall materialet tåla att utsättas för högtryckstvätt med vatten, maximalt tryck 40 bar. I startsekvensen kan man integrera en tvättsekvens då en traverserande högtryckstvätt, gärna med hetvatten, spolar av strålarytorna. Med detta förfarande borde en större del av den smuts och det damm som samlats på ytan spolas bort. Eventuellt vatten som tränger in bakom strålarplattan kommer att spolas ut av luftströmmen.
6 Referenser

- 1. Johansson M. Spektralfördelning och verkningsgrad för gaseldade IR-strålare, LTH-Malmö, Avdelningen för Driftteknik, 1992.
- 2. Johansson M. Metod för bestämning av totalverkningsgrad för IR-strålare, LTH-Malmö, Avdelningen för Driftteknik, 1994.
- 3 Stenström S., Hermodsson S. Utvärdering av en industriell gaseldad IR-strålare, LTH, Avdelningen för Kemisk Apparatteknik, 1994.
- 4 Modest M. Radiative Heat Transfer, McGraw-Hill, 1993.
- 5 Siegel R., Howell J. Thermal radiation Heat Transfer, Second Edition, McGraw-Hill, 1981.
- Ojala K. T., Lampinen M. J. Optical properties of wet paper and simulation of the effect of autoprofiling on gas-fired IR drying.
 Helsinki University if Technology, NGC 87-89309-51-0, 1991



LUNDS UNIVERSITET LTH/Malmö Avdelningen för Driftteknik

Metod för bestämning av totalverkningsgrad för Gaseldade IR-strålare

Michael Johansson Augusti 1994 .

. .

.

.

.

ł

Sammanfattning

I föreliggande projekt har ett mätsystem för kartläggande av spektralfördelningen hos IRstrålare kompletterats med utrustning för möjliggöra industriella mätningar. Mätsystemets mätområde har breddats med hjälp av en monokromator samt försetts med en Light-pipe för insamling av strålning. I första hand är denna Light-pipe anpassad för möjliggörande av mätningar i en rullande pappersmaskin.

Resultatet är att mätområdet för mätsystemet nu är 0,4-25 μ m. Light-pipen gör det möjligt att i ett utrymme av 50mm mäta ca 1200mm in i en pappersmaskin.

I rapporten redovisas tre möjliga konfigurationer på mätsystemet. En för laborativa mätningar och två för industriella mätningar. Av de industriella konfigurationerna är en anpassad till medeltemperaturstrålare och en till högtemperaturstrålare.

.

.

Innehåll

.

kapitel

	Bakgrund	1
1	Utrustning och teori	2
1.1	Fourierspektrometern	2
1.2	Light-pipe	3
1.3	Monokromatorn	5
1.4	Kalibrering	7
2	Mätområde	8
2.1	Mätområdeskompensering	8
3	Hur stor del av den totala emissionen faller inom mätområdet?	13
4	Slutsatser	15
	Referenser	16

sid

.

Bakgrund

÷

Under arbetet med projektet Spektralfördelning och verkningsgrad för gaseldade IR-strålare, ref. 1, och under förarbetet till projektet Utvärdering av en industriell gaseldad IR-strålare framkom en del brister i mätsystemets uppbyggnad. Dels var spegelsystemet inte anpassat till industriella mätningar dels var instrumentets mätområde för litet.

För att komma tillrätta med dessa brister har i detta projekt mätsystemet kompletterats med en light-pipe och en monokromator.

Light-pipens uppgift är att på ett tillförlitligt sätt leda in strålningen till instrumentets detektorer. Kraven på light-pipen är att den skall vara möjlig att använda i en rullande pappersmaskin utan att påverka maskinens inställningar och papprets kvalitet.

Monokromatorns uppgift är att vidga mätområdet för mätsystemet. Området skall vidgas så att även högtemperaturstrålare kan kartläggas med avseende på emissionsspektra. Monokromatorn måste använda light-pipen som mätsond. Den måste byggas in i befintligt mätsystem så att mätningar kan göras med FTIR-instrument och monokromator under samma mättillfälle.

1 Utrustning och teori

1.1 Fourierspektrometern

Huvudinstrumentet för mätningarna i detta projekt är en Perkin Elmer Fourierspektrometer model 1760, FTIR. Instrumentet används normalt för kemiska analyser. Genom att mäta absorptionsspektrat i det infraröda området är det möjligt att detektera närvaro och koncentration av olika substanser i ett prov.

Instrumentet har tidigare byggts om för att kunna mäta spektralfördelningen av strålningen från en IR-strålare. Detta ombyggnadsarbete beskrivs i detalj i ref. 1. Den ordinarie ljuskällan i FTIR-instrumentet ersattes av en spegel för att låta ljus från en extern ljuskälla falla in i instrumentet och analyseras spektralt. Den externa ljuskällan är i detta fall en IR-strålare. För att kunna fokusera på IRstrålaren används ett system med paraboliska speglar. Denna uppställning fungerar tillfredsställande i laboratoriemiljö och med gaseldade IR-strålare. För mätningar i icke laboratoriemiljö, t. ex. i en bestrykningsmaskin kan systemet med speglar inte användas. Spegelsystemet kräver ett fritt avstånd av drygt 2 meter vinkelrätt mot strålaren. I en bestrykningsmaskin är strålaren placerad 50 till 100mm rakt över eller under pappersbanan, se fig. 1.1. Bredden på pappersbanan är 5-8 m och banhastigheten 500 till 1200 m/min. Dessa faktorer gör att det behövs någon form av periskop för att göra det möjligt att samla upp och transportera ljuset från strålaren till instrumentet för analys, se kap. 1.2. FTIR-instrumentets mätområde är 1-25 μ m med ursprungligt spegelsystem. Vid mätningar på högtemperaturstrålare, t.ex. elektriska IR-strålare, ligger emissionstoppen vid så kort våglängd att en stor del av emitterad strålning faller under 1 µm. Av denna anledning måste mätområdet vidgas så att det innefattar helst en stor del av det synliga området, se kap 1.3.

2



Fig 1.1. Tillgängligt utrymme i pappersmaskinen.

1.2 Light-pipe

Kraven på ett periskop, i fortsättningen kallat Light-pipe, är att dess diameter är mindre än 50mm och att dess längd är tillräcklig för att komma in i maskinen så att randeffekter kan undvikas. Det är också önskvärt att längden är sådan att man kan göra mätningar i ett par punkter på den strålande ytan. Det är också nödvändigt att ljuset kan samlas upp i en vinkel 90° mot light-pipen, och att den är kontinuerligt kyld då temperaturen på en gaseldad strålare kan uppgå till 1400K och på en elektrisk uppgå till 2500K.

Light-pipen byggdes upp kring ett kopparrör med ytterdiametern 42mm och längden 1500mm. I kopparröret placerades ett rör av tunn mässing förgyllt på insidan för att åstadkomma en cylindrisk spegel med minimala reflektionsförluster. I båda ändarna byggdes 90° knän med paraboliska och plana speglar samt safirlinser. Kylningen av light-pipen sker genom 4 st 8mm kopparrör fastlödda längs hela light-pipen samt att det främre knät gjordes dubbelmantlat. I dessa rör och i främre knät cirkuleras kylvatten. Invändigt spolas röret med kvävgas, dels för kylning dels för att få en inert atmosfär som inte absorberar strålning, se fig 1.2 och 1.3.



Fig 1.2. Light-pipe, inklusive spegelarrangemang för fokucering på FTIRinstrumentets detektor. Light-pipen visad utan kylrör.



Fig 1.3. Främre änden av light-pipe, snitt A-A enl. fig 1.2.

Den bakre änden av light-pipen kan rotera 360°. Därigenom är det möjligt att mäta i valfri riktning.

De paraboliska speglarna i främre och bakre änden tar ljuset från IR-strålaren genom light-pipen med maximalt 1 (en) reflektion i den cylindriska spegeln. Vid bakre änden finns ett tvåspegel system som focuserar strålningen på FTIRinstrumentets detektorbländare. I detta spegelsystem finns möjlighet att placera ytterligare en spegel för att rikta strålningen till en monokromator, se fig 1.2. Uppriktning av light-pipen och justering av speglarna är av stor betydelse, eftersom energiförluster längs strålgången måste hållas vid ett minimum för att mätnoggrannheten skall bli hög. För injustering av light-pipen användes en extern ljuskälla med synligt ljus och för att linjarisera mot FTIR-instrumentet användes instrumentets inbyggda laser. Med hänsyn tagen till kvaliteten på speglar (reflektionskoefficienter) och linser (transmissionskoefficienter) samt absorbtionsförluster i light-pipen och i atmosfären kan de totala energiförlusterna i mätsystemet uppskattas till 10-15%. I realiteten betyder dessa energiförluster lite då kalibrering mot en känd svartkropp kommer att kompensera för dessa förluster, se kap. 1.4.

1.3 Monokromator

Kravet på att vidga mätområdet under 1 μ m kan inte lösas med befintligt system utan att noggrannheten minskas. Istället kompletteras systemet med en monokromator, fabrikat Oriel model 77 250 1/8m, som anpassas och förses med utrustning för att denna och FTIR-instrumentet skall arbeta tillsammans i samma mätsystem.

En monokromator är ett instrument som delar upp infallande ljus i olika våglängdsintervall, där bredden på dessa intervall kan väljas. Vardera våglängdsintervall analyseras sedan med avseende på energinivå. 5



Fig. 1.4. Monokromatorns uppbyggnad.

Ljuset går via en slits in i monokromatorn. Bredden på denna slits är direkt avgörande för upplösningen vid mätning. Vår monokromator är utrustad med en 120 μ m slits vilket ger en upplösning på 1 nm. Två speglar leder fram ljuset till ett gitter. Gittrets uppgift är att dela upp ljuset i olika våglängdsintervall som får olika riktning. Genom att vrida gittret kan de olika våglängdsintervallen via två speglar fås att ett och ett ledas ut genom en spalt till detektorerna.

Genom att använda två olika gitter och tre olika detektorer kan området 0,4-1,2 μ m analyseras. Med databehandling läggs spektrat från monokromatorn samman med spektrat från FTIR-instrumentet så att ett totalt spektra erhålls med området 0,4-7 resp 25 μ m.

Monokromatorn placeras så att den använder samma strålgång som FTIRinstrumentet. En vikbar spegel, se fig 1.2, används för att rikta strålningen mot FTIR-instrumentets bländaröppning eller mot monokromatorns slits.

1.4 Kalibrering

För kalibrering av fourierspektrometerns och monokromatorns känslighetskurva inklusive light-pipen och atmosfären mellan bakre änden och instrumentet användes en temperaturkompenserad ($\pm 1^{\circ}$) svartkroppsstrålare placerad i fokus vid främre änden av light-pipen. Öppningen hos svartkroppsstrålaren var 25mm och ingångsbländaren till light-pipen 8 mm. Det då erhållna spektrat från instrumentet, Sb(λ), och det matematiskt kända spektrat från svartkroppsstrålaren, Pb(λ), resulterar i kvoten K(λ) som kallas känslighetskurvan.

$$K(\lambda)=S_b(\lambda) / P_b(\lambda,T)$$

där

$$P_{b}(\lambda,T) = 2\pi h c_0^2 \lambda^{-5} / (\exp(h c_0 / \lambda k T) - 1)$$
(1.2)

λ- våglängd [m]
T- temperatur [K]
h-Planck's konstant, 6,626*10⁻³⁴ [Js]
c₀-ljushastigheten, 2,998*10⁸ [m/s]
k -Boltzmann's konstant, 1,3806*10⁻²³ [J/K]

Ekvation 1.2 beskriver den spektrala fördelningen av hemisfäriskt strålningsflöde från en svartkropp vid temperaturen T som funktion av våglängden.

Känslighetskurvan användes för att beräkna det totala strålningsflödet som funktion av våglängden, $W_X(\lambda)$, från en okänd källa som uppför sig som en Lambert-strålare vars uppmätta spektrum är $S_X(\lambda)$.

$$W_{\mathbf{x}}(\lambda) = S_{\mathbf{x}}(\lambda) / K(\lambda)$$
(1.3)

Det totala strålningsflödet, W_X , från källan kan beräknas genom att integrera med avseende på våglängden direkt på spektrat.

$$W_{\chi} = \int W_{\lambda}(\lambda) d\lambda \tag{1.4}$$

(1.1)

2 Mätområde

I det ursprungliga mätsystemet med två paraboliska speglar som externt fokuceringssystem för FTIR-instrumentet var mätområdet 1-25µm. När spegelsystemet byttes ut mot light-pipen minskades mätområdet till 1-7µm på grund av safirlinserna. Safir är det mest lämpliga linsmaterialet men har tyvärr den egenskapen att dess transmittans närmar sig 0 vid 7µm. I FTIRinstrumentet sitter KBr-fönster för att avgränsa instrumentets inre mot omgivningen. KBr har ett betydligt större transmittansområde men är oanvändbart i light-pipen då KBr är vattenlösligt och atmosfären vid lightpipens främre ände är i det närmaste fuktmättad. I ref. [1] påpekades att för högtemperaturstrålare, t.ex. elektriska IR-strålare, ligger en stor del av energin vid våglängder under 1µm. För att kunna mäta på elektriska IR-strålare kompletterades mätsystemet med en monokromator som kunde arbeta parallellt med FTIR-instrumentet. Mätområdet för monokromatorn är 0,4-2µm. Monokromatorn placerades så att en vikbar spegel mellan de två speglarna som linjerar upp strålningen mellan light-pipe och FTIR-instrument kan reflektera in strålningen alternativt till monokromatorn.

Spektrat från monokromatorn läggs samman med spektrat från FTIRinstrumentet och databehandlas tillsammans. Detta gör att det totala mätområdet för FTIR-instrument och monokromator är 0,4-7µm.

2.1 Mätområdeskompensering

För att utröna vilken inverkan begränsningen i mätområdet har måste den del av strålningen som faller utanför mätområdet kartläggas. För att göra detta kan man anse att strålningen som faller utanför mätområdet följer den spektrala emissionskurvan, Planck's lag, för en svart yta omgivet av ett transparent medium med brytningsfaktor n.

$$E_{bv}(T,v) = \frac{2\pi hv^3 n^2}{C_0^2 \left[e^{\frac{hv}{kT}} - 1\right]}$$

(1.5)

E_{bv}-emitterad energi [W/m²/s⁻¹] v- frekvens [s⁻¹] n- brytningsfaktor, c₀/c c- ljushastighet i aktuellt medium [m/s] k- Boltzmann's konstant, 1,3806*10⁻²³ [J/K]

h-Planck's konstant, 6,626*10⁻³⁴ [Js]

Brytningsfaktorn n är kvoten mellan ljushastigheten i vacuum och ljushastigheten i aktuellt medium. I ekvation 1.5 användes frekvensen eftersom den inte ändras när ljus färdas från ett media till ett annat. De spektrala variablerna våglängd λ (oftast för ytemission och ytabsorbtion), och vågtal η (oftast för strålning i gaser) användes betydligt oftare i praktiken. Ekvation 1.5 kan uttryckas med våglängd eller vågtal genom att använda relationerna

$$\nu = \frac{c_0}{n\lambda} = \frac{c_0}{n}\eta; d\nu = -\frac{c_0}{n\lambda^2} \left[1 + \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} \right] d\lambda = \frac{c_0}{n} \left[1 - \frac{\eta}{n} \frac{dn}{d\eta} \right] d\eta \qquad (1.6)$$

och

$$E_{b}(T) = \int_{0}^{\infty} E_{b\nu} d\nu = \int_{0}^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda = \int_{0}^{\infty} E_{b\eta} d\eta \qquad (1.7)$$

eller

$$E_{bv}dV = E_{b\lambda}d\lambda = E_{b\eta}d \tag{1.8}$$

Här är λ och η våglängd och vågtal för de elektromagnetiska vågorna i ett medium med brytningsfaktor n (då λ_0 =n λ och η_0 = η /n skulle vara våglängd och vågtal av samma våg som färdas genom vacuum). Ekvation 1.6 visar att ekvation 1.5 ger relevant relation för E_b λ och E_b η endast om brytningsfaktorn är oberoende av frekvensen (eller våglängden, eller vågtalet). Detta är speciellt fallet för vacuum (n=1) och för de vanliga gaserna (n \approx 1), och kan vara av

$$E_{b\lambda}(T, \lambda) = \frac{2 h c_0^2}{n^2 \lambda^5 \left[e^{hc_0/n\lambda kT_-1} \right]} \quad (n=konst).$$
(1.9)

Vi inför beteckningarna

$$C_1 = 2\pi hc_0^2 = 3,7419 * 10^{-16} [Wm^2]$$

och

$$C_{2} = hc_{0}/k = 14,388 [\mu mK]$$

Den totala emissionen från en svartkropp kan bestämmas från ekvationerna 1.7 och 1.9 om vi sätter $\frac{C_2}{n\lambda T} = \xi$

$$E_{b}(T) = \int_{0}^{\infty} E_{b\lambda}(T,\lambda) d\lambda = C_{1}n^{2}T^{4} \int_{0}^{\infty} \frac{d(n\lambda T)}{(n\lambda T)^{5} \left[e^{C_{2}/(n\lambda T)} - 1\right]} = \left[\frac{C_{1}}{C_{2}^{4}} \int_{0}^{\infty} \frac{\xi^{3} d\xi}{e^{\xi} - 1}\right] n^{2}T^{4}$$
(1.10)

Integralen i detta uttryck kan lösas genom komplex integration

$$E_{b}(T) = n^{2}\sigma T^{4}$$
(1.11)

$$\sigma = \frac{\pi^4 C_1}{15 C_2^4} = 5,670 * 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$$

där σ är känd som Stefan-Boltzmann's konstant. I vårt fall är det av intresse att beräkna strålningsemissionen i ett begränsat våglängdsband, mellan λ_1 och λ_2 . Det ger oss

$$\int_{\lambda_{1}}^{\lambda_{2}} E_{b\lambda} d\lambda = \frac{C_{1}}{C_{2}^{4}} \int_{\frac{C_{2}}{n\lambda_{2}T}}^{\frac{C_{2}}{n\lambda_{1}T}} \frac{\xi^{3} d\xi}{e^{\xi} - 1} n^{2} T^{4}$$
(1.12)

Det är inte möjligt att lösa integralen i ekvation 1.12 analytiskt. Därför uttrycker vi ekvation 1.12 i fraktioner av svartkroppsstrålningen mellan 0 och $n\lambda T$.

$$f(n\lambda T) = \frac{\int_{0}^{\lambda} E_{b\lambda} d\lambda}{\int_{0}^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda} = \int_{0}^{n\lambda T} \left(\frac{E_{b\lambda}}{n^{3}\sigma T^{5}}\right) d(n\lambda T) = \frac{15}{\pi^{4}} \int_{\frac{C_{2}}{n\lambda T}}^{\infty} \frac{\xi^{3} d\xi}{e^{\xi} - 1}$$
(1.13)

så att

$$\int_{\lambda_{1}}^{\kappa_{2}} E_{b\lambda} d\lambda = \left[f(n\lambda_{2}T) - f(n\lambda_{1}T) \right] n^{2} \sigma T^{4}$$
(1.14)

Ekvation 1.14 är en funktion av en variabel, $n\lambda T$, och kan analytiskt beräknas.

De flesta undersökningarna som gjorts tidigare använder matematiska modeller för att beräkna strålningsenergin från en IR-strålare. Beräkningarna är generella och använder våglängdsområdet 0 till ∞ . I vårt fall där mätområdet är begränsat är det av intresse att mätområdeskompensera resultatet för den del av strålningsenergin som ligger utanför mätområdet för att kunna jämföra resultatet med de matamatiska modellernas resultat.

Emissionsspektrat från en IR-strålare kan betraktas ungefär som en grå kropp. En grå kropp är en kropp som har konstant emissionsfaktor för alla våglängder. Vid praktiska mätningar har konstaterats att en IR-strålares emissionsfaktor är relativt konstant och därmed kan vi betrakta IR-strålaren som en grå kropp. Strålningen som ligger utanför mätområdet kan med inte allför stort fel anses vara lika med strålningen från en grå kropp med samma temperatur som IRstrålare. Med hjälp av ekvation 1.14 kan den del av strålningsenergin som ligger utanför mätområdet läggas till det uppmätta resultatet.

Finner vi t. ex. att 85% av totala energin från en svart kropp med samma temperatur som IR-strålaren faller inom mätområdet, kan vi dra slutsatsen att det även för IR-strålaren är 85% av den totalt utstrålade energin som fallit inom mätområdet. Vi kan då, vid jämförelser med matematiska modeller, öka den uppmätta strålningsenergin med 17,6% ($\frac{1}{0.85}$ *100%).



Fig. 2.1. Uppmätt och kompenserad del av strålningsenergin från en IRstrålare.

- 3 Hur stor del av den totala emissionen faller inom mätområdet?
- a) Ursprungligt arrangemang, med endast FTIR-instrument och externt spegelsystem för fokusering. Mätområde 1-25µm.

Temp [K]	1100	1200	1300	1400	2600
$f(n\lambda_1 T)$	0,00091	0,00213	0,00432	0,00779	0,18311
$f(n\lambda_2 T)$	0,99367	0,99529	0,9964	0,99695	0,9989
$f(n\lambda_1 T)-f(n\lambda_2 T)$	0,993	0,993	0,992	0,989	0,816
% av strålningen som	99,3	99,3	99,2	98,9	81,6
faller inom mätområdet					

Tabell 3.1.

 b) Arrangemang med FTIR-instrument och light-pipe. Mätområde 1-7μm.

Temp [K]	1100	1200	1300	1400	2600
$f(n\lambda_1T)$	0,00091	0,00213	0,00432	0,00779	0,18311
$f(n\lambda_2T)$	0,84359	0,87115	0,89277	0,90992	0,98137
$f(n\lambda_1T)-f(n\lambda_2T)$	0,843	0,869	0,888	0,902	0,798
% av strålningen som faller inom mätområdet	84,3	86,9	88,8	90,2	79,8

Tabell 3.2.

. . .

c) Arrangemang med FTIR-instrument och light-pipe. Mätområde 0,4-7µm.

Temp [K]	1100	1200	1300	1400	2600
$f(n\lambda_1 T)$	0,0002	0,00025	0,00028	0,0003	0,00032
$f(n\lambda_2 T)$	0,84359	0,87115	0,89277	0,90992	0,098137
$f(n\lambda_1 T) - f(n\lambda_2 T)$	0,843	0,871	0,892	0,91	0,981
% av strålningen som	84,3	87,1	89,2	91	98,1
faller inom mätområdet					

Tabell 3.3.



Diagram 3.1. Andel av total energi som faller inom mätområdet för arrangemang enligt a), b) och c).

4 Slutsatser

Det är uppenbart att arrangemang a) är bäst med hänsyn till gaseldade IRstrålare eftersom dessa arbetar inom intervallet 1100-1400K. Ca 99% av den totala energin faller här inom mätområdet. Arrangemang a) är däremot inte lika bra för elektriska IR-strålare eftersom dessa ligger vid 2300-2600K. Här faller endast 81% av den totala energin inom mätområdet.

Arrangemang c) är bäst för högtemperaturstrålare, mer än 95% av den totala energin faller inom mätområdet. För gaseldade strålare faller 84-91% av den totala energin inom mätområdet.

För praktiska mätningar i industrin är endast arrangemangen b) och c) aktuella då spegelarrangemanget är praktiskt omöjligt utanför laboratoriet.

Slutsatsen är således att b) och c) ger ungefär samma resultat för gaseldade IRstrålare medan för högtemperaturstrålare arrangemang c) ger bäst resultat.

Den del av det elektromagnetiska spektrat som faller utanför mätområdet, 0-1µm respektive 0-0,4µm och 7-∞, kan vi med god noggrannhet anse överensstämma med spektrat för motsvarande grå kropps spektra. Detta betyder att det är möjligt att öka den beräknade totala energin i enlighet med figurerna 1.4 - 1.6, åtminstone då vi jämför dem med data från matematiska modeller vilka normalt gäller för våglängdsbandet 0 - ∞ µm.

Referenser

- Spektralfördelning och verkningsgrad för gaseldade IR-strålare.
 Johansson Michael, LTH-Malmö, Driftteknik
 Svenskt Gastekniskt Center, rapport SGC013, oktober 1991.
- Radiative Heat Transfer
 Modest Michael F.
 McGraw-Hill, 007 042675-9, 1993
- Thermal Radiation Heat Transfer
 Siegel R., Howell J. R.
 McGraw-Hill, 007 057316-6, 1981

·. .

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
001	Systemoptimering vad avser ledningstryck	Apr 91	Stefan Grudén TUMAB	100
002	Mikrokraftvärmeverk för växthus. Utvärdering	Apr 91	Roy Ericsson Kjessler & Mannerstråle AB	100
004	Krav på material vid kringfyllnad av PE-gasledningar	Apr 91	Jan Molin VBB VIAK	50
005	Teknikstatus och marknadsläge för gasbaserad minikraftvärme	Apr 91	Per-Ame Persson SGC	150
006	Keramisk fiberbrännare - Utvärdering av en demo-anläggning	Jan 93	R Brodin, P Carlsson Sydkraft Konsult AB	100
007	Gas-IR teknik inom industrin. Användnings- områden, översiktlig marknadsanalys	Aug 91	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	100
009	Läcksökning av gasledningar. Metoder och instrument	Dec 91	Charlotte Rehn Sydkraft Konsult AB	100
010	Konvertering av aluminiumsmältugnar. Förstudie	Sep 91	Ola Hall, Charlotte Rehn Sydkraft Konsult AB	100
011	Integrerad naturgasanvändning i tvätterier. Konvertering av torktumlare	Sep 91	Ola Hall Sydkraft Konsult AB	100
012	Odöranter och gasolkondensats påverkan på gasrörsystem av polyeten	Okt 91	Stefan Grudén, F. Varmedal TUMAB	100
013	Spektralfördelning och verkningsgrad för gaseldade IR-strålare	Okt 91	Michael Johansson Drifttekniska Instit. vid LTH	150
014	Modern gasteknik i galvaniseringsindustri	Nov 91	John Danelius Vattenfall Energisystem AB	100
015	Naturgasdrivna truckar	Dec 91	Åsa Marbe Sydkraft Konsult AB	100
016	Mätning av energiförbrukning och emissioner före o efter övergång till naturgas	Mar 92	Kjell Wanselius KW Energiprodukter AB	50
017	Analys och förslag till handlingsprogram för området industriell vätskevärmning	Dec 91	Rolf Christensen ÅF-Energikonsult Syd AB	100
018	Skärning med acetylen och naturgas. En jämförelse.	Apr 92	Åsa Marbe Sydkraft Konsult AB	100

.

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
019	Läggning av gasledning med plöjteknik vid Glostorp, Malmö. Uppföljningsprojekt	Maj 92	Fallsvik J, Haglund H m fl SGI och Malmö Energi AB	100
020	Emissionsdestruktion. Analys och förslag till handlingsprogram	Jun 92	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
021	Ny läggningsteknik för PE-ledningar. Förstudie	Jun 92	Ove Ribberström Ove Ribberström Projekt. AB	150
022	Katalog över gastekniska FUD-projekt i Sverige. Utgåva 4	Aug 92	Svenskt Gastekniskt Center	150
023	Läggning av gasledning med plöjteknik vid Lillhagen, Göteborg. Uppföljningsproj.	Aug 92	Nils Granstrand m fl Göteborg Energi AB	150
024	Stumsvetsning och elektromuffsvetsning av PE-ledningar. Kostnadsaspekter.	Aug 92	Stefan Grudén TUMAB	150
025	Papperstorkning med gas-IR. Sammanfattning av ett antal FUD-projekt	Sep 92	Per-Arne Persson Svenskt Gastekniskt Center	100
026	Koldioxidgödsling i växthus med hjälp av naturgas. Handbok och tillämpn.exempel	Aug 92	Stig Ame Molén m fl	150
027	Decentraliserad användning av gas för vätskevärmning. Två praktikfall	Okt 92	Rolf Christensen ÅF-Energikonsult	150
028	Stora gasledningar av PE. Teknisk och ekonomisk studie.	Okt 92	Lars-Erik Andersson, Åke Carlsson, Sydkraft Konsult	150
029	Catalogue of Gas Techn Research and Development Projects in Sweden (På engelska)	• Sep 92	Swedish Gas Technology Center	150
030	Pulsationspanna. Utvärdering av en demo-anläggning	Nov 92	Per Carlsson, Åsa Marbe Sydkraft Konsult AB	150
031	Detektion av dräneringsrör. Testmätning med magnetisk gradiometri	Nov 92	Carl-Axel Triumf Triumf Geophysics AB	100
032	Systemverkn.grad efter konvertering av vattenburen elvärme t gasvärme i småhus	Jan 93	Jonas Forsman Vattenfall Energisystem AB	150
033	Energiuppföljning av gaseldad panncentral i kvarteret Malörten, Trelleborg	Jan 93	Theodor Blom Sydkraft AB	150
034	Utvärdering av propanexponerade PEM-rör	Maj 93	Hans Leijström Studsvik AB	150

.

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Ргіs kr
035	Hemmatankning av naturgasdriven personbil. Demonstrationsprojekt	Jun 93	Tove Ekeborg Vattenfall Energisystem	150
036	Gaseldade genomströmningsberedare för tappvarmvatten i småhus. Litteraturstudie	Jun 93	Jonas Forsman Vattenfall Energisystem	150
037	Verifiering av dimensioneringsmetoder för distributionsledningar. Litt studie.	Jun 93	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
038	NOx-reduktion genom reburning med naturgas. Fullskaleförsök vid SYSAV i Malmö	Aug 93	Jan Bergström Miljökonsulterna	150
039	Pulserande förbränning för torkändamål	Sep 93	Sten Hermodsson Lunds Tekniska Högskola	150
040	Organisationer med koppling till gasteknisk utvecklingsverksamhet	Feb 94	Jörgen Thunell SGC	150
041	Fältsortering av fyllnadsmassor vid läggning av PE-rör med läggningsbox.	Nov 93	Göran Lustig Elektro Sandberg Kraft AB	150
042	Deponigasens påverkan på polyetenrör.	Nov 93	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
043	Gasanvändning inom plastindustrin, handlingsplan	Nov 93	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
044	PA 11 som material ledningar för gasdistribution.	Dec 93	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
045	Metoder att höja verkningsgraden vid avgaskondensering	Dec 93	Kjell Wanselius KW Energiprodukter AB	150
046	Gasanvändning i målerier	Dec 93	Charlotte Rehn et al Sydkraft Konsult AB	150
047	Rekuperativ aluminiumsmältugn. Utvärdering av degelugn på Värnamo Pressgjuteri.	Okt 93	Ola Hall Sydkraft Konsult AB	150
048	Konvertering av dieseldrivna reservkraftverk till gasdrift och kraftvärmeprod	Jan 94	Gunnar Sandström Sydkraft Konsult AB	150
049	Utvecklad teknik för gasinstallationer i småhus	Feb 94	P Kastensson, S Ivarsson Sydgas AB	150
050	Korrosion i flexibla rostfria insatsrör (Finns även i engelsk upplaga)	Dec 93	Ulf Nilsson m fl LTH	150

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
051	Nordiska Degelugnsprojektet. Pilot- och fältförsök med gasanvändning.	Nov 93	Eva-Maria Svensson Glafo	150
052	Nordic Gas Technology R&D Workshop. April 20, 1994. Proceedings.(På engelska)	Jun 94	Jörgen Thunell, Editor Swedish Gas Center	150
053	Tryckhöjande utrustning för gas vid metallbearbetning En förstudie av GT-PAK	Apr 94	Mårten Wärnö MGT Teknik AB	150
054	NOx-reduktion genom injicering av naturgas i kombination med ureainsprutning	Sep 94	Bent Karll, DGC P Å Gustafsson, Miljökons.	100
055	Trevägskatalysatorer för stationära gasmotorer.	Okt 94	Torbjörn Karlelid m fl Sydkraft Konsult AB	150
056	Utvärdering av en industriell gaseldad IR-strålare	Nov 94	Johansson, M m fl Lunds Tekniska Högskola	150

.

,