PROCESSTEKNIK 884

Sugpyrometern – en analys av instrumentet och råd till användare

Elisabet Blom, Peter Nyqvist, Dan Loyd

värmeforsk
VÄRMETEKNISK FORSKNING OCH UTVECKLING

Sugpyrometern – en analys av instrumentet och råd till användare

Suction pyrometer – analysis of the instrument and a guide for users

Elisabet Blom, Peter Nyqvist, Dan Loyd

P4-305

VÄRMEFORSK Service AB
101 53 STOCKHOLM · Tel 08-677 25 80
Oktober 2004
ISSN 0282-3772

Förord

I detta arbete var syftet att modernisera ett tidigare Värmeforskarbete angående sugpyrometrar från 1975. Då arbetet är väl definierat med tydliga avgränsningar lämpade det sig för ett examensarbete inom civilingenjörsutbildningen vilket utfördes vid institutionen för konstruktions och produktionsteknik vid Linköpings tekniska högskola.

Vi vill tacka vår referensgrupp bestående av Erik Dahlquist MDH, Torsten Bengtsson Alstom, Fredrik Karlsson Siemens DDIT, och Petri Jännti Foster Wheeler.

Speciella tack går till driften vid Vattenfalls panncentral vid Långsjönäs pappersbruk i Kisa under ledning av Enar Andersson. Dessutom vill vi tacka Hans Wenegård vid Pentronic som hjälpt till med utbildning i temperaturmätning och avsnittet om termoelement.

Ett särskilt tack vill vi ge till Rickard Ortsäter som har varit behjälplig vad det gäller transport och mätningar och Björn Zethraeus som hjälpt oss med bilder.

Linköping augusti 2004

Elisabet Blom

VÄRMEFORSK Service AB

Abstract

During a long period of time suction pyrometers have been used as referent instruments in temperature measurements in hot environments. To do this proper it is necessary to have a guide to how to approximate the errors which has not existed. This work contains both theoretical calculations of the errors and a field handling guide to avoid as many handling errors as possible. The main thing to remember is that a temperature transducer only can measure its own temperature we can only assist to get the temperature as close as possible.

Sammanfattning

Sugpyrometrar har länge använts för temperaturmätning inom ett flertal forskningsområden; som exempel kan förbränningsteknik och brandsäkerhet nämnas. Sugpyrometrar används också frekvent som referensinstrument för kalibrering och kontroll av driftinstrument som är installerade i förbränningsrum eller motsvarande omgivningar. I Värmeforsk rapport 23, ref [1], utkommen 1975 beskrivs hur en sugpyrometer bör konstrueras och vilka fel den är befattad med. Tack vare moderna beräkningsverktyg har man nu möjlighet att uppskatta felen bättre varför en revidering och utvidgning av den tidigare rapporten ansågs lämplig.

Projektets syfte är att förmedla kunskap om sugpyrometerns funktion och prestanda och att underlätta för nykonstruktion av sugpyrometrar. Rapporten är avsedd att öka förståelsen för temperaturmätning med sugpyrometer för etablerade och nytillkomna användare.

Sugpyrometern har utvärderats med hjälp av beräkningar och mätningar. Beräkningarna har utförts i FLUENT, vilket är ett beräkningsprogram avsedd för att lösa problem inom värmeöverföring och strömningslära. Mätningarna har utförts i en panna som eldas med biobränsle.

Mätningar och beräkningarna visade framförallt att en hög gashastighet i sugpyrometern krävs om mätfelet skall bli litet. Vidare visades det att sugpyrometerns noggrannhet kan variera kraftigt beroende på i vilken omgivning mätningen sker. Störst fel fås då gashastigheten är låg och då mätning sker i en omgivning där sugpyrometern upptar strålning från omgivningen. Då gashastigheten i sugpyrometern är hög och strålningstemperaturen i omgivningen är lägre än gastemperaturen så är mätfelet relativt okänslig för strålningstemperaturens storlek.

Summary

Shielded aspirated thermocouples have been used for research during a long time. Examples are research in combustion chambers and fire safety. Shielded aspirated thermocouples have also frequently been used as a reference for calibration and control of temperature instrument used in combustion chambers and similar environments. Due to the development of new calculation tools there are possibilities to estimate the errors in a better way. Because of this a revising and extension of the earlier report was appropriate.

The goal of the project is to gain more knowledge about shielded aspirated thermocouples and to make it easier for the designers of shielded aspirated thermocouples. The report is written for established as well as new users.

The evaluation was performed with simulations and measurements. The simulations were performed in FLUENT, a computer program designed for flow and heat calculations. The measurements were performed in a combustion chamber.

Measurements and simulations show that a high gas velocity in the shielded aspirated thermocouple is needed for high precision. It was also show that the accuracy is strongly dependent on the radiation temperature in the environment. The most extreme errors occur when the gas velocity is low and the radiation temperature in the environment is much larger than the gas temperature. When the gas velocity is high in the shielded aspirated thermocouple and the radiation temperature in the environment is lower than the gas temperature the errors are relative insensitive to the absolute value of the radiation temperature.

Innehållsförteckning

1 INLEDNING 1

1.1 BAKGRUND 1
1.2 MÅL OCH SYFTE 2
1.3 UTFÖRANDE 2

2 ALLMÄNT OM VÄRMEÖVERFÖRING OCH STRÖMNINGSLÄRA 5

2.1 BEGREPP INOM VÄRMEÖVERFÖRING 5
2.2 VÄRMELEDNING 6
2.3 KONVEKTION 6
2.4 STRÅLNING 8

3 ALLMÄNT OM MÄTNING 11

3.1 TEORI OM TERMOELEMENT 11
3.2 ALLMÄNT OM TERMOELEMENT 12
3.3 TERMOELEMENTETS FEL VID MÄTNING 14

4 BESKRIVNING AV SUGPYROMETER OCH DESS OMGIVNING 17

4.1 SUGPYROMETERNS DESIGN 17
4.2 SUGPYROMETERNS OMGIVNING UR ETT PRAKTISKT PERSPEKTIV 20

5 VÄRMETEKNISK ANALYS AV SUGPYROMETERSPETSEN 23

6 MODELLERING AV SUGPYROMETERSPETS 26

6.1 MODELLERINGENS SYFTE 26
6.2 MODELLERING I FLUENT 26
6.3 ANALYTISK MODEL 34

7 STATIONÄRA BERÄKNINGAR 36

7.1 FÖRUTSÄTTNINGAR 36
7.2 RESULTAT 36
7.3 SAMMANFATTNING AV STATIONÄRA BERÄKNINGAR 45

8 INSTATIONÄRA BERÄKNINGAR 47

8.1 FÖRUTSÄTTNINGAR OCH ANTAGANDEN 47
8.2 RESULTAT AV FALL I, U = 80M/S 47
8.3 RESULTAT AV FALL II 51
8.4 SAMMANFATTNING AV TRANSIENTA BERÄKNINGAR 53

9 MÄTNINGAR 54

9.1 BESKRIVNING AV PANNAN 54
9.2 MÄTUTRUSTNING 55
9.3 GENOMFÖRANDE 56
9.4 RESULTAT OCH ANALYS 58

10 RESULTATANALYS 63

11 KONSTRUKTION AV SUGPYROMETER 64

12 SLUTSATSER 67

13 LITTERATURREFERENSER 68

Bilagor

A ANALYS AV BERÄKNINGSMODELLEN

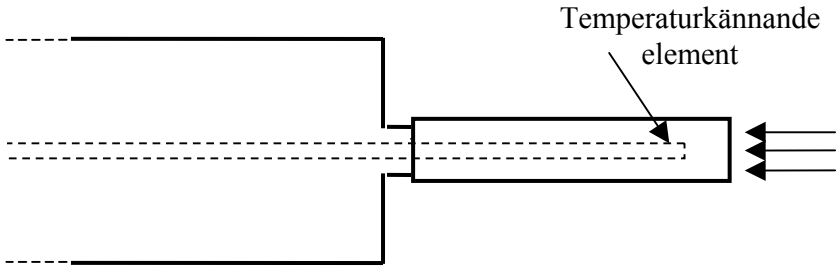
B ATT TÄNKA PÅ VID KONSTRUKTION AV SUGPYROMETER

C ATT TÄNKA PÅ VID MÄTNING MED SUGPYROMETER

1 Inledning

Ett temperaturkännande element (beröringstermoelement) kan enbart känna sin egen temperatur och den skiljer sig nästan alltid från den omgivande gasens p.g.a. värmeutbyte med omgivningen. I Värmeforsk rapport 23, ref [1], beskrivs hur ett instrument – en sugpyrometer - skall konstrueras för att minimera inverkan av värmeutbytet med omgivningen och maximera värmeutbytet med gasen. Beskrivningen i den tidigare rapporten fortfarande relevant men med dagens beräkningsmetoder kan en noggrannare beräkning av mätfelet i sugpyrometern göras, vilket redovisas i denna rapport. En steg för steg inriktad jämförelse mellan rapporterna är inte relevant att göra då beräkningsmetodiken skiljer sig avsevärt

Sugpyrometrar används för att mäta gastemperaturer i omgivningar där gastemperaturen skiljer sig mycket från omgivningens temperatur. I figur 1 ses en principskiss på mätdelen av sugpyrometern. Enkelt beskrivet består en sugpyrometer av ett temperaturkännande element (vanligtvis ett termoelement) som omges av ett rör för skydd mot strålning. Genom röret sugs gas förbi den temperaturkännande punkten med hög hastighet för att få en så god konvektiv värmeöverföring som möjligt. Det temperaturkännande elementet får då en omgivning där mätfel på grund av värmestrålning minimeras. I denna rapport behandlas endast sugpyrometrar med termoelement. Man skulle kunna tänkas använda även resistiva givare (t.ex. PT-100) men dessa har en övre temperaturbegränsning vid 600º [ref 5].



Figur 1. Schematisk figur över en sugpyrometer.

Figure 1. Schematic figure of a single shielded aspirated thermocouple.

1.1 Bakgrund

Sugpyrometrar har länge använts för temperaturmätning inom ett flertal forskningsområden; som exempel kan förbränningsteknik och brandsäkerhet nämnas. Andra områden som sugpyrometern används inom är stål- och glasindustrin. Sugpyrometrar används också frekvent som referensinstrument för kalibrering och kontroll av driftinstrument, som är installerade i förbränningsrum eller motsvarande omgivningar.

Det har tidigare utförts flera utvärderingar av sugpyrometrar, bland annat i Värmeforsks rapport 23, ref [1]. Denna rapport skrevs så tidigt som 1975 men utvärderingar finns även från senare år. Resultaten bygger på praktiska mätningar och beräkningsunderlag. Det gemensamma med utvärderingarna är att beräkningarna bygger på analytiska samband, där

mycket information försvunnit på grund av grova förenklingar och antaganden. Detta har lett till att det finns en mängd olika rekommendationer för användning och konstruktion av sugpyrometrar. Dessa rekommendationer skiljer sig tyvärr mycket åt. Ett exempel är rekommendationer av gashastigheten i sugpyrometern. I en utvärdering anses 5 m/s ge tillräckligt hög mätnoggrannhet medan en annan utvärdering rekommenderar en gashastighet mellan 100 m/s till 300 m/s, ref [2]. Denna motsägelse skapar en hel del förvirring.

Det finns också en ”myt” hos vissa sugpyrometeranvändare som innebär att sugpyrometrar mäter ”den verkliga gastemperaturen”. Detta är givetvis inte sant. Vetskapen om att en temperaturgivare endast mäter sin egen temperatur är inte tillräckligt utbredd bland användare. Temperaturgivarens temperatur beror av värmeutbytet med omgivningen. Om mätning av gastemperaturen sker i en omgivning med starka strålningsfält kan den uppmätta temperaturen skilja sig mycket från gastemperaturen. Detta mätfel kan vara betydligt större än det fel som uppstår i mätinstrumentet. Tyvärr tycks en del användare tro att en noggrann mätning främst beror av hur många decimaler displayen på instrumentet visar.

I utvärderingarna finns väldigt få rekommendationer om vilka termoelement som bör användas och vilket material strålskyddsröret bör bestå av. Detta beror på att ideérna kring hur en sugpyrometer fungerar tycks vara lika många som konstruktörerna och användarna.

Idag finns stora möjligheter att utföra numeriska beräkningar med hög noggrannhet. Med hjälp av moderna strömningstekniska beräkningar kan sugpyrometerns karakteristik bestämmas för ett stort antal mätsituationer som speglar verkliga fall. Man måste dock vara medveten om att såväl mätningar som beräkningar innehåller fel.

1.2 Mål och syfte

Syftet med projektet är dels att förmedla kunskap om sugpyrometerns funktion och prestanda dels att underlätta för nykonstruktion av sugpyrometrar genom att revidera och utvidga Värmeforsk rapport 23, ref [1]. Rapporten är avsedd att öka förståelsen för temperaturmätning med sugpyrometer för etablerade och nytillkomna användare. Målet med utredningen är således att:

- öka förståelsen angående användande och konstruktion av sugpyrometrar
- utföra strömningstekniska beräkningar som visar sugpyrometerns karakteristik för mätsituationer som speglar verkliga fall
- göra en lathund för användandet av sugpyrometrar som tar hänsyn till vanliga förutsättningar och problem
- rapporten skall kunna läsas av tekniker med varierande bakgrund inom strömningslära och värmeöverföring.

1.3 Utförande

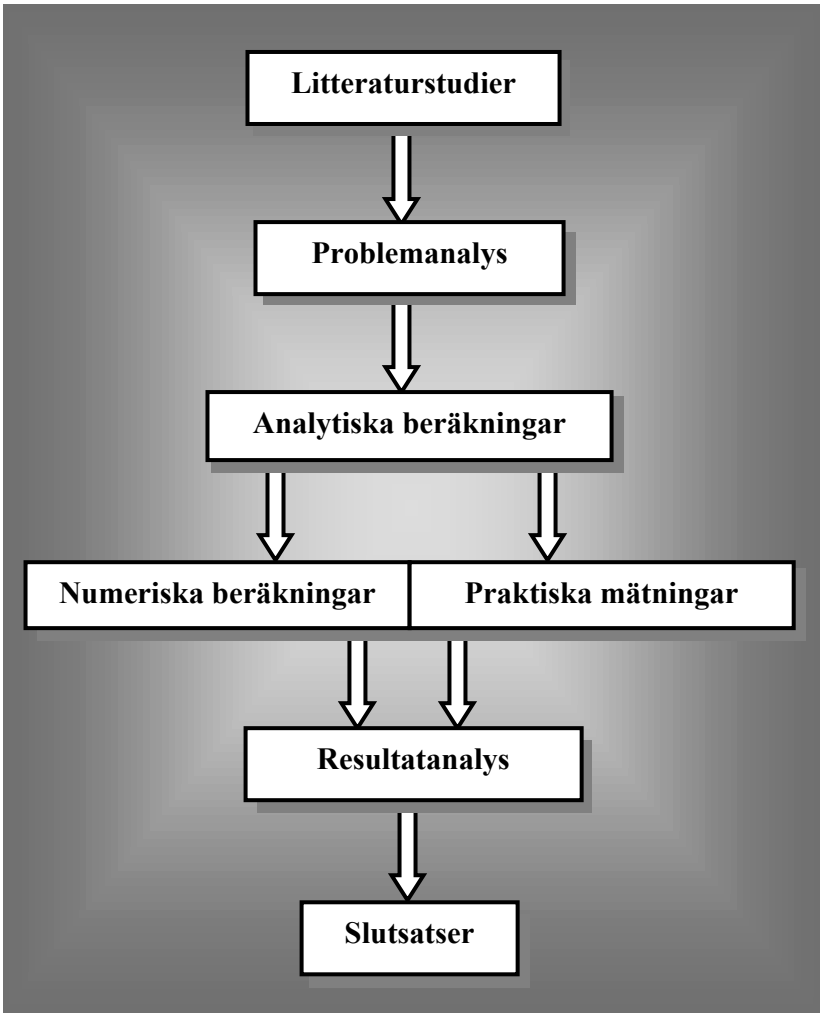
Figur 2 visar ett schema över utförandet av projektet.

Litteraturstudier utfördes på sugpyrometrar och dess omgivning. Detta för att kartlägga de olika varianter av konstruktioner som finns samt för att få en förståelse för de egenskaper omgivningen har som kan påverka mätresultatet. Litteraturstudier utfördes även på existerande matematiska modeller för sugpyrometerns mätfel och på numeriska lösningsmetoder som skulle kunna vara av intresse. Högtemperaturmätning och termoelement är ytterligare områden som studerades.

I problemanalysen studerades de faktorer som påverkar sugpyrometerns mätresultat och hur dessa faktorer skulle kunna modelleras. Av intresse var till exempel hur strålningen mellan strålskyddsröret och omgivningen skulle betraktas.

Analytiska beräkningar utfördes på sugpyrometern utifrån existerande matematiska modeller. För en given gastemperatur och omgivning beräknades mätpunktens temperatur med avseende på gashastigheten i sugpyrometern.

Projektet delades sedan in i två faser, numeriska beräkningar och praktiska mätningar. Syftet med de numeriska beräkningarna var att finna sugpyrometerns karakteristik för ett antal mätsituationer som speglar verkliga fall. Vidare var syftet att få en uppfattning om vilken gashastigheten som krävs för att uppnå tillräcklig noggrannhet. De praktiska mätningarna syftade mer till att få en uppfattning om de problem som kan uppstå. Mätningar utfördes också för att se betydelsen av gashastighet i sugpyrometern och hur mätresultatet påverkas av termoelementets position i mätspetsen.



Figur 2. Projektets genomförande.

Figure 2. Process of the project.

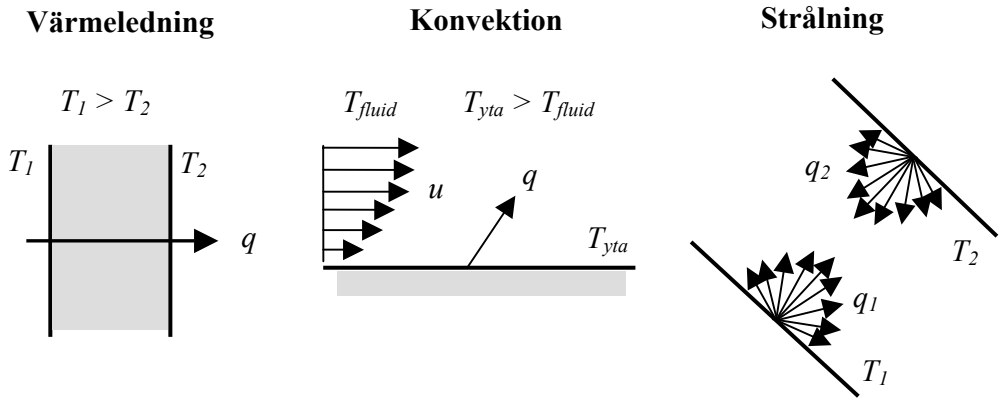
2 Allmänt om värmeöverföring och strömningslära

I detta kapitel förklaras de begrepp inom värmeöverföring och strömningslära som kontinuerligt används i rapporten. Matematiska formler undviks för enkelhets skull förutom de mest grundläggande sambanden som är nödvändiga för förståelsen. De partiella differentialekvationerna som använts i detta arbete kommer ej att diskuteras i detta kapitel, inte heller de numeriska lösningsmetoderna, utan detta tas upp i kapitel 6 ”Modellering av sugpyrometerspets”. Informationen till det här kapitlet är hämtad ur ref [3] och ref [4].

I rapporten används genomgående SI-enheter.

2.1 Begrepp inom värmeöverföring

När en temperaturdifferens existerar i en materia eller mellan olika materier så uppstår värmeöverföring. Denna värmeöverföring uppstår antingen genom *värmeledning*, *konvektion* eller *strålning*, eller normalt i kombinationer av de olika sätten. Figur 3 visar de olika principerna för värmeöverföring. Begreppet värmeledning används här då ett värmeflöde finns genom solider eller stationära fluider och begreppet konvektion används då ett värmeflöde finns mellan en yta och en strömmande fluid. Värmeöverföringen benämns strålning då denna sker genom elektromagnetiska vågor. Varje yta som har en temperatur över den absoluta nollpunkten strålar värmeenergi och mellan två ytor, med olika temperaturer och som ”ser varandra”, existerar alltid ett resulterande värmeflöde på grund av strålning.



Figur 3. Värmeöverföringsprocesser; värmeledning, konvektion och strålning.

Figure 3. Different types of heat transfer processes; conduction, convection and radiation.

2.2 Värmeledning

Värmeflödet genom ett material är proportionellt mot temperaturgradienten i materialet och definieras som

$$q = -kA\frac{\partial T}{\partial x}, \qquad (1)$$

där q är värmeflödet i watt, k är värmeledningskoefficienten hos materialet och har enheten watt per meter och Kelvin [W/mK]. $\partial T/\partial x$ är temperaturgradienten i värmeflödets riktning och A är tvärsnittsarean i kvadratmeter hos materialet. Minustecknet i ekvationen är en konsekvens av termodynamikens andra huvudsats, det vill säga att värmeflöde sker från en högre temperatur till en lägre temperatur. k är ofta starkt temperaturberoende och beror av materialets struktur och molekylära sammansättning. För de flesta konventionella materialen finns uppmätta värden på k och de kan hittas i litteratur.

Värmeledning i solider och fluider sker via rörelser av atomer och molekyler. Energi transporteras från partiklar av ett ämne med mer energi till andra partiklar med lägre energi genom att partiklarna interagerar med varandra.

Om en för ögat ”stillastående gas” studeras så sker ändå en kontinuerlig slumpmässig rörelse hos molekylerna i gasen. Energiutbyte sker då i gasen genom att molekylerna i gasen kolliderar med varandra. Molekyler med mer energi avger energi till molekyler med lägre energi vid kollisionen.

I vätskor sker ungefär samma sak men molekylerna är mer tätpackade och således kolliderar molekylerna mer frekvent.

I solida material sker energitransporten främst genom rörelsen hos fria elektroner i den molekylära strukturen hos materialet. De fria elektronerna transporterar värmeenergi från ett högtemperaturområde till ett lågtemperaturområde, på samma sätt som de kan transportera elektrisk laddning. Material med bra elektrisk ledningsförmåga har således även ofta bra värmeledningsförmåga. Energiöverföring kan också ske genom vibrationer i den molekylära strukturen men denna energitransport är vanligtvis mycket lägre än den energi som transporteras med elektroner.

2.3 Konvektion

Värmeflödet från en yta till en vätska eller gas i rörelse kan skrivas

$$q = hA(T_{yta} - T_{\infty}), \qquad (2)$$

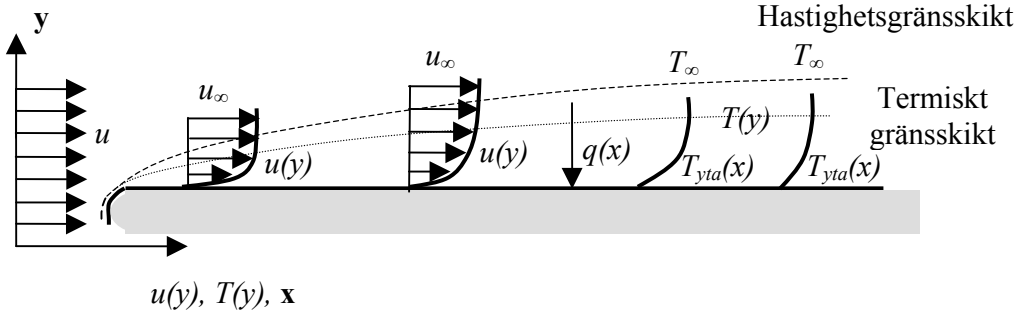
Där h är värmeövergångskoefficienten (konvektionstalet) som har enheten watt per kvadratmeter och Kelvin. T_{yta} är ytans temperatur och T_{∞} är friströmstemperaturen hos gasen eller vätskan. A är arean i kvadratmeter på den yta som konvektionen verkar på.

Konvektion brukar delas upp i två fall, naturlig konvektion och påtvingad konvektion. Den naturliga konvektion beror av densitetsvariationer i fluiden som uppstår på grund av temperaturvariationer. Densitetsvariationerna ger upphov till krafter som gör att fluiden rör

sig. Begreppet påtvingad konvektion används då en yttre kraft sätter fluiden i rörelse, till exempel en fläkt, eller att kroppen som studeras befinner sig i rörelse.

Hur fungerar då konvektion? Figur 4 visar en kropp som omges av en strömmande fluid. Fluiden antas här ha en konstant hastighet, u(y), en bit före kroppen. Längs med kroppen, i riktningen x, bildas ett hastighetsgränsskikt till följd av fluidens friktion mot kroppen. Hastighetsgränsskiktet ökar i tjocklek längs flödesriktningen på grund av de viskösa krafter som verkar i fluiden. Hastigheten varierar från $u = 0$ vid kroppens yta, till $u = u_\infty$, där u_∞ är friströmshastigheten.

Om fluidens temperatur skiljer sig från ytans temperatur, kommer på samma sätt ett termiskt gränsskikt att existera. I gränsskiktet varierar temperaturen från T_{yta} vid ytan till T_∞ i friströmmen. Till följd av temperaturdifferensen fås ett värmeflöde q från fluiden till kroppen, då $T_\infty > T_{yta}$. Värmeflödet sker genom ledning vid ytan där hastigheten är noll, men hastighetsfördelningen vid ytan påverkar temperaturgradienten och således påverkas värmeflödets storlek. En hög hastighet ger alltså en hög konvektiv värmeöverföring. Notera här att värmeflödet kommer minska med läget i x-led till följd av att det termiska gränsskiktet ökar i storlek, vilket i sin tur medför att temperaturgradienten minskar i storlek.



Figur 4. Hastighet- och termiskt gränsskikt. Längs strömningsriktningen ökar gränsskikten i storlek.

Figure 4. Velocity- and thermal boundary layer. Along the flow direction the boundary layers increase.

Det inses att eftersom värmeflödet, q varierar längs med kroppen så måste även värmeövergångskoefficienten, h, göra det. h som funktion av läget är dock mycket svår att bestämma analytiskt, endast ett fåtal lösningar under ideala förutsättningar finns för detta. Däremot finns ett stort antal empiriska formler för h för olika typer av kroppar, tex. sfärer och cylindrar. Dessa är framtagna ur experiment och beskriver ofta ett medelvärde på h för hela kroppen. h kan bestämmas ur sambandet:

$$h = \frac{Nu _ k}{L}, \tag{3}$$

där L är en karakteristisk längd som konvektionen verkar på, till exempel diametern i ett rör, och k är värmeledningskoefficienten hos fluiden. Nu är Nusselts tal som är

dimensionslöst och som vid påtvingad konvektion är en funktion av Reynolds och Prandtls tal. Nusselts tal tecknas ofta som

$$Nu = C\,\mathrm{Re}^{m}\,\mathrm{Pr}^{n}, \tag{4}$$

där C, m, n är koefficienter som fås från experimentella data. Re är Reynolds tal och Pr är Prandtls tal och de är också dimensionslösa parametrar. Reynolds tal definieras som

$$\mathrm{Re} = \frac{UL}{\nu}, \tag{5}$$

där U är en karakteristisk hastighet för fluiden, L är en karakteristisk längd i meter hos kroppen och ν är fluidens kinematiska viskositet. Prandtls tal beror av fluidens förmåga att uppta energi, dess dynamiska viskositet och värmeledningsförmåga.

Den konvektiva värmeöverföringen beror mycket av hur flödet ser ut i gränsskiktet, det vill säga om flödet är laminärt eller turbulent. Vid laminärt flöde rör sig fluiden i ordnade skikt medan vid turbulent flöde så fluktuerar flödet med tiden och består av en mängd virvlar av olika storlekar. Det medför att vid turbulent flöde är värmeöverföringen högre på grund av att fluiden blandar sig mer. Turbulent flöde existerar framförallt vid höga Reynolds tal, till exempel så är flödet i ett rör turbulent för Reynolds tal i storleksordningen 2300 eller högre.

När stor noggrannhet krävs för att bestämma konvektionen är det lämpligast att utföra både experiment och numeriska beräkningar, till exempel genom att beräkna hur strömningsfältet ser ut vid kroppen och koppla det med värmetransporten i kroppen.

2.4 Strålning

Vid konvektion och värmeledning sker alltid värmetransport via materia, men värmeenergi kan även transporteras genom vakuum. Då sker transporten genom elektromagnetisk strålning. En svart kropp emitterar alltid en strålning som kan tecknas

$$q = \sigma A T^{4}, \tag{6}$$

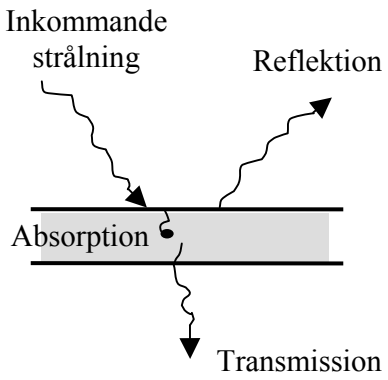
där σ är Stefan-Boltzmanns konstant ($5.67 \cdot 10^{-8}$ $\mathrm{W/m^2K^4}$), T är ytans absoluta temperatur i Kelvin och A är ytans area i kvadratmeter. Ytor som är svarta kan antas ha denna egenskap men en svart kropp är en idealisering och en verklig kropp emitterar alltid en lägre strålning. Emission av strålning hos en verklig kropp ges av

$$q = \varepsilon\sigma A T^{4}. \tag{7}$$

Emissionstalet, ε, varierar mellan 0 och 1 och anger hur effektivt kroppen strålar i förhållande till en svart kropp. Emissionstalet beror bland annat av ytans struktur, material, temperatur och med vilken våglängd materialet strålar. Emissionstal för vanliga material, med olika ytstrukturer, finns att hitta i litteratur.

2.4.1 Egenskaper hos strålning

Ekvation (7) beskriver hur mycket värmeenergi en yta strålar. Det som är något mer komplicerat att beskriva är det resulterande värmeflödet mellan flera ytor. När värmestrålning från en yta träffar en annan yta så kommer en del av strålning att absorberas, en del att reflekteras och en del att transmitteras, se figur 5. De flesta solida materialen transmitterar ingen strålning men det finns undantag som till exempel glas. Rökgaser absorberar, reflekterar och transmitterar strålning medan luft kan i de flesta fall anses som helt transparant, det vill säga luft deltar inte i värmestrålningsprocesser.

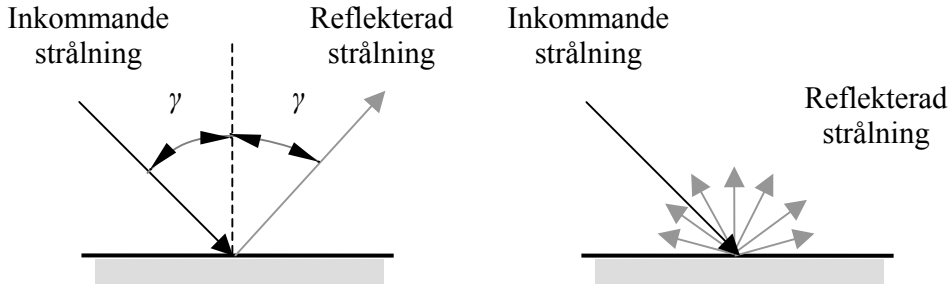


Figur 5. Reflektion, absorption och transmission i ett material som utsätts för strålning.

Figure 5. Reflection, absorption and transmission in a material exposed to radiation.

Hur strålningen reflekteras i ytan är mycket komplicerat. Generellt brukar två typer av reflektioner nämnas, spekulär och diffus reflektion. Figur 6 visar de två fenomenen. Till vänster ses spekulär reflektion och till höger ses diffus reflektion. För den spekulära reflektionen gäller att när en värmestråle träffar ytan med en viss vinkel så reflekterar den med samma vinkel. För den diffusa reflektionen gäller att värmestrålen kommer att reflektera jämnt i alla riktningar. I verkligheten finns inga ytor som är helt spekulära eller diffusa, men ytor kan ha egenskaper som liknar dessa speciella fall. En skrovlig yta reflekterar ofta mer eller mindre diffust medan en högpolerad yta reflekterar mer spekulärt. Ytor kan också ha båda egenskaperna. En spegel är i stort sett spekulär i synligt ljus men uppträder mer diffust för en del andra våglängder.

I föregående avsnitt diskuterades det hur en svart kropp strålar. Grå kropp är ett annat vanligt begrepp. En grå kropps värmestrålning är oberoende av våglängden. När man beräknar värmestrålningen mellan ytor är det i de flesta fall acceptabelt att anta att ytorna är gråa. Vid beräkningar behöver inte den verkliga kroppens strålning vara oberoende av våglängden för hela det elektromagnetiska spektrumet, det vill säga för alla våglängder. Det räcker med att värmestrålningen i stort sett är oberoende i det temperaturområde som ytorna befinner sig i.



Figur 6. Spekulär reflektion (vänster) och diffus reflektio, (höger).

Figure 6. Specular (left) and diffus (right) reflection.

2.4.2 Värmestrålning mellan ytor

Det har tidigare nämnts att strålningen mellan flera ytor är svår att bestämma i verkligheten. Emissivitet och absorptionen hos ytan kan vara både våglängdsberoende och temperaturberoende. Vidare kan reflektioner och emissioner vara riktningsberoende, det vill säga intensiteten hos strålningen varierar för olika riktningar. Om en del antagande görs kan dock värmestrålningen mellan ytor enkelt beskrivas matematiskt. Värmestrålningen mellan två isotermiska ytor, yta *j* och yta *k*, som är gråa och diffusa kan tecknas

$$q_{j\to k} = \frac{\sigma\left(T_j^4 - T_k^4\right)}{\dfrac{1-\varepsilon_j}{\varepsilon_j A_j} + \dfrac{1}{F_{jk} A_j} + \dfrac{1-\varepsilon_k}{\varepsilon_k A_k}}, \tag{8}$$

där F_{jk} är andelen strålningenergi som lämnar yta *j* och träffar yta *k*. Om yta *j* är konvex och helt omgiven av yta *k* så är $F_{jk} = 1$. Om yta *k* även är mycket större än yta *j* kan ekvation (8) förenklas till

$$q_{j\to k} = \varepsilon_j \sigma A_j \left(T_j^4 - T_k^4\right). \tag{9}$$

2.4.3 Gasstrålning

Värmeutbytet mellan en gas som är icke-transparent och en solid yta är ett mycket komplicerat problem. Gasers absorption är ofta mycket våglängdsberoende till skillnad från solida material. Approximativt kan värmestrålningen mellan en gas och en grå yta tecknas

$$q_{gasstrå\,\mathrm{ln}\,ing} = \frac{1+\varepsilon_{yta}}{2} \sigma A_{yta} \left(\varepsilon_{gas} T_{gas}^4 - \alpha_{gas} T_{yta}^4\right), \tag{10}$$

där α_{gas} är ytans absorptionsfaktor som beror på gasens sammansättning, sträckan som strålningen färdas genom gasen, tryck och temperatur. ε_{gas} och α_{gas} fås ur empiriskt framtagna samband.

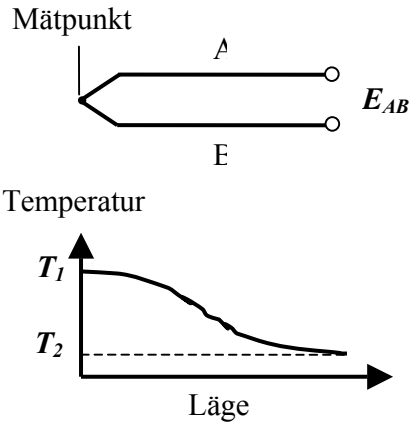
3 Allmänt om mätning

En temperaturgivare mäter endast sin egen temperatur och den temperaturen är en direkt konsekvens av värmeutbytet med omgivningen runt givaren. I sugpyrometrar används vanligen termoelement för att registrera temperaturen. Detta kapitel tar upp hur ett termoelement fungerar och några av de fel som uppkommer vid mätning i förbränningsrum eller motsvarande omgivningar.

3.1 Teori om termoelement

Termoelement består av två trådar av olika metaller eller i de flesta fall metall legeringar som är i kontakt med varandra i en punkt i ena änden. Denna punkt kallas för mätpunkt och finns i temperaturgivarens spets. Figur 7 visar en schematisk bild av ett termoelement som befinner sig i en omgivning där temperaturen varierar. Temperaturen varierar längs med termoelementet och då en temperaturskillnad finns mellan mätpunkten och de två fria ändarna uppstår en elektrisk spänning mellan de fria ändarna. Enligt ref [5] erhålls spänningen som

$$E_{AB} = \int_{T_1}^{T_2} S_{AB}(T)dT. \tag{11}$$



Figur 7. Exempel på hur temperaturen varierar i ett termoelement.

Figure 7. Example on how the temperature varies along a thermocouple.

Den elektriska spänningen, E_{AB}, benämns Seebeck-spänning och S_{AB} är seebeck- koefficienten som har enheten mikrovolt per Kelvin. Om egenskaperna hos de två trådarna som är i kontakt med varandra är kända, det vill säga deras Seebeck-koefficienter, så kan alltså temperaturen härledas från den spänning som uppstår mellan trådarna. Ekvation (11) kan ofta förenklas till

$$E_{AB} = S_{AB}\left(T_{mät} - T_{ref}\right). \tag{12}$$

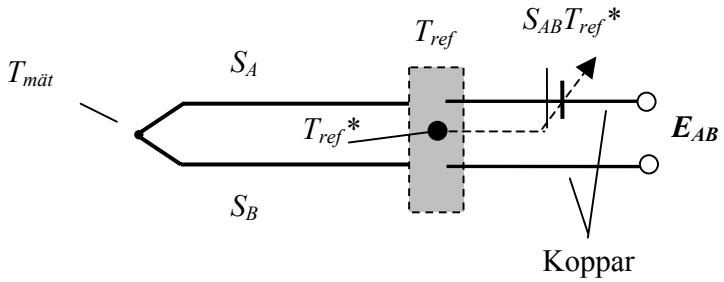
T_{ref} är temperaturen i den punkt där termoelementtrådarna övergår till ledningar av koppar, referenspunkten, det vill säga i mätinstrumentet. Om man placerar punkten i ett isbad (T_{ref}=0˚C) så inses att

$$T_{mät} = \frac{E_{AB}}{S_{AB}}. \tag{13}$$

Vanligtvis mäter man i förhållande till rumstemperatur och i dagens mätinstrumentet finns en kompensering för den temperatur som referenspunkten har. Kompenseringen är oftast optimerad för mätning i rumstemperatur (20 °C – 25 °C). Figur 8 visar hur kompensering av referenspunktens temperatur sker. Seebeckspänningen kan tecknas

$$E_{AB} = S_{AB}\left(T_{mät} - T_{ref} - T_{ref}*\right) \tag{14}$$

Om $T_{ref} = T_{ref}*$ så gäller ekvation (13). Om instrumentet däremot är placerat i en miljö där temperaturen skiljer sig från rumstemperaturen så ökar mätfelet.



Figur 8. Schematisk figur över kompensering av referenspunktens temperatur. [ref 5]

Figure 8. Schematic figure over compensation for temperature of reference point.[ref 5]

Ett termoelement består alltså av metaller eller legeringar som har Seebeck-koefficienter som skiljer sig från varandra.. Spänningar uppstår överallt i termoelementet där det finns temperaturgradienter. Utifrån summan av dessa spänningar kan temperaturen härledas.

3.2 Allmänt om termoelement

Det finns många olika typer av standardiserade termoelement. Typerna skiljer sig åt i vilken mätsignal de ger, vilket temperaturområde de är lämpade för och hur resistenta de är mot typer av atmosfärer. I denna rapport behandlas endast typ K, typ N och typ R. För beskrivning av andra termoelement, se ref [5].

I tabell 1 ses en översikt av ovan nämnda termoelement, där användningsområde, material, Seebeck-koefficienter och andra egenskaper visas.

Termoelement som bildas av legeringarna Chromel/Alumel och Nicrosil/Nisil är standardiserade legeringar. De Seebeck-koefficienter som visas i tabellen gäller vid rumstemperatur. Koefficienterna är i verkligheten temperaturberoende.

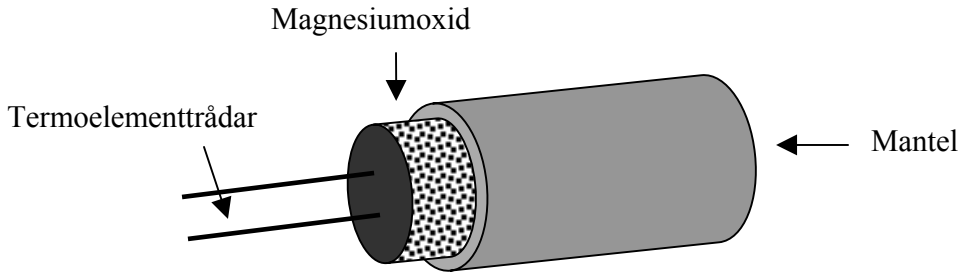
Att typ N är bättre än typ K vid högre temperaturer beror på att typ N är mer termoelektriskt stabil, ref [6]. Med termisk stabilitet menas att typ N har en materialsammansättning som motverkar molekylära förändringar i termoelementets material vid mätning i höga temperaturer. Molekylära förändringar sker alltid i termoelementet, vilket påverkar materialets Seebeck-koefficient, men beroende på material och dess sammansättning så kan den minskas. Typ R och andra termoelement av ädla metaller har en mycket hög termoelektrisk stabilitet. Dessa termoelement är dock mycket dyra i förhållande till typ N och K. Termoelement av typ R bör därför endast användas då temperaturen är för hög för att andra termoelement skall kunna användas eller då krav på noggrannhet är av yttersta vikt. Termoelement med platina kräver dessutom skyddsrör av mycket hög kvalitet för att inte degenerera.

Tabell 1. Termoelementsdata

Typ	Arbetsområde	Atmosfärtålighet	Material	**Seebeck-koefficient** ("känslighet")
K	-200°C - 1260°C	Oxiderande miljöer förutom reducerande, tex. svavel, cyanid, kol och väte.	+ Chromel - Alumel	40.3 μVK^{-1}
N	0°C - 1300°C	Som typ K, med bättre egenskaper över 200 °C.	+ Nicrosil - Nisil	26.6 μVK^{-1}
R	0°C - 1480°C	Alla oxiderande miljöer då keramiskt skyddsrör används.	+ Platina (13%Rhodium) - Platina	5.8 μVK^{-1}

Ur ett signalanalytiskt perspektiv finns det orsak att välja ett termoelement med så hög signal per grad som möjligt eftersom ett mätsystem alltid har en viss brusnivå och är det som skall mätas betydligt högre än brusnivån (signal/brusförhållande) blir detektionen enklare. Detta kan tolkas som om typ K skall användas i detta fall men även termoelementets termiska stabilitet i det aktuella området har betydelse vilket talar för typ N vid temperaturer över 200 ºC.

Det finns flera olika konstruktioner av termoelement. Den enklaste formen är två trådar som sammanfogas i en punkt. Vid mätning i höga temperaturer är det dock vanligt att mantlade termoelement används. De två trådarna är då isolerade i ett material, vanligtvis bestående av hårt packad magnesiumoxid, som i sin tur är mantlat i en metallegering, se figur 9. Mantlade termoelement är mer tåliga mot aggressiva miljöer och höga temperaturer än trådtermoelement, via samma tråddimension. Mantlade termoelement går att bocka till önskad form men för varje termoelement finns en minsta bockningsradie. Manteldiametern är vanligen 1 mm - 8 mm och tråddiameternär normalt ca 20 % av manteldiametern. Bockningsradien bör vara större än dubbla manteldiametern.



Figur 9. Mantlat termoelement. Termoelementtrådarna är isolerade i magnesiumoxid. Ytterst finns en mantel.[ref 16]

Figure 9. Sheathed thermocouple. The thermocouple wires are insulated in magnesia oxide, sheathed by a metal jacket.[ref 16]

3.3 Termoelementets fel vid mätning

Temperaturen i termoelementets mätpunkt kan ofta bestämmas med stor noggrannhet, observera att temperaturgivare bara kan mäta sin egen temperatur. De fel som uppstår sker i instrumentet, till exempel då referenstemperaturen skiljer sig från rumstemperaturen. Rätt använt instrument ger dock ett fel som i de flesta fall är försumbart i förhållande till felet på grund av att mätpunktens temperatur skiljer sig från den lokala omgivningens temperatur, vilket man vill mäta.

Vid mätning under stationära förhållanden så beror skillnaderna hos mätpunktens och den lokala omgivningens temperatur på:

- Värmestrålning från eller till termoelementet.
- Värmeledning längs med termoelementet.
- Katalytisk upphettning av termoelementets yta på grund av kemiska reaktioner med omgivningen.
- Viskös upphettning (friktion) av termoelementet till följd av höga hastigheter hos den omgivande gasen.
- Kompressibla effekter:

    1. Gastemperaturen som ska mätas i omgivningen är den statiska temperaturen som egentligen skall mätas med instrumentet som rör sig med gasens hastighet. Detta är inte omöjligt. Vid termoelementets ändpunkt fås däremot en temperatur mellan den statiska temperaturen och den totala temperaturen. Den totala temperaturen är den temperatur som fås om gasen bromsas adiabatiskt och reversibelt till stillastående mot termoelementets ändpunkt. Vid höga hastigheter (runt 100 m/s) kan det förväntas att mätfelet (på grund av denna effekt) blir några grader Celsius.

    2. Vid mycket höga hastigheter är gasen inte längre inkompressibel. Om gasen expanderar och minskar temperaturen hos gasen.

3.3.1 Ett exempel på mätning i ett förbränningsrum

Den största felkällan vid mätning i förbränningsrum är värmestrålning till eller från termoelementet. Figur 10 visar ett termoelement i ett rum med ett starkt strålningsfält i omgivningen, där strålningsfältet beror på att väggarnas temperatur, T_∞, skiljer sig från gasens temperatur, T_g. Runt termoelementet strömmar gasen med hastigheten W. För enkelhets skull antas gasen vara helt transparant. Notera att detta inte är sant för ett förbränningsrum. Vidare antas det att väggarna och gasen är isoterma och att värmeledningen är försumbar och att $T_\infty < T_{gas}$. En energibalans kan då tecknas för termoelementet. Om värmeledningen längs termoelementet försummas gäller för ett stationärt förlopp

$$q_{konvektion} = q_{strå\,ln\,ing} \tag{15}$$

Genom att utnyttja ekvation (2) och (9) från kapitel 2 kan temperaturdifferensen mellan mätpunkten och gasen tecknas

$$T_g - T_t = \frac{\sigma\varepsilon}{h}\left(T_t^4 - T_\infty^4\right), \tag{16}$$

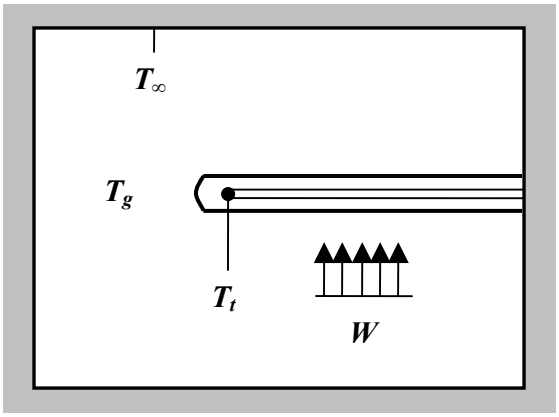
där T_t är termoelementets temperatur, ε är termoelementet emissivitet, σ Stefan-Boltzmanns konstant och h är värmeövergångskoefficienten (konvektionstalet) mellan gasen och termoelementet. Ett antal empiriska samband finns för att beräkna h för en omströmmad cylinder via Nusselts tal. Ett vanligt samband är, ref [3]:

$$Nu_f = C\left(\frac{w_\infty d}{\nu_f}\right)^n \mathrm{Pr}_f^{1/3}, \tag{17}$$

Där index f anger att parametrarna är bestämda för temperaturen i termoelementets gränsskikt. w_∞ är friströmshastigheten, ν är den kinematiska viskositeten, d är termoelementets ytterdiameter och Pr är Prandtls tal. C och n är konstanter som beror av Reynolds tal. För definitioner av Re och Nu, se ekvation (3) och (5) i kapitlet ”*Allmänt om värmeöverföring och strömningslära*”. Med ekvation (17) och (5) insatt i ekvation (16) blir storleksordningen hos temperaturdifferensen

$$T_g - T_t \sim \frac{d^n}{w^n}\left(T_t^4 - T_\infty^4\right). \tag{18}$$

Om normala driftförhållanden råder i ett förbränningsrum så är gashastigheten runt 1 m/s – 2 m/s, och gastemperaturen runt 1100 K. Om diametern hos termoelementet är 3 mm så är n ungefär 0.4. Studeras ekvation (16) så inses att om T_∞ (representativ väggtemperatur) skiljer sig mycket från T_g (verklig gastemperatur) så fås en stor temperaturdifferens mellan gasen och termoelementet eftersom strålningens inverkan ökar. Vidare inses det att höga gashastigheter och små diametrar minskar temperaturdifferensen



Figur 10. Mätning med termoelement i en omgivning med starkt strålningsfält.

Figure 10. Measurement with a thermocouple in an environment with a strong radiation field.

Ett sätt att minska temperaturdifferensen är att mäta med sugpyrometer. Sugpyrometrar är designade för att minska värmestrålningen mellan termoelementet och omgivningen. I sugpyrometrar sugs den gas som skall mätas genom ett rör som omsluter termoelementet. Vid höga hastigheter hos gasen får det omslutande röret en temperatur som ligger mellan T_g och T_∞, vilket minskar värmestrålningen från termoelementet och därmed felmätningen. Detta kommer att diskuteras utförligare i kapitlet 4 och 5.

Hittills har analysen handlat om mätningar under stationära förhållanden. Instationära förhållanden är långt mer komplicerade.

Om den konvektiva värmeöverföringen och termoelementets materialegenskaper antas vara av störst betydelse vid instationära förhållanden och att strålning och värmeledning antas vara försumbara för termoelementets tidssvar vid en föränderlig gastemperatur, så kan en tidskonstant, τ, för termoelementet tecknas som

$$\tau = \frac{\rho_t c_t d}{4h} \,, \tag{19}$$

där c och ρ är termoelementets specifika värmekapacitet respektive densitet. Termoelementet betraktas då som en lång cylinder. Temperaturdifferensen mellan gasen och termoelementet kan då tecknas

$$T_g - T_t = \tau \frac{\partial T_t}{\partial t} \,. \tag{20}$$

Studeras ekvation (19) och (20) inses även här att höga gashastigheter och små diametrar minskar termoelementets tidssvar för en föränderlig temperatur. I förbränningsrum fluktuerar ofta gastemperaturen och om denna fluktuerar med en mindre tidsskala än storleken hos τ så kan stora mätfel uppstå. Detta behöver dock inte vara ett stort problem. Ofta fluktuerar temperaturen kring ett medelvärde och felet blir av mindre betydelse om ett medelvärde hos gasens temperatur söks.

4 Beskrivning av sugpyrometer och dess omgivning

Sugpyrometrar används för att mäta gastemperaturer, främst i omgivningar där gastemperaturen skiljer sig mycket från den resterande omgivningens temperatur. Ett exempel är mätning i förbränningsrum hos ångpannor, där gastemperaturen är mycket högre än de kylda väggarna i förbränningsrummet. Ett annat exempel är mätning i smältugnar där omvända förhållanden råder. Det finns också andra fall där sugpyrometern kan vara till nytta, till exempel då temperaturen i ett rum där det brinner ska undersökas.

I kapitel 3 diskuterades de problem som uppstår vid mätning med termoelement i en omgivning där gastemperaturen skiljer sig från resterande omgivningstemperatur. Det nämndes i avsnitt 3.3 att den temperatur som termoelementet registrerar bland annat beror av:

- Den konvektiva värmeöverföringen mellan gasen och termoelementet.
- Värmestrålningen från och till termoelementet.
- Värmeledningen i termoelementet.

Det visades att värmestrålningen i förbränningsrum eller motsvarande är den största faktorn till att stora mätfel uppstår vid mätning med termoelement. Sugpyrometrar är designade för att minimera denna värmestrålning från eller till termoelementet.

En sugpyrometer är utrustad med ett yttre skyddsrör runt termoelementet. Genom röret sugs den gas som skall mätas med en yttre drivkraft, tex. en ejektorpump. Den goda konvektiva värmeöverföringen som uppstår gör att termoelementet då får en omgivning där felet på grund av värmestrålning minimeras. En hög konvektiv värmeöverföring medför också att inverkan av värmeledning längs termoelementet blir mycket liten.

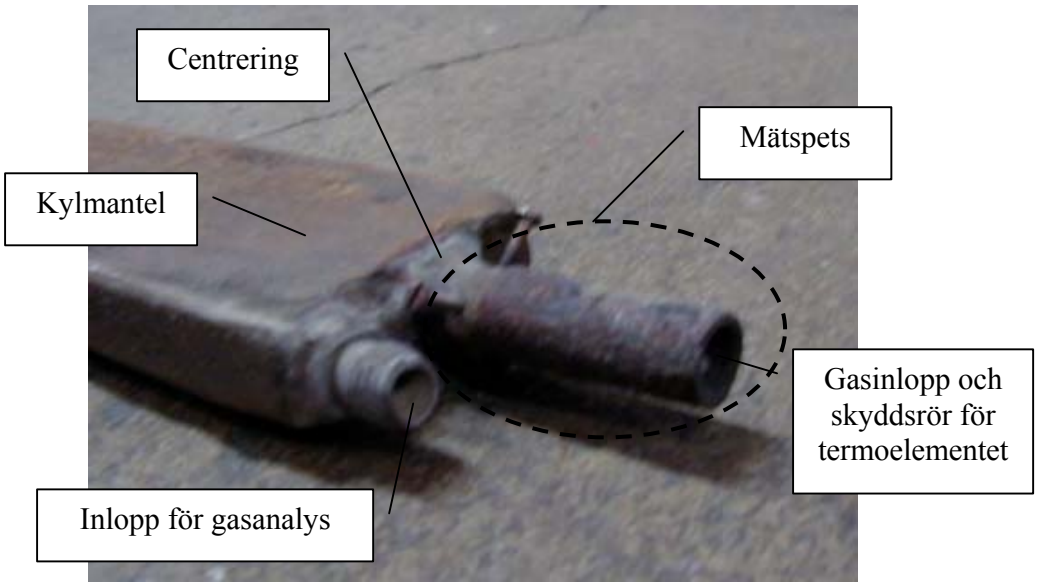
4.1 Sugpyrometerns design

Det finns en mängd olika varianter på sugpyrometrar, som är designade efter vissa krav på robusthet, mätnoggrannhet och den omgivning sugpyrometern är avsedd att användas i. I figur 11 visas ett fotografi av mätspetsen hos en mer robust sugpyrometer. Med mätspets menas här den yttre rörhylsan, skyddsröret, och den del av termoelementet som skyddsröret omger. Skyddsröret är i detta fall av rostfritt stål men det finns också sugpyrometrar där skyddsröret är av keramik, se figur 12. Ett keramiskt skyddsrör anses ge en något högre mätnoggrannhet då det leder mindre värme men samtidigt är utrustningen mycket skör. Skyddsrörets innerdiameter är vanligtvis mellan 5-20 mm och längden mellan 3-15 cm. I figur 11 ses också att ytan på skyddsröret är mycket korroderad, vilket den snabbt blir vid mätning i aggressiva miljöer som tex. i förbränningsrum.

Termoelementet ligger längs med hela sugpyrometern i ett rör och har sin mätpunkt i mätspetsen. Mätspetsen är ihopkopplad med röret. I mätspetsen finns en centrering så att termoelementet inte ligger an mot skyddsröret. Centreringen kan bestå av allt från skruvar till speciella hylsor. Centreringen bör vara utformad så att flödet inte stryps för mycket. Vissa typer av sugpyrometrar har flera koncentriska skyddsrör där gas sugs i varje rör. Dessa sugpyrometrar är ännu effektivare men kräver desto mer drivkraft för att uppnå tillräckligt hög hastighet på gasen.

Bredvid mätspetsen finns ofta ett ytterligare rör för att kunna utföra gasanalyser. Gas sugs också genom detta rör och i andra änden av sugpyrometern kopplas en utrustning för analys av gasen.

Figur 11 visar också sugpyrometerns kylmantel. I manteln kyls sugpyrometern med hjälp av vatten. Om inte vattenkylningen fungerar blir sugpyrometern mjuk vid mätning i höga temperaturer, vilket kan leda till att sugpyrometern viker sig och totalförstörs. Ett vattenflöde med vanligt kranvatten är ofta tillräckligt.



Figur 11. Fotografi på en sugpyrometerspets. I fotografiet ses även en del av kylmanteln.

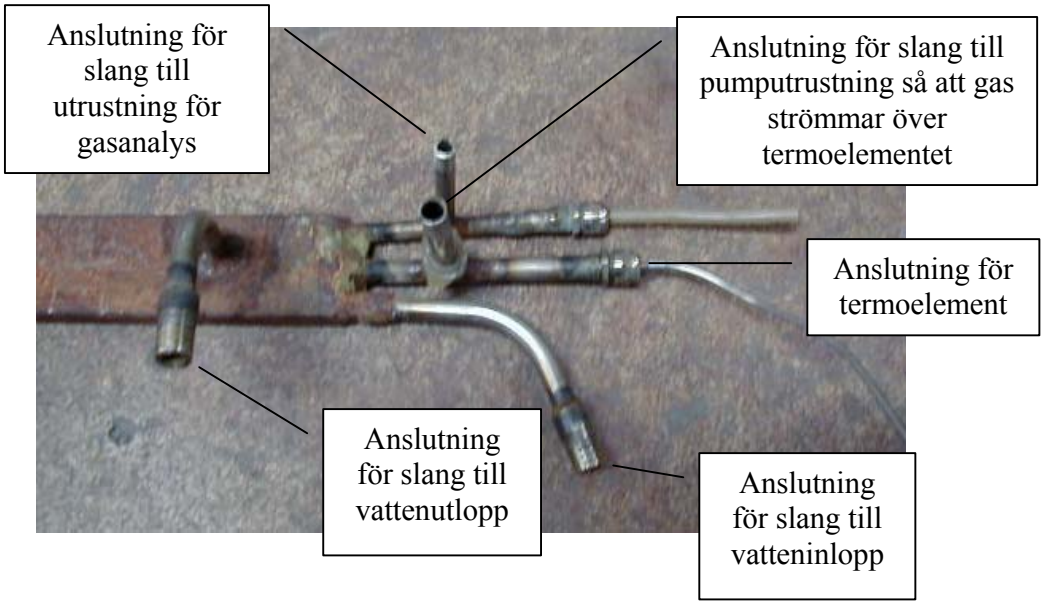
Figure 11. Photo of the measurement part of a shielded aspirated thermocouple. The photo also views a part of the cooling system.

Det rektangulära tvärsnittet på sugpyrometern i Figur 11 beror på förutsättningarna att komma in I en falltubspanna med 20 mm fena utan att göra ingrepp på panntuberna.

Figur 12. Fotografi på en sugpyrometerspets av keramik.

Figure 12. Photo of the measurement part of a shielded aspirated thermocouple made of ceramic.

Figur 13 visar den bakre änden av den mer robusta sugpyrometern. Här finns anslutningar för vatten, gas och termoelement. Det är viktigt att påpeka att när slangarna för gas och vatten fästs vid anslutningarna så skall dessa vara väl tätade, helst två slangklämmor per anslutning. Det är förödande om vattnet börjar läcka under en mätning eller om vattentillförseln stryps, detta kan innebära att sugpyrometern förstörs. Anslutningen för termoelementet, dvs. där termoelementet sticks in, skall också vara tät. Annars kommer en del av drivkraften för gasflödet att gå åt till att pumpa runt luft i själva pyrometern. Längden mellan anslutningarna och mätspetsen är för den aktuella sugpyrometer cirka 4 m. Allmänt brukar längden hos sugpyrometrar variera mellan 1-10 m.



Figur 13. Fotografi på den aktuella sugpyrometerns bakände. I fotografiet ses anslutningar till vatten, gasdrivning, gasanalys och termoelement.

Figure 13. Photo of the endside of a shielded aspirated thermocouple. The photo views the connections to water, gasflow system, gas analyzes and thermocouple.

4.2 Sugpyrometerns omgivning ur ett praktiskt perspektiv

Vid mätning i förbränningsrum med en aggressiv miljö finns risker för oönskade effekter. Sugpyrometern kan sätta igen sig , om den omgivande gasen innehåller ”smälta” partiklar av olika slag, till exempel tjärprodukter. Dessa partiklar kan också ge upphov till att termoelementet får en beläggning. En annan oönskad effekt är att vid höga temperaturer kan kemiska reaktioner uppstå då materialen i termoelementet reagerar med den omgivande gasen. Det sistnämnda kan undvikas om termoelementet byts ut med jämna mellanrum. Termoelement i förbränningsrum får alltså anses ha en kort livslängd.

Ett antal olika bränslen används i förbränningsrum. Beroende på förbränningsförloppet och använt bränsle så fås en specifik sammansättning av gasen. Enligt ref [1] visade det sig att vid mätning i de varmare områdena i en avfallsförbränningsanläggning så satte sugpyrometern igen sig. Detta berodde på att det i flamman fanns smälta klumpar av avfallsaska. Under egna mätningar har också gasflödet i sugpyrometern minskat drastiskt på grund av ”fuktig” aska i rökgasen. Av bland annat dessa skäl kommer gasens innehåll vid förbränning av olika bränslen att diskuteras.

- **Förbränning av flytande bränslen (oljeeldning)**. Eldningsoljor består av olika kolväten. Kolvätena förångas och omvandlas vid uppvärmning. Vid förbränning sker ett utfall av de tunga kolvätena som bildar sotpartiklar (aska). Sotpartiklar brinner långsamt vilket medför att en del sotpartiklar inte brinner upp utan följer med i gasflödet. Sotpartiklarna är små (ungefär 0,1 – 10 μm), ref [7], och bör inte ge upphov till beläggning av ytor i mätspetsen eller igensättning av sugpyrometern.

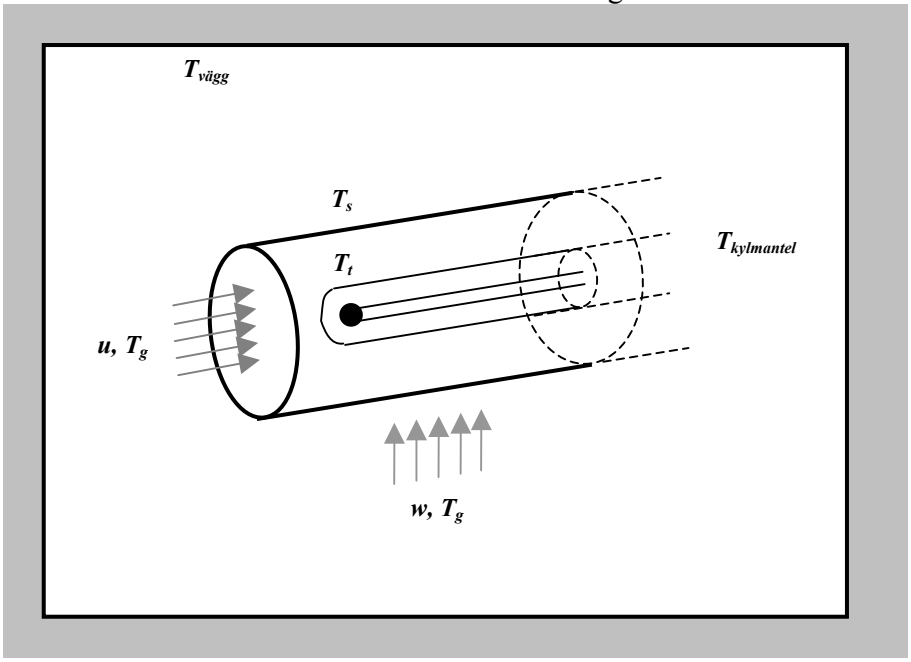
- **Förbränning av gaser**. Naturgasen som är den mest använda innehåller mycket lättare och mindre komplexa molekyler än vad eldningsoljor gör. Vid förbränning finns därför mycket få oförbrända ämnen, vilket gör att problem med beläggningar och igensättning normalt inte uppstår vid mätning med sugpyrometer.

- **Förbränning av fasta bränslen**. Med fasta bränslen menas främst kol, torv , biobränsle och sopor. Vid förbränning av tex. kol innehåller rökgasen en del flygaska. Om smält eller mjuk flygaska kommer i kontakt med kylda ytor kan askan stelna och bilda hårda beläggningar, ref [7]. Sugpyrometern kan alltså sätta igen sig vid mätning i en omgivning där större smälta partiklar förekommer, till exempel tjärprodukter. Enligt ref [1] är dock en förhållandevis hög halt av ”torr” flygaska inget problem. Förbränning av sopor kan innebära en del problem med korrosion då ämnen som svavel och flor kan finnas i rökgasen.

5 Värmeteknisk analys av sugpyrometerspetsen

Det har tidigare nämnts att en mätpunkt endast mäter sin egen temperatur och ingenting annat. Denna temperatur är en direkt konsekvens av värmeutbytet mellan mätpunkten och omgivningen. I detta kapitel skall de värmeöverföringsprocesser som sker i sugpyrometerspetsen diskuteras.

I figur 14 ses en principskiss av sugpyrometerspetsen. I figuren anges de temperaturer och gashastigheter som driver de olika värmeöverföringsproccesserna. Notera att dessa variabler varierar såväl i rummet som med tiden i en verklig mätsituation.



Figur 14. Principskiss av sugpyrometerspets.

Figure 14. Schematic sketch of a shielded aspirated thermocouple.

I denna analys undersöks en mätning med en sugpyrometer i ett förbränningsrum. Det förutsätts att temperaturen på väggarna i förbränningsrummet, $T_{vägg}$, är lägre en den lokala gastemperaturen, T_g. I analysen tas endast hänsyn till de grundläggande fenomenen. Varför skiljer sig då mätpunktens temperatur, T_t, från den lokala gas temperaturen? Den uppmätta temperaturen är en konsekvens av den energibalans som skapas kring mätpunkten. Energibalansen beror av:

- **Strålning mellan ytor:** Den största anledningen till att mätpunktens temperatur skiljer sig från gasens temperatur beror på att temperaturen hos förbränningsrummets väggar i detta fall är lägre än den lokala gastemperaturen vid sugpyrometern. Strålskyddsrörets temperatur, T_s, kommer således att ligga någonstans mellan T_g och $T_{vägg}$ på grund av strålningen mellan strålskyddsrörets yta till förbränningsrummets väggar kommer att existera. Genom samma resonemang inses att termoelementets yttemperatur kommer att ligga mellan T_g och T_s till följd av strålning mellan strålskyddsröret och termoelementet.
-
- **Gasstrålning:** En förbränningsgas är inte helt transparent utan deltar i strålningsprocessen. Gasen transmitterar, reflekterar, emitterar och absorberar energi. Det nämndes också tidigare i avsnitt 4.2 att en förbränningsgas kan innehålla en del aska mm. Dessa är också med i strålningsprocessen. Strålning från gasen till utsida och insidan av strålskyddsröret samt termoelementet existerar således.

- **Konvektion:** I ett förbränningsrum strömmar gasen med en viss hastighet. Sugpyrometern befinner sig således i ett strömmande medium och mellan strålskyddsröret och den omgivande gasen uppstår därför konvektion. Konvektiv värmeöverföring finns också strålskyddsrörets insida och på termoelementet utsida till följd av den strömmande gasen i sugpyrometern. Det bör noteras att vid inloppet till sugpyrometerspetsen så kommer konvektionen att vara som störst. Hastighetsgränskiktet ökar längs med strålskyddsrörets och termoelementets ytor, vilket medför att det termiska gränsskiktet också ökar. Gasen tappar värmeenergi till sugpyrometerns omgivning och temperaturen hos strålskyddsröret och termoelementet minskar med flödesriktningen. För mer detaljer om gränsskiktens betydelse, se avsnitt 2.3.

- **Värmeledning:** Till följd av att kylmantel är mycket kallare än sugpyrometerspetsen så sker ett värmeflöde längs termoelementet och strålskyddsröret. De drivande temperaturdifferenserna är (T_t -$T_{kylmantel}$), (T_s -$T_{kylmantel}$). Det nämndes också att temperaturen i strålskyddsröret och termoelementet minskar med flödesriktningen på grund av de termiska gränsskikten. Detta innebär att T_t och T_s varierar i rummet och ger upphov till värmeledning. Temperaturgradienter uppstår också mellan mätpunkten och termoelementets yta vilket medför att mätpunktens temperatur skiljer sig från termoelementets yttemperatur.

Det inses att energibalansen kring mätpunkten är mycket komplicerad. Vid mätning kan omgivningen, väggarnas och gasens temperatur runt strålskyddsröret ej påverkas. För att då mäta en temperatur som ligger så nära den verkliga gastemperaturen som möjligt krävs en mycket god konvektiv värmeöverföring i sugpyrometern. Detta åstadkoms med en hög hastighet i sugpyrometern. En god konvektiv värmeöverföring kommer också att medföra att värmeledningen, vid termoelementets mätpunkt, kan anses som försumbar. Temperatur-noggrannheten kan också ökas genom att ha ytor med låga emissionstal och att förhållandet mellan termoelementets och strålskyddsrörets diameter är så liten som möjligt. Detta minskar värmeöverföringen på grund av strålning.

Det finns också andra effekter som påverkar mätpunktens temperatur. Vid höga hastigheter kan en del av gasens kinetiska energi omvandlas till friktionsvärme då molekylerna ”krockar” med termoelementet vilket medför en ökad temperatur hos termoelementet. Vidare förlorar gasen värme om den expanderar vid höga hastigheter.

6 Modellering av sugpyrometerspets

I detta kapitel beskrivs de modeller som har skapats för att utreda sugpyrometerns prestanda. Tyngdpunkten i kapitlet ligger på en 2D-modell som har skapats i beräkningsprogrammet FLUENT, men en analytisk modell kommer även att diskuteras. Det kommer att redogöras för de antaganden som införts samt vilken betydelse för resultatet dessa antaganden har.

6.1 Modelleringens syfte

Sugpyrometerns geometri, funktion, materialegenskaper och dess omgivning bestämmer sugpyrometerns karakteristik. Om detta är givet bestäms mätfelet i princip av den hastighet som gasen har i sugpyrometern.

Geometri, funktion och materialegenskaper bestäms av hur sugpyrometern är konstruerad. Sugpyrometerns omgivning är däremot extremt svår att bestämma. Den varierar beroende på i vilket förbränningsrum den befinner sig i, vid vilken punkt i rummet och vid vilken tidpunkt mätningen sker. Det går dock att tänka sig en ideal situation där omgivningen skulle kunna bestämmas exakt under ett visst tidsintervall för en given sugpyrometer. En modell skulle då kunna skapas för att se vilken temperatur som termoelementet mäter för det givna temperaturfältet, hastighetsfältet och strålningsfältet i omgivningen. Informationen ur denna beräkning skulle dock bli ganska teoretisk då det är osannolikt att exakt samma mätsituation uppstår igen. Detta tankesätt är vidare allt för idealiserat och inte genomförbart eftersom temperaturfältet hos gasen knappast går att mäta upp.

Syfte med modelleringen blir därför inte att finna mätfelet för verkliga, exakta mätsituationer. Syftet med modelleringen är istället att få en uppfattning om mätfelets storlek och sugpyrometerns karakteristik för troliga omgivningar. Även om en modell inte kan skapas som speglar verkligheten till fullo så kan en förenklad modell ge svar på många frågor som till exempel hur mycket mätfelet beror av gashastigheten i sugpyrometern.

6.2 Modellering i FLUENT

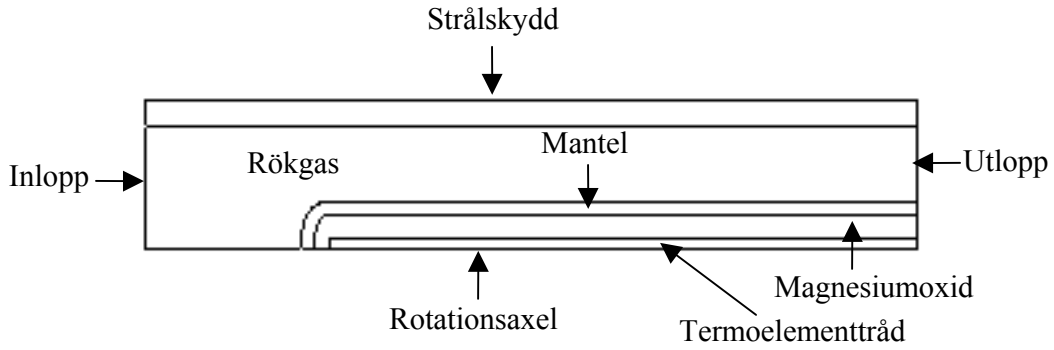
I detta avsnitt redogörs det för hur modellen i FLUENT är uppbyggd. Material, geometri och randvillkor redovisas, samt de numeriska modeller som används för turbulens och strålning.

6.2.1 Geometri och material

I figur 15 ses geometrin på en av de modeller som skapats i FLUENT. Andra geometrier har även skapats där termoelementets storlek och läge skiljer sig från det som visas i figuren. Modellen är rotationssymmetrisk och tvådimensionell. Geometrin utgörs av sugpyrometerns mätspets, där mätspetsen är uppbyggd av ett mantlat termoelement, rökgas och ett strålskyddsrör.

En 2D-modell får anses vara tillräcklig, då ingen information om strålningsfält eller temperaturfält i omgivningen finns. En 2D-modell ger ändå tillräcklig information om sugpyrometerns karakteristik då ingående parametrar i modellen varieras.

Materialdata, det vill säga viskositet, specifik värmekapacitet, konduktivitet, densitet, molekylvikt och absorptionskoefficient, för de ingående komponenterna är hämtade från, ref [3],[4],[8],[9],[10] och [11].



Figur 15. Geometrin hos sugpyrometerspetsen i FLUENT. Modellen inkluderar mantlat termoelement, rökgas och strålskyddsrör. Modellen är rotationssymmetrisk.

Figure 15. The geometry of a shielded aspirated thermocouple in Fluent. The model is created of a shielded thermocouple, gas and a radiation shield. The model is symmetric around the axis.

6.2.1.1 Mantlat termoelement

För alla modellerna är längden av det mantlade termoelementet 20 mm. Diametern är 1.5 mm eller 3 mm, vilket är normala och rimliga mått för mätning i förbränningsrum. Termoelementets spets är modellerat som en ellips, där radien mot strömningsriktningen är halva radien av det övriga termoelementet. I verkligheten brukar termoelementen vara något mer spetsiga, men detta bör ej påverka resultatet. Termoelementtrådarna antas bestå av nickel vilket är den största materialdelen i termoelement av typ K och N. För att kunna modellera rotationssymmetriskt är trådarna klumpade i en cylinder, som ligger längs in i termoelementet. Trådarna omges av sintrad magnesiumoxid vilket i sin tur omges av en mantel. Manteln består av metallen Inconell. Trådarnas diameter utgör 20% av termoelementets totala diameter och mantelns tjocklek utgör 15% av den totala diametern, ref [5].

6.2.1.2 Rökgas

Rökgasen antas bestå av 11% vattenånga, 10% koldioxid, 74% kvävgas och 5% syre. Notera att molprocent anges. Detta är de viktigaste gaskomponenterna hos en typisk förbränningsgas. I modellerna har rökgasens egenskaper viktats fram och den ses därför som en enda gas. I sugpyrometern sker därför inga kemiska reaktioner mellan komponenterna.

Rökgasen antas vidare vara inkompressibel, vilket innebär att en del kompressibla effekter, se avsnitt 3.3, inte medtas i beräkningarna. Detta är ett vanligt och realistiskt antagande då det förenklar beräkningar mycket. Beräkningar av kompressibel strömning innebär bland annat mer komplicerade randvillkor för inloppet och utloppet.

Enligt ref [12] kan en fluid antas vara inkompressibel om

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \approx \frac{1}{2} M^2 < 0.05, \tag{21}$$

Där $\Delta\rho/\rho_0$ är den relativa densitetsförändringen då en fluid utsätts för en extern kraft och M är Machtalet som definieras

$$M = \frac{u}{c}. \tag{22}$$

u är fluidens hastighet och c är ljudets hastighet. Luft med en hastighet på 100 m/s ger en relativ densitetsförändring som är ≈ 0.043. I simuleringarna studeras därför inte hastigheter högre än 100 m/s i inloppet, förutom ett par undantag som kan ses i appendix A, där till exempel inverkan av viskös upphettning studeras. Det bör noteras att för simuleringar med 100 m/s i inloppet så fås högre hastigheter vid termoelementet, ≈ 140 m/s, vilket överskrider den rekommenderade gränsen. Det bör poängteras att det är svårt att uppnå hastigheter som är större än 100 m/s då det behövs mycket kraftiga ejektorer eller fläktar.

6.2.1.3 Strålskydd

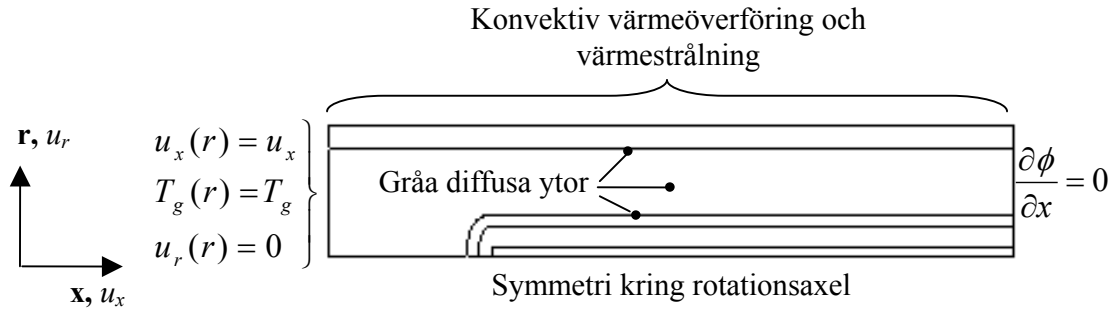
Strålskyddsröret består av antingen ett rostfritt stål eller ett keramiskt material väggtjockleken är några mm. Detta är de vanligaste materialen som används som strålskydd i sugpyrometrar.

6.2.2 Randvillkor

I figur 16 ses de randvillkor som är satta i modellerna. Innanför ränderna sker numeriska beräkningar där strålning, viskös upphettning och turbulens beaktas. För strålningen så gäller att alla ytor är gråa och diffusa. Den konvektiva värmeöverföringen mellan rökgasen och insidan av strålskyddsröret och utsidan av termoelementets mantel beräknas utifrån de satta randvillkoren. Således fås numeriska värden på konvektionstalen som varierar längs ytorna. Detta är av stor vikt eftersom empiriska samband på värmeövergångskoefficienterna inte finns för denna geometri. De lokala värmeövergångskoefficienterna, h beräknas med

$$h = \frac{-k\dfrac{\partial T}{\partial r}}{T_{vägg} - T_g}, \tag{23}$$

där $T_{vägg}$ är den lokala temperaturen på strålskyddsrörets innersida eller mantelns yta. Den lokala temperaturgradienten beräknas i rökgasen intill ytorna. Där k är gasens värmekonduktivitet.



Figur 16. Randvillkor. Vid inloppet ansätts en konstant hastighetsprofil och temperatur och vid utloppet gäller att alla flödesvariablerna har en nollgradient i x-led. Alla ytor är gråa och diffusa och symmetri kring rotationsaxeln råder. På utsidan av strålskyddsröret ansätts ett konvektivt randvillkor med strålning. ∂Φ/∂x=∂T/∂x=∂u$_x$/∂x=0

Figure 16. Boundary conditions. A constant velocity-profile and temperature is presumed at the inlet. Flow variables are presumed to have a zero-gradient at outlet. All surfaces are presumed to be gray and diffuse and there is symmetry around the axis. On the outer surfaces of the radiation shield there is a convective boundary condition including radiation. ∂Φ/∂x=∂T/∂x=∂u$_x$/∂x=0

6.2.2.1 Konvektiv värmeöverföring och värmestrålning

Det har tidigare nämnts att värmestrålningen mellan termoelementet och omgivningen är mycket komplicerad. Gastemperaturen och temperaturen hos förbränningsrummets väggar varierar lokalt och med tiden. Även om ett analytiskt samband kan tecknas för värmestrålningen genom att addera ekvation (9) och (10), se kapitel 2 ”*Allmänt om värmeöverföring och strömningslära*”, så är en del av de ingående parametrarna alltför komplicerade att bestämma med ett tillfredställande resultat. Vidare är dessa samband framtagna under ett antal givna förutsättningar. Istället för att studera gasstrålning och strålning mellan termoelementet och förbränningsrummets väggar så studeras en effektiv strålning. Den lokala effektiva strålningen tecknas

$$q_{eff} = q_{väggstrålning} + q_{gasstrålning} = \varepsilon_s \sigma (T_s(x)^4 - T_\infty^4) . \qquad (24)$$

Märk att detta är sambandet för strålning mellan gråa och diffusa ytor, där en konvex yta är helt omsluten av en mycket större yta. Tanken är alltså att en imaginär stor yta omsluter

sugpyrometerspetsen, se figur 17. Notera här att T_∞ inte är en specifik temperatur i förbränningsrummet utan den isoterma temperaturen hos den imaginära ytan. Om mätning med sugpyrometern sker i ett optiskt tunt område, dvs. gasstrålning har liten inverkan, motsvaras T_∞ av temperaturen hos förbränningsrummets väggar. Om mätning däremot sker i ett optiskt tjockt område motsvaras T_∞ av en temperatur mellan gastemperaturen och väggtemperaturen. Att kvalitativt bestämma storleken hos denna temperatur då gasstrålningen har stor inverkan är mycket svårt. Däremot går det att uppskatta dess storlek inom ett rimligt temperaturområde. Den resulterande strålningen som sugpyrometern upplever i ett förbränningsrum antas alltså kunna bestämmas ur av ekvation (24). Strålskyddsrörets temperatur, T_s, beräknas numeriskt och varierar således med koordinaten x.

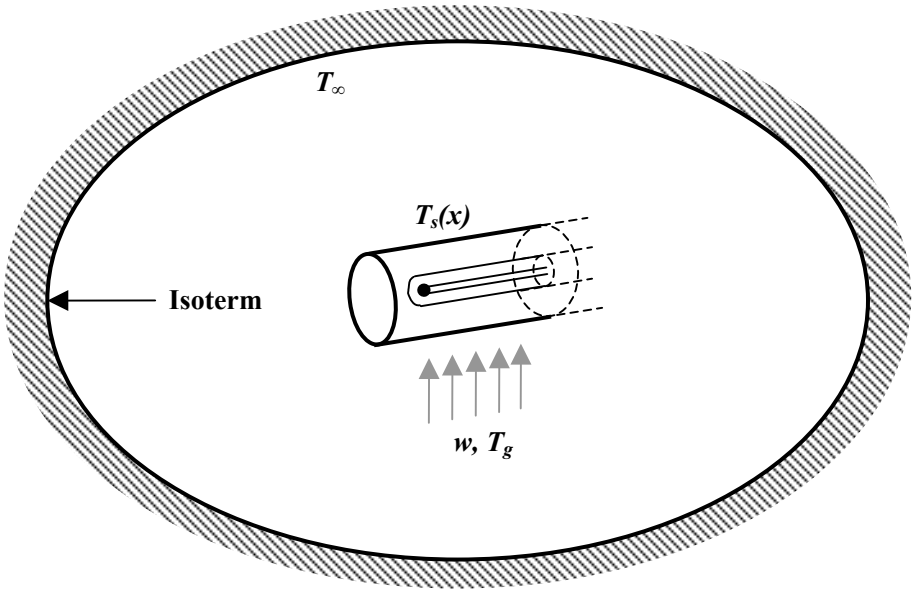
Konvektionen mellan strålskyddsröret och gasen ges av

$$q = h\left(T_g - T_s(x)\right), \tag{25}$$

där

$$h = \frac{k}{D}\left(0.3 + \frac{0.62\,\mathrm{Re}_D^{1/2}\,\mathrm{Pr}^{1/3}}{\left(1+(0.4/\mathrm{Pr})^{2/3}\right)^{1/4}}\left(1+\left(\frac{\mathrm{Re}_D}{28200}\right)^{5/8}\right)^{4/5}\right). \tag{26}$$

Ekvation (26) är ett empiriskt samband för medelvärdet av konvektionen på en omströmmad cylinder, framtagen av Churchill och Bernstein, ref[4], Alla parametrar utvärderas med avseende på filmtemperatur (vanligtvis medelvärdet av väggtemperaturen och gastemperaturen) hos rökgasen. I det här fallet försummas den axiella strålningen då den kan anses liten, detta är ett normalt förfarande.



Figur 17. Betraktelse av strålning och konvektion i omgivningen. Strålskyddröret antas se en imaginär isotermisk yta som är mycket större än strålskyddsrörets yta. Konvektionen beräknas med hjälp av ett empiriskt samband.

Figure 17. Radiation and convection in the environment. The radiation shield is presumed to se an imaginary, isothermal surface, which is much larger than the surface of the radiation shield. Convection is calculated using an empirical expression.

6.2.2.2 Inlopp

Det är mycket svårt att avgöra hur strömningsfältet hos gasen ser ut vid inloppet av sugpyrometern. I modelleringen förutsätts det att hastighetsfältet är jämnt fördelat vid inloppet, $u_x(r) = u_x$ och $u_r = 0$, vilket får anses vara ett rimligt antagande för den typ av sugpyrometer som studeras. I verkligheten kan man visserligen anta att ett litet gränsskikt existerar vid inloppet men inverkan av detta på resultatet bör vara försumbart.

Gastemperaturen antas vara konstant vid inloppet, dvs. $T_g(r) = T_g$. För alla beräkningar så studera ett medelvärde av gastemperaturen som finns hos gasen i sugpyrometerns närliggande omgivning.

Det finns många sätt att ange ett turbulent randvillkor. I modellerna används metoden, hydraulisk diameter och turbulent intensitet. Där den hydrauliska diametern D_h anges som

$$D_h = D_s - D_t \,. \tag{27}$$

Den turbulenta intensiteten är satt till 3%, vilket är ett mått på flödets fluktuationer. För motivering se bilaga A.

För de flesta beräkningarna studeras inte strålning genom inloppet. Vad termoelementet ser genom inloppet varierar och dess omgivning kan inte modelleras på samma sätt som

strålskyddsrörets omgivning. Antag att öppningen är riktad mot en flamma. Termoelementet ser då endast flammans yta genom inloppet, medan strålskyddsröret ser flamman och den övriga omgivningen. Den omgivning som termoelementet ser är alltså mer lokal än den omgivning strålskyddsröret ser. Ett par beräkningar har ändå utförts för att studera detta fenomen. För merparten av beräkningarna ser dock termoelementet endast Strålskyddsrörets yta.

6.2.2.3 Utlopp

Vid utloppet antas att alla flödesvariabler har en nollgradient i x-led, $\partial\varphi/\partial x = 0$. Det antas alltså att termoelementets temperatur i mätpunkten är oberoende av temperaturen längre in i sugpyrometern d.v.s. utanför utloppet. En utvärdering gav att detta är ett rimligt antagande, utvärderingen kan ses i bilaga A. Det antas också att strömningsförhållandet längre in i sugpyrometern inte påverkar strömningsförhållandet i den studerade modellen.

Strålning genom utloppet studeras ej då den ej kan bestämmas kvalitativt. Ett par beräkningar har utförts för svartkroppsstrålning i utloppet, där den externa temperaturen satts till utloppstemperaturen. Detta har påverkat beloppet av termoelementets temperatur, men ej dess karakteristik mot olika gashastigheter i sugpyrometern. Beloppets förändring är dock mycket liten och anses som försumbar.

6.2.2.4 Symmetri kring rotationsaxeln

Eftersom en rotationssymmetrisk 2D-modell studeras behöver endast halva geometrin modelleras.

6.2.3 Strålningsmodell

För beräkningarna i FLUENT användes strålningsmodellen DO, ref [11]. Denna modell är lämplig då ett optiskt tunt medium studeras. I modellen har ytorna hos strålskyddsröret och termoelementet ansatts som gråa och diffusa. Detta bör vara ett lämpligt antagande med tanke på hur ytorna hos strålskyddsröret och termoelementet ser ut efter användning i en aggressiv miljö. Gasen mellan strålskyddsröret och termoelementet deltar i strålningsprocessen. Den emitterar, reflekterar, absorberar och transmitterar. Här tas inte hänsyn till partikelstrålning. En rökgas kan innehålla en del sotpartiklar, men för det mesta är dessa partiklar mycket små och inverkan på värmeöverföringen liten. Kommer större glödande partiklar in i sugpyrometern resulterar det ofta i att sugpyrometern sätter den igen sig.

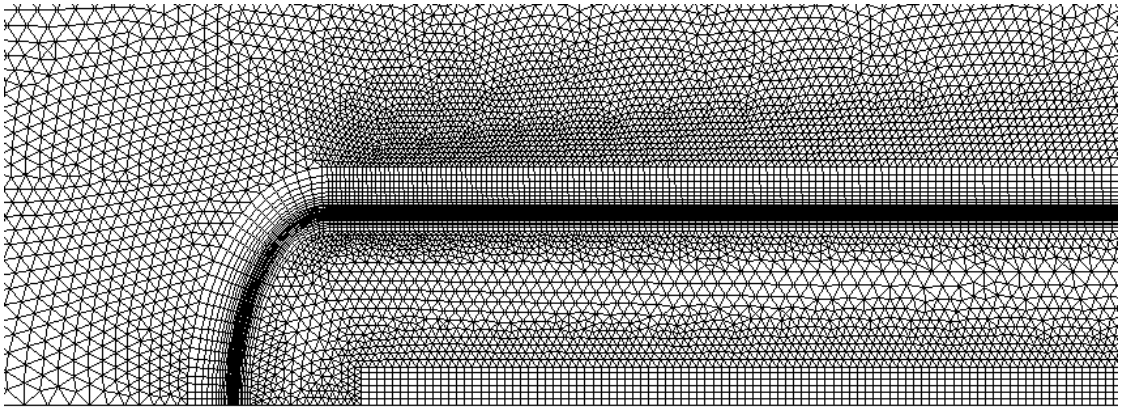
Absorptionsfaktorn har satts till 0.1, vilket är det viktade värden för gasens sammansättning. En analys som kan ses i bilaga A visade att gasen i stort sett kan betraktas som transparent. Osäkerheten i valet av absorptionsfaktorn har därför mycket liten inverkan.

6.2.4 Turbulensmodell

I FLUENT finns flera olika turbulensmodeller, modellerna är anpassade för olika typer av strömningsproblem. I beräkningarna används SST k-ω modellen, ref [11] Denna modell lämpar sig för strömningsproblem där gränsskiktet är av stor betydelse. Således är modellen lämplig eftersom den konvektiva värmeöverföringen mellan gasen och sugpyrometern är gränsskiktsberoende. Modellen består av endast två ekvationer vilket medför att den inte är speciellt beräkningskrävande. Andra typer av modeller som är mer sofistikerade har också undersökts men dessa har i stort sett givit samma resultat.

6.2.5 Mesh (”beräkningsnät”)

Vid turbulenta beräkningar finns två lämpliga metoder för hur meshen bör vara uppbyggd vid gränsskiktet. Med mesh menas indelningen av beräkningselement. Den ena metoden är att ha en gles indelning av element i gränsskiktet och beräkna hastighetsgränsskiktet med hjälp av så kallade väggfunktioner. Dessa är mycket approximativa och har sina begränsningar. Bland annat är de inte lämpliga för låga Reynolds tal och för spaltströmning. Den andra metoden är att ha en mycket tät indelning av element i gränsskiktet så att det viskösa gränsskiktet intill ytorna kan lösas upp. Detta ger en mer noggrann beräkning av gränsskiktet. Den senare metoden har används i beräkningarna. I figur 18 ses meshindelningen vid termoelementets ändpunkt. Meshen är uppbyggd av rektangulära element vid ytorna intill gasen och sammanfogade med tetragonala element.



Figur 18. Mesh av termoelements ändpunkt och den omgivande gasen. En mycket hög meshdensitet intill termoelementet används för att lösa upp det turbulenta gränsskiktet.

Figure 18. Mesh of thermocouple endpoint and surrounding gas. A high mesh-density is used near the wall of the thermocouple which means that the turbulent boundary layer can be dissolved.

6.3 Analytisk model

I den analytiska modellen betraktas omgivningen på samma sätt som modellen i FLUENT. Gasen mellan strålskyddsröret och termoelementet betraktas som transparent och isoterm. Värmeledningen i sugpyrometern antas vara försumbar. Strålningen mellan termoelementet och strålskyddsröret beskrivs enligt ekvation (8) med en synfaktor F =1, ty termoelementet antas endast se strålskyddsröret. Ekvation (8) innebär att ytorna antas vara gråa och diffusa. Figur 19 visar en principskiss över modellen.

En energibalans för mätpunkten kan tecknas på följande vis

$$h_t(T_g - T_t) = C\sigma(T_t^4 - T_s^4), \tag{28}$$

där

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_t} + \frac{1-\varepsilon_s}{\varepsilon_s}\left(\frac{A_t}{A_s}\right)}. \tag{29}$$

Index t och s anger termoelementet respektive strålskyddsröret. På samma sätt kan en energibalans tecknas för strålskyddsröret

$$h_{su}(T_g - T_s) + h_{sw}(T_g - T_s) = -C\sigma\frac{A_t}{A_s}(T_t^4 - T_s^4) + \varepsilon_s\sigma(T_s^4 - T_\infty^4). \tag{30}$$

Det finns stora svårigheter i valet av värmeövergångskoefficienterna inuti sugpyrometern. Det enklaste är att använda sig av värmeövergångskoefficienterna som beskriver fullt

utvecklad strömning i rör och baserat på den hydrauliska diametern. Detta användes i den tidigare undersökningenVärmeforsk 23, ref [1]. Detta förfarande borde dock ge en lägre värmeöverföring än i verkligheten då strömningen är långt ifrån utvecklad i sugpyrometerspetsen, förutom vid mycket låga hastigheter.

Värmeövergångskoefficienten mellan skyddsrörets utsida och gasen i omgivningen modelleras med ekvation (26). Värmeövergångskoefficienten mellan gasen och skyddsrörets insidan modelleras med följande ekvation:

$$h = \frac{k}{D_s - D_t} 0.020 \left(\frac{u(D_s - D_t)}{\nu} \right)^{0.8} \mathrm{Pr}^{0.33} \left(\frac{D_s}{D_t} \right)^{0.53} . \qquad (31)$$

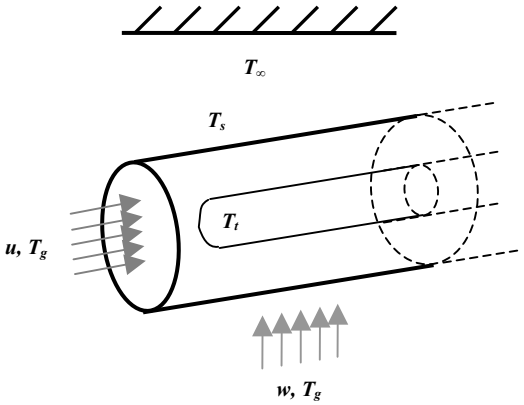
Detta är samma ekvation som användes i rapporten Värmeforsk 23, ref [1] och bör ge en lägre värmeöverföring än i verkligheten.

För den konvektiva värmeöverföringen till termoelementet används följande ekvation, ref[4]:

$$h = \frac{k}{D_t} (2 + (0.4\,\mathrm{Re}^{1/2} + 0.06\,\mathrm{Re}^{2/3})\,\mathrm{Pr}^{0.4} \left(\frac{\mu_\infty}{\mu_t} \right)^{1/4} , \qquad (32)$$

där μ är den dynamiska viskositeten som utvärderas i friströmmen (∞) och intill termoelementet (t). Detta konvektionstal beskriver värmeöverföringen för en omströmmad ellips och bör således ge en högre värmeöverföring än i verkligheten.

För en given gastemperatur och effektiv strålningstemperatur kan strålskyddsrörets och termoelementets temperatur beräknas med hjälp av tex. Newtons metod för nästlade loopar.



Figur 19. Schematisk figur över geometrin för den analytiska modellen.

Figure 19. Schematic figure of the geometry for the analytical model.

7 Stationära beräkningar

Även om omgivningen i ett förbränningsrum är instationär så kan stationära beräkningar ge mycket information om karakteristiken hos sugpyrometern. I detta kapitel redovisas en känslighetsanalys av sugpyrometern, där termoelementets temperatur undersöks för givna omgivningar. Syftet med de stationära beräkningarna är att få svar på hur mycket termoelementets temperatur påverkas av olika:

- Omgivningar
- Gashastigheter i sugpyrometern
- Materialparametrar
- Dimensioner

7.1 Förutsättningar

I tabell 2 ses de grundinställningar som gäller i beräkningarna. Om inte annat anges så är det dessa parametervärden som gäller. Värdena på emissiviteterna är typiska för oxiderad, korroderad metall, vilket får anses vara rimligt för en sugpyrometer som har varit i bruk under en längre tid. Beräkningarna utfördes i FLUENT.

Förutom de tabellerade värdena gäller att värmeövergångskoefficienten, h, mellan strålskyddsröret och omgivningen är satt till 48 W/m^{2}K, vilket motsvarar en gashastighet på ungefär 2 m/s, och att mätspetsen består av ett rostfritt stål. Indata angående material och geometrier hos sugpyrometern finns i kapitel 6.2.

Tabell 2. Grundinställningar i beräkningarna.

Parameter	Strålskyddsrör	Termoelement
Emissivitet	0.8	0.8
Längd	25 mm	20 mm
Diameter	8 mm (innerdiameter)	3 mm

7.2 Resultat

De flesta resultaten som återges i rapporten visar termoelementets temperatur med avseende på gashastigheten i sugpyrometern. Detta för att visa hur viktigt det är att ha en tillräckligt hög hastighet.

7.2.1 Variation av omgivningen

Beräkningar utfördes för ett antal relevanta strålningstemperaturer. De strålningstemperaturer, T_∞, som undersökts är 1227 °C, 627 °C, 427 °C och 227 °C. Temperaturen hos rökgasen i beräkningarna är 827 °C. De valda temperaturerna skulle mycket väl kunna representera omgivningar i ett och samma förbränningsrum, men vid olika mätpunkter. Den högre temperaturen motsvarar en omgivning vid mätning i förbränningsrummets flamma och den lägsta temperaturen en omgivning vid mätning i närheten av en kyld vägg i förbränningsrummet. Samtliga omgivningar har beräknats för gashastigheterna, u = [0, 1, 2.5, 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80, 100] m/s. Det bör noteras att

naturlig konvektion ej tas med i beräkningarna. Detta har i detta sammanhang mindre betydelse då värmeöverföringen domineras av strålning.

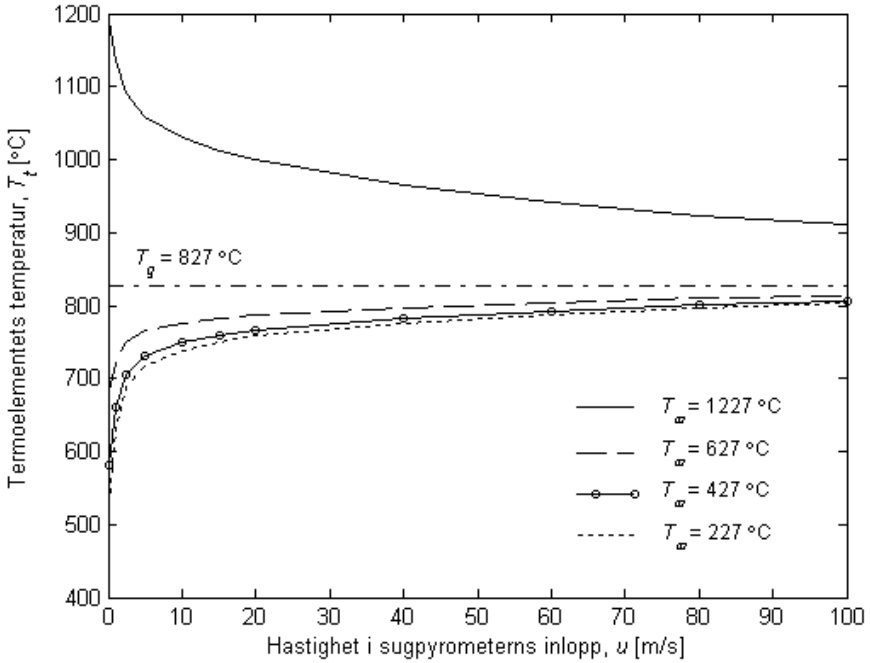
Figur 20 visar termoelementets temperatur för olika gashastigheter i sugpyrometern och för olika strålningstemperaturer i omgivningen. I figuren visas också den verkliga gastemperaturen så att jämförelser mellan uppmätt gastemperatur och verklig gastemperatur kan göras. I figuren ses att redan vid en gashastighet runt 10 m/s i sugpyrometern så fås ett mycket mindre fel än utan gashastighet. För strålningstemperaturerna lägre än den verkliga gastemperaturen fås ett procentuellt fel mindre än 5 procent, $Err < 5\%$, vid gashastigheter runt 60 m/s. Det procentuella felet definieras som

$$Err = \left(\frac{\left| T_g - T_t \right|}{T_g} \right) \times 100\ \%. \qquad (33)$$

När strålningstemperaturen är högre än gastemperaturen fås mycket större fel. Jämför till exempel termoelementets temperatur för $T_\infty = 1227$ °C med $T_\infty = 427$ °C, där $\left| T_g - T_\infty \right| = 400$ °C för båda omgivningarna. Det är en mycket större avvikelse mellan uppmätt temperatur och den verkliga gastemperaturen i omgivningen med den högre strålningstemperaturen. Anledningen är strålningens starka temperaturberoende. Värmeflödet via strålning från en yta är en funktion av dess temperatur upphöjt i fyra, dvs. $q = f(T^4)$. Således fås ett större fel då $T_\infty > T_g$ jämfört med $T_\infty < T_g$.

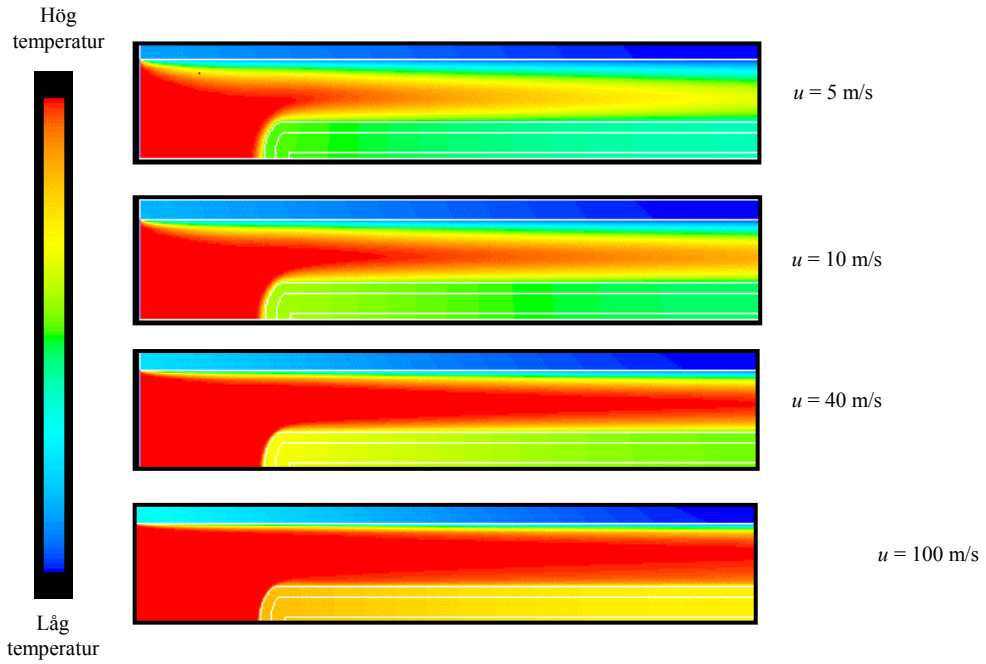
Resultaten visar att då gashastighet i sugpyrometern är hög och strålningstemperaturen i omgivningen är lägre än gastemperaturen är mätfelet relativt okänslig för strålningstemperaturens storlek. Generellt så visar resultaten att uppmätt temperatur kan variera kraftigt vid olika mätpositioner i ett förbränningsrum, men att höga gashastigheter i sugpyrometern minskar variationerna.

Figur 21 visar temperaturfältet i sugpyrometerspetsen för olika gashastigheter i sugpyrometerns inlopp. Det är tydligt att storleken på det termiska gränsskiktet minskar med ökad hastighet. En högre hastighet medför alltså en högre konvektiv värmeöverföring från gasen till termoelementet och strålskyddsröret, då $T_\infty < T_g$.



Figur 20. Termoelementets temperatur med avseende på gashastigheten för olika omgivningar. Gastemperaturen är 827 °C och beräkningarna är utförda för omgivningarna, T_∞ = [227 427 627 1227] °C och hastigheterna, u = [0, 1, 2.5, 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80, 100] m/s.

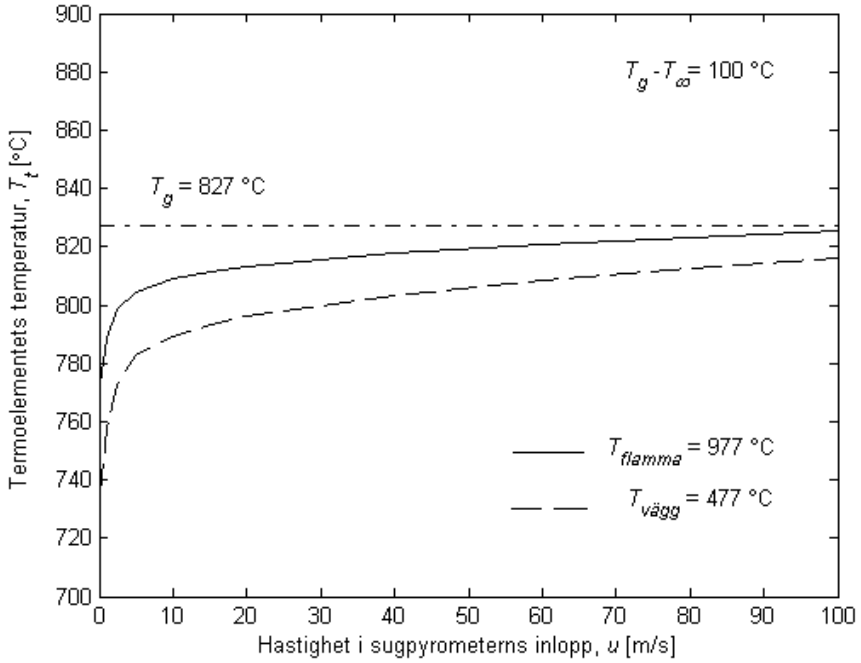
Figure 20. Thermocouple temperature to variation in aspiration velocity for different environments. The gas temperature is 827 °C and calculations is performed for different surroundings, T_∞ = [227, 427, 627, 1227] °C and velocities of u = [0, 1, 2.5, 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80, 100] m/s.



Figur 21. Temperaturfältet i sugpyrometerspetsen för hastigheterna 5 m/s, 10 m/s, 40 m/s och 100 m/s i sugpyrometerns inlopp. T_g = 827°C och T_∞ = 427°C.

Figure 21. Temperature field of the shielded aspirated thermocouple end with aspiration velocities of 5 m/s, 10 m/s, 40 m/s and 100 m/s. T_g = 827 °C and T_∞ = 427 °C.

En beräkning utfördes då inverkan av strålningen genom inloppet togs med. I figur 22 ses resultatet. Den heldragna linjen motsvarar en omgivning där T_∞ är 100°C lägre än gastemperaturen och där termoelementet ser en flamma som ligger mycket nära öppningen av mätspetsen. Den streckade linjen motsvarar samma omgivning förutom att termoelementet ser en kall vägg, som ligger mycket nära öppningen av mätspetsen. Resultaten visar än en gång att uppmätt temperatur kan variera vid olika mätpositioner i ett förbränningsrum men att höga gashastigheter i sugpyrometern minskar dessa variationer.



Figur 22. Termoelementets temperatur med hänsyn till strålning i sugpyrometerns öppning. Resultat för strålningstemperaturerna T_{flamma} = 997°C och $T_{vägg}$ = 477°C vid öppningen då T_g = 827 °C och T_∞ = 427 °C.

Figure 22. Thermocouple temperature when radiation threw the opening is considered. Results for a cold temperature, T_{wall} = 477° C, and a hot temperature, T_{flame} = 997°C T_g = 827 ° C and T_∞ = 427°C.

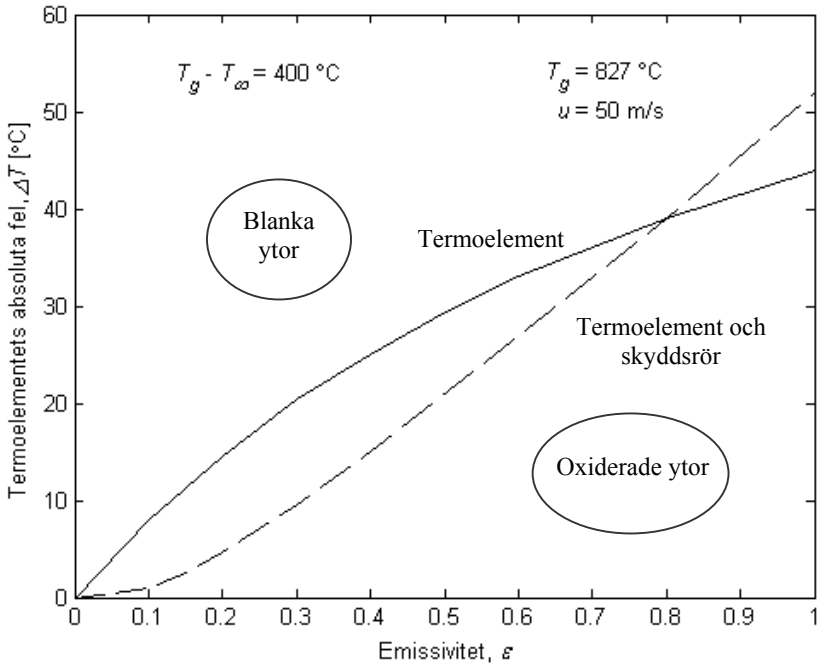
7.2.2 Blanka och korroderade ytor

Beroende på om termoelementen är nya eller använda så kan emissiviteten variera kraftigt. Detta gäller även för strålskyddsröret. En ny sugpyrometer har en blank yta, men då den varit i bruk en tid får den en yta som närmar sig en svart kropps yta. I figur 23 ses det absoluta felet med avseende på emissiviteten hos termoelementet och strålskyddsröret. Det absoluta felet definieras som

$$\Delta T = \left| T_g - T_t \right| . \qquad (34)$$

Emissiviteten hos strålskyddsröret hölls konstant, ε_s = 0.8, då emissiviteten hos termoelementet varierades. Alla beräkningar är utförda med gashastigheten, u = 50 m/s, i sugpyrometern.

Det minsta felet fås givetvis då både termoelementet och strålskyddsröret har blanka ytor. Antag att mätning med stor noggrannhet krävs för en viss utredning och mätningen är tidsomfattande, dvs. många mätningar med en sugpyrometer i ett förbränningsrum. Hög noggrannhet skulle då kunna erhållas om blank utrustning används, dvs. att termoelementet och strålskyddsröret byts ut med jämna mellanrum.

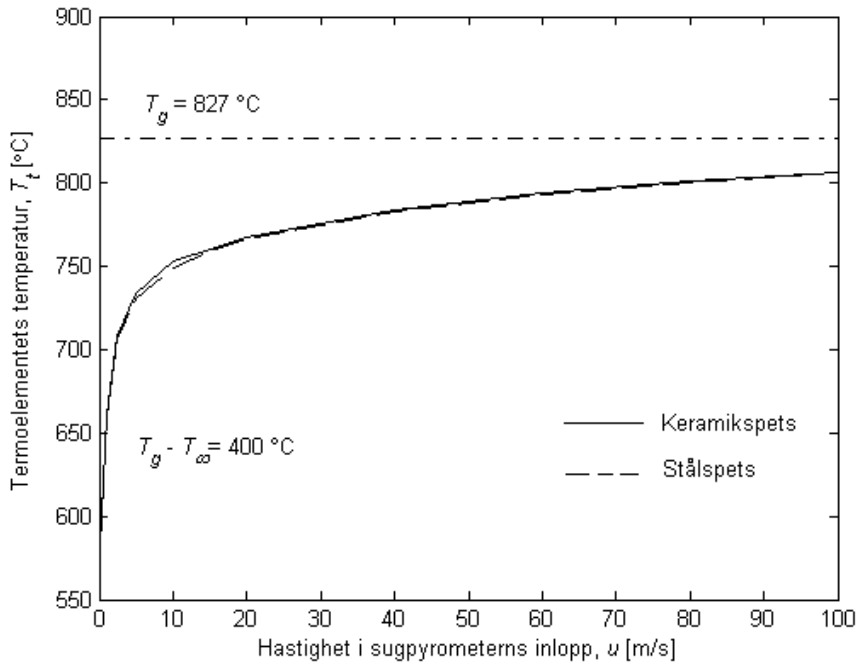


Figur 23. Termoelementets temperatur för olika emissiviteter hos termoelementet och strålskyddsröret. T_g = 827 °C och T_∞ = 427 °C.

Figure 23. Thermocouple temperature for different emissivities of thermocouple and radiation shield. T_g = 827 °C and T_∞ = 427 °C.

7.2.3 Jämförelse mellan keramikspets och stålspets

Strålskyddsröret hos sugpyrometrar består vanligtvis av keramik eller rostfritt stål. Generellt anses sugpyrometrar med keramikspetsar ha en högre noggrannhet, eftersom de leder värme sämre. En beräkning utfördes där de två olika varianterna jämfördes. Värmeledningskoefficienterna för keramikspetsen och stålspetsen sattes till 3.5 W/m K respektive 25.4 W/m K. I figur 24 ses resultatet. Keramikspets och stålspets ger i stort sett samma resultat. Det kan konstateras att för denna omgivning så dominerar strålningen vid låga gashastigheter i sugpyrometern och för höga gashastigheter så dominerar den konvektiva värmeöverföringen. Värmeledningen i spetsen är således av mindre betydelse. Det bör dock noteras att en mätspets av stål inte går att använda i alltför höga temperaturer. Användning i omgivningar där temperaturen överstiger 1000 °C är inte att rekommendera eftersom stålet blir mjukt.

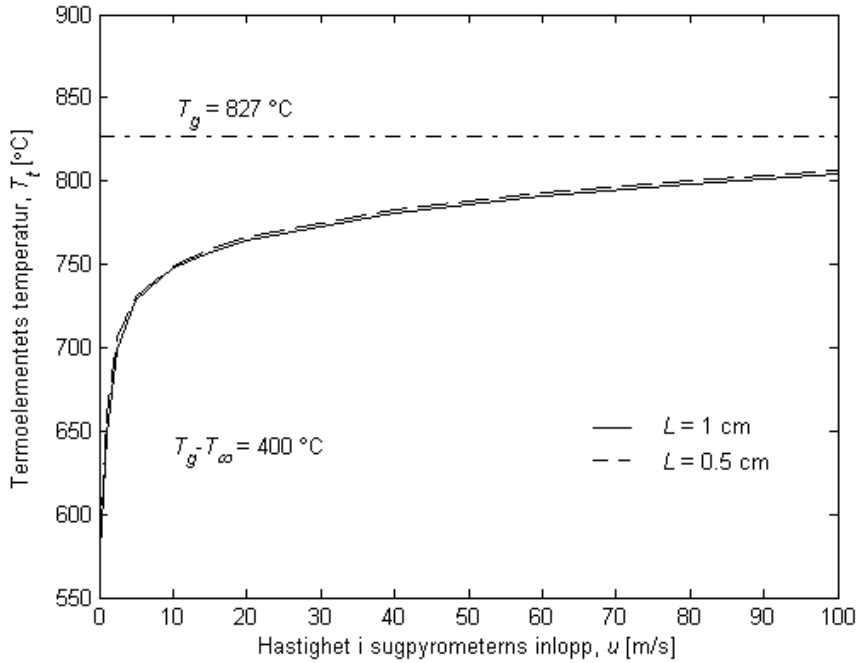


Figur 24. Jämförelse mellan keramikspets och stålspets. Värmeledningskoefficienterna är satta till 3.5 W/m K för keramikspetsen och 25.4 W/m K för stålspetsen. T_g = 827 °C och T_∞ = 427 °C.

Figure 24. Comparison between shields of ceramic or steel. Heat conduction coefficients are assumed to be 3.5 W/m K for the shield of ceramics and 25.4 W/m K for the shield of steel. T_g = 827 °C and T_∞ = 427 °C.

7.2.4 Termoelementets läge i sugpyrometern

Beräkningar utfördes där termoelementets läge i flödesriktningen varierades. I beräkningen jämfördes avstånden 1 cm och 0.5 cm från framkanten med varandra. Med avståndet menas längden mellan termoelementets spets och inloppsranden. I figur 25 ses resultatet. Då termoelementet befinner sig närmast inloppet fås högst noggrannhet till följd av att gasens avger värme till sugpyrometern och kyls längs med flödesriktningen. För de två studerade avstånden är skillnaderna mycket små.

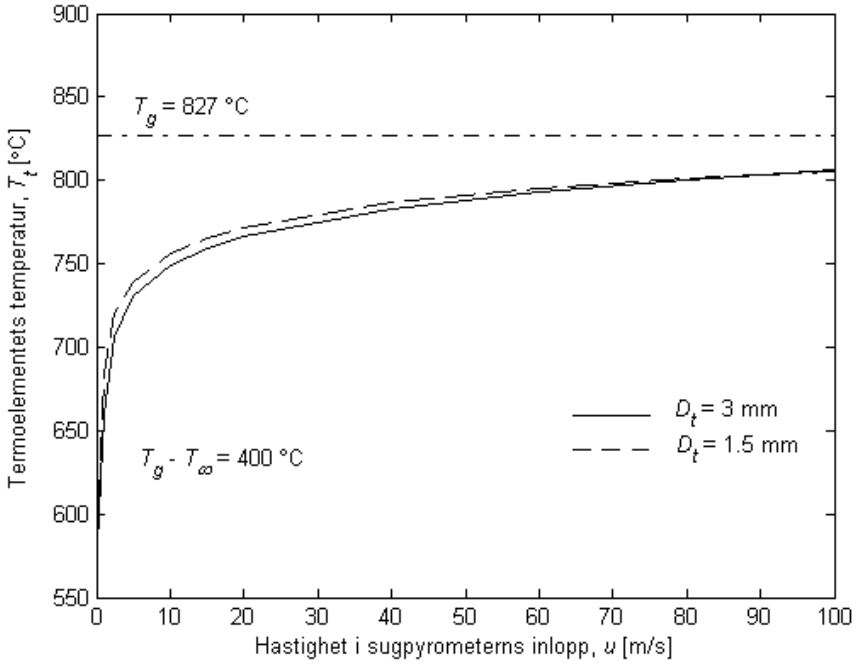


Figur 25. Jämförelse av termoelementets läge för L = 1 cm och L = 0.5 cm, där L anger avståndet från sugpyrometerns öppning. T_g = 827 ° C och T_∞ = 427 ° C.

Figure 25. Comparison of thermocouple location for L = 1 cm and L = 0.5 cm, where L is the location from the opening of the shielded aspirated thermocouple. T_g = 827 ° C and T_∞ = 427 ° C.

7.2.5 Inverkan av termoelementets dimension

Det har tidigare diskuterats att mätfelet blir mindre då termoelementets ytterdiameter är liten. I figur 26 ses resultatet av beräkningar där två olika diametrar jämförs, 3 mm och 1.5 mm. Mätfelet är något lägre för beräkningarna med den mindre diametern. Egentligen är det inte helt korrekt att jämföra beräkningarna med inloppshastigheten som referens. Den maximala hastigheten i sugpyrometer, då inloppshastigheten är 100 m/s, blir 140 m/s för den större diametern och 120 m/s för den mindre diametern. Om en sugpyrometer med dessa dimensioner på termoelementen jämförs i en verklig mätsituation så borde en högre hastighet fås i inloppet för termoelementet med en mindre diameter. Detta på grund av att den mindre diametern hos termoelementet ger lägre tryckförluster i sugpyrometern, vilket medför att drivutrustningens flödeskapacitet ökar. För samma kapacitet på drivutrustning borde större skillnader i mätfel uppstå än vad dessa beräkningar visar.

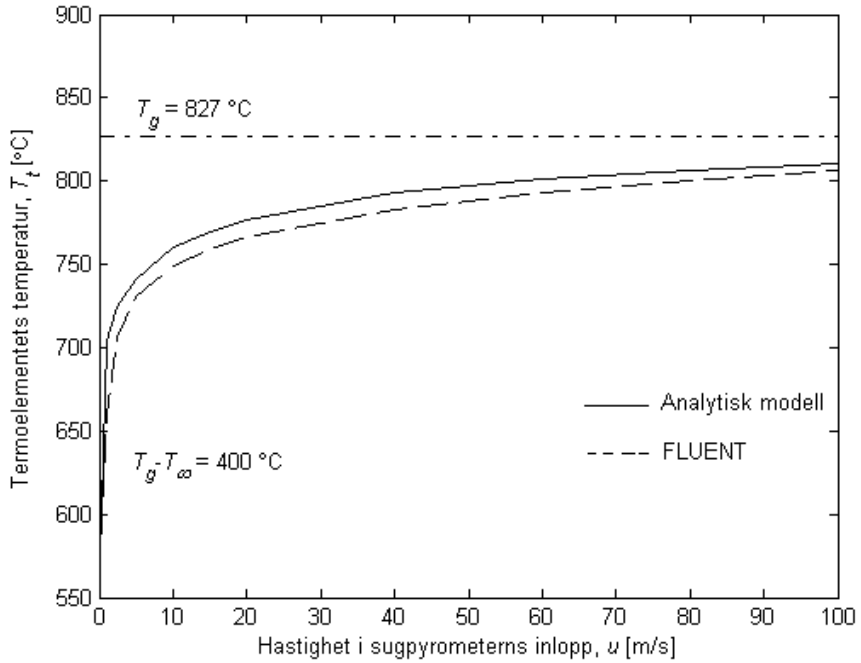


Figur 26. Jämförelse av termoelementets temperatur för två olika diametrar, 3 mm och 1.5 mm. T_g = 827 °C och T_∞ = 427 °C.

Figure 26. Comparison of thermocouple temperature for two different diameters, 3mm and 1.5 mm. T_g = 827 °C and T_∞ = 427 °C.

7.2.6 Jämförelse mellan modell i FLUENT och analytisk modell

Beräkningar utfördes med den analytiska modellen som presenterades i avsnitt 6.3. Denna beräkning jämfördes med beräkningar utförda i FLUENT. I figur 27 ses resultatet. Resultaten skiljer sig åt i absoluta värden, men modellerna uppvisar ungefär samma trender. Värmeövergångskoefficienterna i den analytiska modellen bygger på empiriska samband och det finns stora osäkerheter i dessa värden. Resultaten visar dock att den analytiska modellen kan användas för approximativa beräkningar, då den uppvisar samma trender som den mer sofistikerade modellen i FLUENT.



Figur 27. Jämförelse av modell i FLUENT och analytisk modell

Figure 27. Comparison of model in FLUENT and an analytical model.

7.3 Sammanfattning av stationära beräkningar

Tabell 3 visar ett urval av resultaten, där det procentuella felet, *Err*, och det absoluta felet, ΔT, kan ses. I tabellen ses att mätfelet hos sugpyrometern kan variera kraftigt beroende vilken hastighet som gasen har och i vilken omgivning den befinner sig i. Gastemperaturen är 827 °C för samtliga resultat. Det absoluta felet varierar mellan 15 °C – 204 °C och det procentuella felet mellan 1.8 % – 25 %. Det bör noteras att värdena inte ska ses som den absoluta sanningen eftersom då modellen bygger på ett antal förenklingar och antaganden. Detta konstaterande gäller alltid oavsett vilken modell och vilket programsystem man använder.

Tabell 3. Sammanfattning av beräkningsresultat med FLUENT.

T_∞ [°C]	u [m/s]	ε_t [-]	ε_s [-]	D_t [mm]	*Err* [%]	ΔT [°C]
427	100	0.8	0.8	3	2.5	21.1
1227	100	0.8	0.8	3	10	83
427	10	0.8	0.8	3	9	77.6
1227	10	0.8	0.8	3	25	204
427	60	0.8	0.8	3	4.2	34.3
1227	60	0.8	0.8	3	13.8	114
427	50	0.4	0.8	3	3	25
427	50	0.4	0.4	3	1.8	15
427	40	0.8	0.8	1.5	4.9	40.2

8 Instationära beräkningar

Temperatur, strålningsegenskaper och gashastighet varierar både i rummet och med tiden i förbränningskammare och motsvarande omgivningar. Det är därför av intresse att få en uppfattning om hur sugpyrometer svarar mot fluktuationer i omgivningen. Det har tidigare beskrivits att stora fel i uppmätt temperatur kan uppstå då mätning sker i realtid, se avsnitt 3.3, då det finns en fördröjning i termoelementet på grund av dess tröghet mot värmeöverföring. Simuleringar har utförts för att se hur sugpyrometern svarar mot en föränderlig gastemperatur i sugpyrometerns inlopp. Två fall har undersökt; ett fall där gashastigheten är hög i sugpyrometer och ett fall där gashastigheten är låg.

8.1 Förutsättningar och antaganden

I simuleringarna antas att gasens temperatur i inloppet varierar enligt

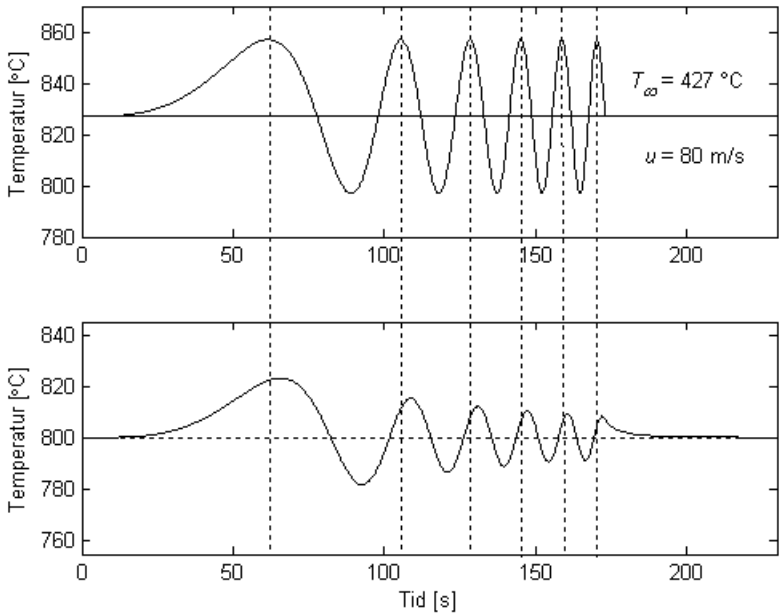
$$T_g = T_{start} + a\sin\left(\frac{t^3}{b}\right) \tag{35}$$

där a = 30 och b = 150000 är konstanter valda för en specifik karakteristik, t är tiden och T_{start} = 827 °C är den temperatur som fluktuationen sker runt. Detta medför att gasens temperatur varierar mellan 797 °C och 857 °C, och att dess frekvensen ökar med tiden. Notera att denna funktion är antagen, men att det mycket väl kan tänkas att liknande fall uppstår i verkliga omgivningar. Den fluktuerande gastemperaturen medför också att strålningen och konvektionen fluktuerar till följd av temperaturförändringar hos termoelementet och strålskyddsröret.

För samtliga simuleringar gäller grundinställningarna förutom ovanstående transienta temperatur. Värmeövergångskoefficienten, *h*, mellan strålskyddsröret och omgivningen är satt till 48 W/m^{2}K, emissiviteterna hos strålskyddsröret och termoelementet är satta till 0.8. Innerdiametern är 8 mm för strålskyddsröret och ytterdiametern är 3 mm för termoelementet, se tabell 2 i avsnitt 7.1. Strålskyddsröret består av ett rostfritt stål. Hastigheterna är valda till u = 80 m/s, fall I, och u = 10 m/s, fall II.

8.2 Resultat av fall I, u = 80m/s

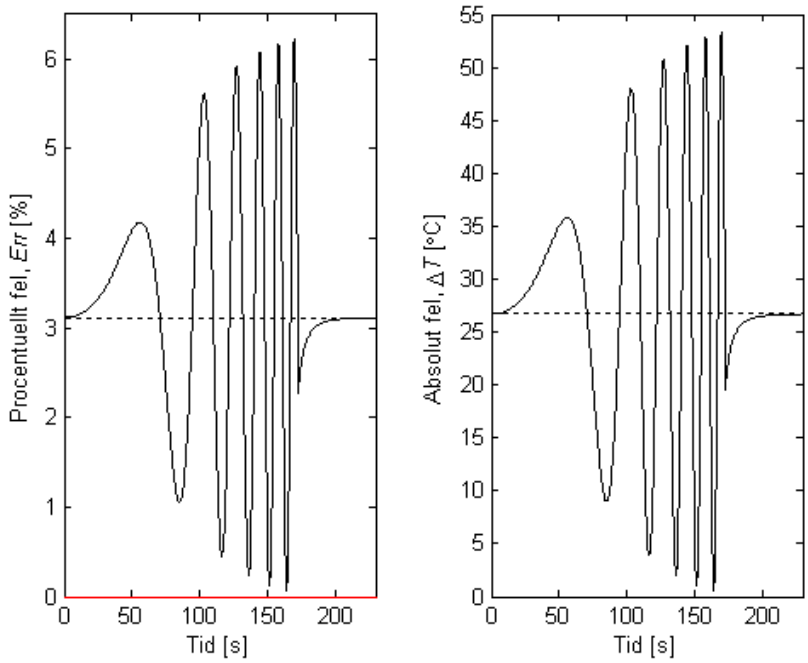
Figur 28 visar hur termoelementets temperatur varierar med en föränderlig temperatur hos gasen. Tidsfördröjningen hos termoelementet är inte speciellt stor. Den höga gashastigheten i sugpyrometern ger att termoelementet svarar snabbt mot temperaturförändringar. I figuren kan också ses att när frekvensen hos gastemperaturens fluktuationer ökar så minskas termoelementets amplitud. Alltför snabba temperaturförändringar registrerar inte termoelementet vilket innebär att stora fel kan fås om resultat i realtid söks.



Figur 28. Termoelementets svar mot en föränderlig temperatur. Den övre figuren visar gastemperaturen som funktion av tiden och den nedre figuren visar termoelementets svar.

Figure 28. Thermocouple response for transient gas temperature. The top figure shows the gas temperature as a function of time and the lower figure shows the thermocouple response.

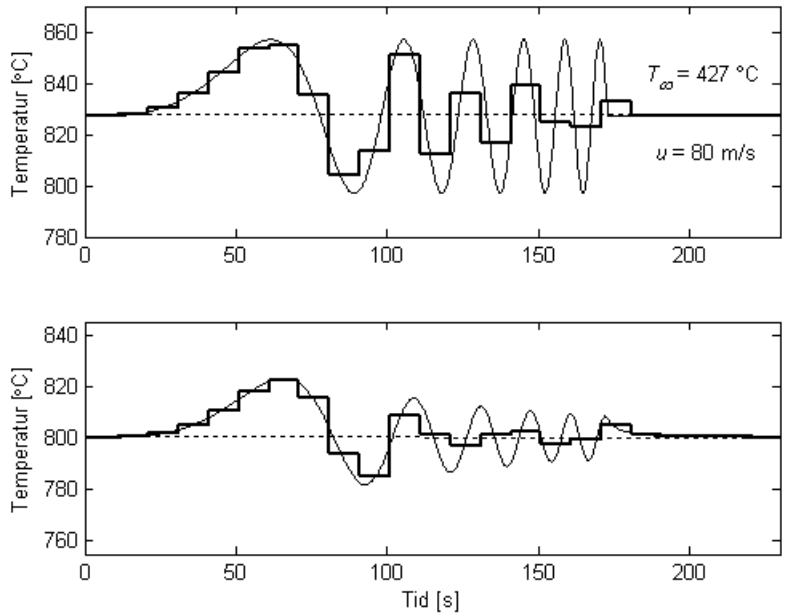
Figur 29 visar felet i uppmätt temperatur. Till vänster ses det procentuella felet, *Err*, och till höger ses det absoluta felet, ΔT. Det är tydligt att felet ökar då frekvensen hos gastemperaturens fluktuationer ökar. Det kan alltså konstateras att mätning i realtid kan ge upphov till stora fel. Idag är detta inte ett stort problem, då en förbränningsugns karakteristik oftast studeras i ett metaperspektiv, dvs. ett medelvärde under än längre tidsperiod söks. Man bör emellertid vara medveten om dessa begränsningar.



Figur 29. Termoelementets fel visning. Vänster figur visar det procentuella felet och höger figur visar det absoluta felet.

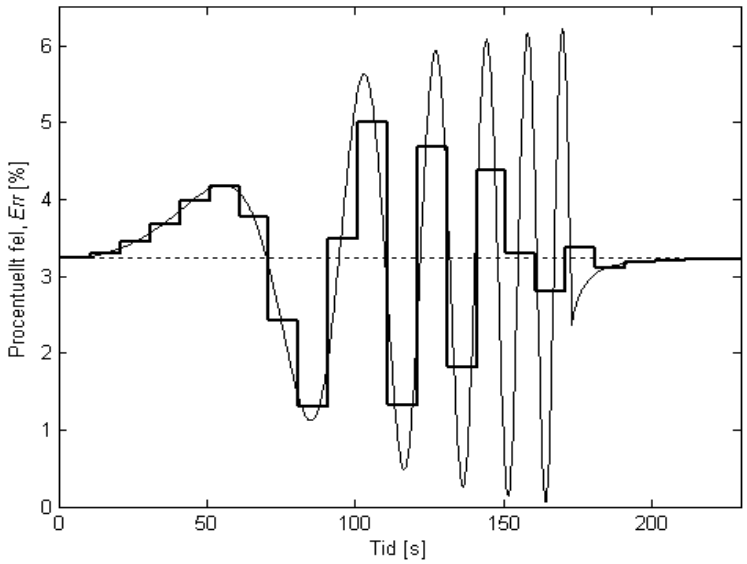
Figure 29. Thermocouple error. The relative error at the left and the absolute error at the right.

Figur 30 visar samma typ av simulering, där stegfunktionerna motsvarar medelvärdet under 10 sekunders perioder. Vid mätning i förbränningsugnar är det lämpligt att insamla mätvärden under längre tidsperioder för att få data som är mer lätthanterliga. I figur 31 ses felet i uppmätt temperatur då medelvärdet hos gastemperaturen studeras (stegfunktionen) kontra felet då gastemperaturen studeras i realtid (den tunna linjen) Felet för stegfunktionerna blir avsevärt mycket mindre vid snabba fluktuationer. Oftast kan felet betraktas som ännu lägre om inte tidsfördröjning hos termoelementet beaktas, dvs. då den exakta tiden inte är viktig.



Figur 30. Termoelementets svar för medelvärdet av 10 sekunders perioder. Medelvärdet för perioderna motsvaras av stegfunktionerna.

Figure 30. Thermocouple response for average value during periods of 10 seconds. The step functions represent the average value of the periods.

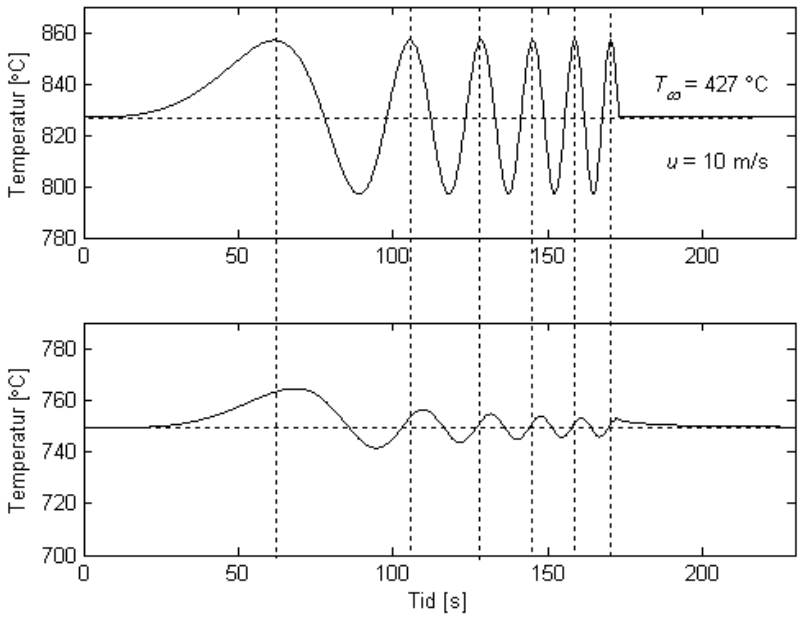


Figur 31. Procentuellt fel för medelvärdet av 10 sekunders perioder. Medelvärdet för perioderna motsvaras av stegfunktionerna.

Figure 31. Relative error for average value during periods of 10 seconds. The step functions represent the average value of the periods.

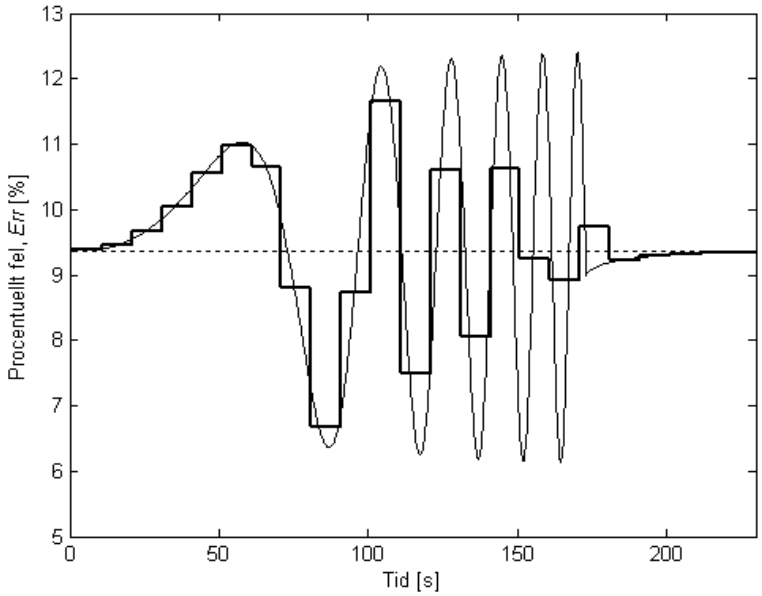
8.3 Resultat av fall II

Figur 32 visar hur termoelementets temperatur varierar med en föränderlig temperatur hos gasen för u = 10 m/s. Tidsfördröjningen hos termoelementet är nu mycket större än för resultatet med gashastigheten u = 80m/s. Vidare kan det ses att amplituden är mycket lägre. Den låga gashastigheten i sugpyrometern gör att termoelementet inte ”hänger med”. Figur 33 visar det procentuella felet. Amplituden är mycket större jämfört med resultatet med den höga hastigheten och således är realtidsfelet stort. Ett procentuellt fel på 12.5 % motsvarar ett absolut fel på ungefär 110 °C. I figurerna visas också att mätfelet minskas då ett medelvärde söks.



Figur 32. Termoelementets svar mot en föränderlig temperatur. Den övre figuren visar gastemperaturen som funktion av tiden och den nedre figuren visar termoelementets svar.

Figure 32. Thermocouple response for transient gas temperature. The top figure shows the gas temperature as a function of time and the lower figure shows the thermocouple response.



Figur 33. Procentuellt fel för medelvärdet av 10 sekunders perioder. Medelvärdet för perioderna motsvaras av stegfunktionerna.

Figure 33. Relative error for average value during periods of 10 seconds. The step functions represent the average value of the periods.

8.4 Sammanfattning av transienta beräkningar

Tabell 4 visar ett urval av resultaten, där procentuella felet, *Err*, och det absoluta felet, ΔT, kan ses för de båda hastigheterna. I tabellen ses det maximala felet i beräkningar som motsvarar en mätning i realtid och medelfelet som motsvarar felet om medelvärdet av den totala tiden tas. Det inses att mätning i realtid kan innebära mycket stora absoluta fel. Denna slutsats gäller även för mycket höga gashastigheter.

Tabell 4. Sammanfattning av resultat.

$T_g - T_\infty = 400$ ºC ± 30 ºC	$u = 10$ m/s	$u = 80$ m/s
Max		
ΔT	105 °C	55 °C
Err	12 %	6 %
Medel		
ΔT	75 °C	25 °C
Err	9 %	3 %

9 Mätningar

Ett flertal utvärderingar av mätning i förbränningsrum eller motsvarande omgivningar har tidigare utförts. Resultat finnas bland annat i Värmeforsks rapport nr. 803, ref [13], där mätningar med både termoelement och sugpyrometrar utfördes. En skillnad på 180 °C mellan de olika mätmetoderna uppmättes vid en gastemperatur runt 950 °C. Sugpyrometern är överlägsen termoelement som mätmetod då rökgastemperaturer skall mätas. Ett par nackdelar med sugpyrometern är dock att den är klumpig att använda och att man förlorar en del av upplösningen rummet. Den uppmätta temperaturen fås ses som ett medelvärde av den närliggande gasen, eftersom gas hela tiden sugs genom sugpyrometern.

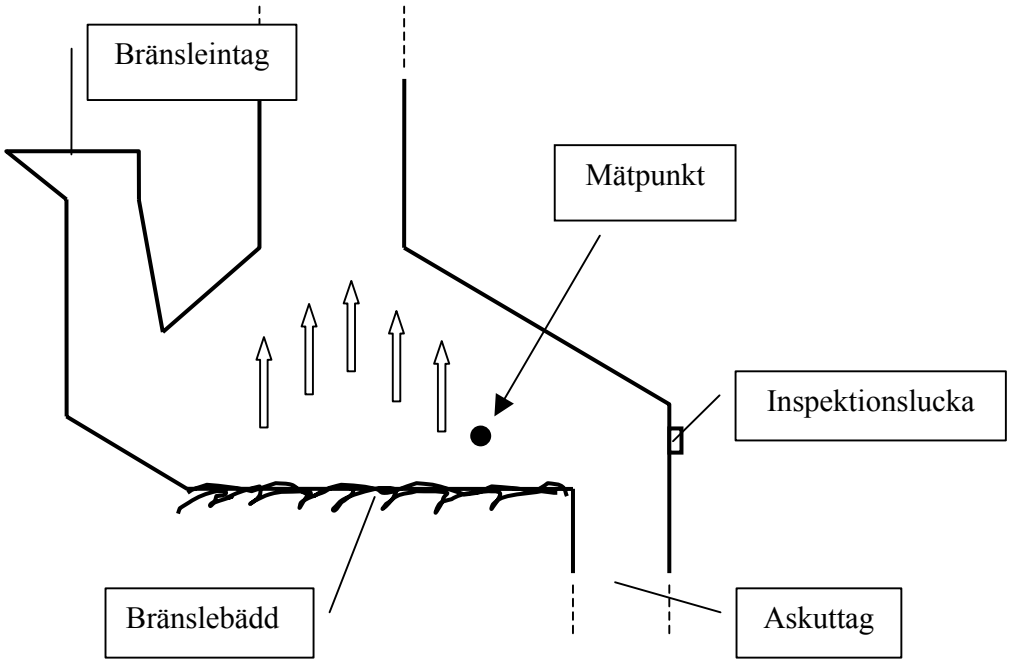
Skillnader mellan mätning med mantlade termoelement av typ N och typ K togs också upp i rapporten [13]. Resultatet var att Typ N mätte en något högre temperatur, ca 4 °C, vid en uppskattat gastemperatur runt 800 °C. I det fallet var temperaturen närmare den verkliga gastemperaturen. Skillnaden kan ses som ganska liten och i princip betydelselös. Tidigare nämnts att typ N är konstruerade för att mäta noggrannare i högre temperaturer. Typ N är stabilare och mycket större skillnader mellan typ N och typ K kan fås vid högre temperaturer.

Andra utredningar har också utförts. Ref [14] tar upp studier av mätningar med sugpyrometrar och termoelement i ett idealiserat förbränningsrum. Mätningar utfördes i omgivningar där strålningen var sådan att temperaturer både högre och lägre än den verkliga gastemperaturen uppmättes. I rapporten togs det bland annat upp att de största mätfelen fås vid mätning i omgivningar där strålningsförhållandena är sådana att en högre temperatur än den verkliga gastemperaturen mäts upp.

I denna rapport [14] tas mätningar av de mer praktiska slaget upp. En diskussion av vilka problem som kan inträffa sker kontinuerligt och det redogörs för vikten av att ha en tillräckligt hög gashastighet i sugpyrometern. Ett par mer eller mindre lyckade mätningar med justering av termoelementet diskuteras också.

9.1 Beskrivning av pannan

De praktiska mätningarna utfördes i Långasjönäs ångcentral i Kisa. Pannan eldas med biobränsle bestående av bland annat barkmix och torrflis och även en del spill från pappersbruket, till exempel papper och plast. Pannan är en ångpanna från W&E och har en nominell effekt på 6.5 MW. Förbränningstemperaturen i pannan ligger runt 800 °C. I figur 34 ses en principskiss över den del av pannan där mätningarna utfördes. Pannans bränslebädd är ungefär 2.2 m bred och 7.7 m lång. Mätningarna utfördes genom inspektionsluckan i pannans bakkant och de resultat som kommer presenteras utfördes ungefär 2.5 m in i pannan och ungefär 1 m ovanför bränslebädden. Omgivningen är där mycket aggressiv. Bädden, flammor och väggar utgör strålningsytor som inverkar på mätresultaten. Under mätningarna kördes pannan med en last på ungefär 6 MW d.v.s. nära fullast.



Figur 34. Principskiss över pannan i Kisa.

Figure 34. Schematic sketch over the boiler in Kisa.

9.2 Mätutrustning

Vid mätningarna användes en 4 m lång sugpyrometer med insugsöppning vid ena änden, det vill säga termoelementet ser omgivningen genom öppningen. Figur 35 visar sugpyrometerns främre del med tillhörande mätspets. Mätspetsen är av rostfritt stål och termoelementen som användes vid mätningarna är av typ K och typ N.

Figur 35. Fotografi på sugpyrometerns mätspets.

Figure 35. Photo of the measurement part of the shielded aspirated thermocouple.

Figur 36 visar den bakre änden av sugpyrometern. Vanligt vattenledningsvatten användes för vattenkylning och gasflödet drevs med en ejektorpump. Mellan ejektorpumpen och sugpyrometern fanns en ringkammarmätfläns inkopplad för mätning av gasflödet. Utifrån tryckdifferensen beräknades gasflödet.

Figur 36. Fotografi över sugpyrometerns anslutningar.

Figure 36. Photo of connections for the shielded aspirated thermocouple.

Figur 37. Inspektionslucka.

Figure 37. Inspection shuttle.

För att samla in mätdata användes en logger från INTAB, loggern kopplades direkt till en dator där mätresultaten visualiserades under mätningen.

Alla mätningar utfördes genom en inspektionslucka, se figur 37, som var belägen strax ovanför brännbädden. Under mätning var hela inspektionsluckan bortagen. Mätningarna utfördes genom ett litet fyrkantigt hål på en platta som skruvades på istället för inspektionsluckan.

9.3 Genomförande

Mätningar utfördes främst för att upptäcka vanliga problem och för att undersöka hur viktigt det är med ett tillräckligt gasflöde genom sugpyrometern. Vikten av att sugpyrometern har ett flöde utvärderades genom att mätningar med gasflöde och utan gasflöde jämfördes.

En del andra jämförelsemätningar utfördes också, till exempel jämfördes mätningar med termoelementet centrerat i sugpyrometern med mätningar då termoelementet ligger an mot strålskyddsröret. Några kvalitativa resultat kunde dock ej fås då mätningarna inte utfördes samtidigt. För en kvalitativ analys skulle det krävas mätning med två likadana sugpyrometrar med lika hög gashastighet och mätning i samma område.

Ett större område i pannan, det område som kunde nås med sugpyrometern, mättes upp, genom att registrera temperaturen i ett flertal punkter. Gränsskiktet vid inspektionsluckan mättes också upp. Dessa mätningar utfördes främst för att upptäcka några av de problem som uppstår vid mätning och för att få en uppfattning om sugpyrometerns lämplighet för olika användningsområden. Några specifika resultat kommer ej att visas här, men en kontinuerlig diskussion om mätsvårigheter och användbarhet kommer att föras.

Förutom gastemperaturen mättes även:

- Gasflödet i sugpyrometern
- Kylvattnets in- och uttemperaturer
- Kylvattnets flöde
- Rumstemperaturen

Mätning av gasflödet innebar en del problem då utrustningen troligtvis läckte, vilket framkom vid en efterkontroll. Detta innebär att absoluta värden inte anges, men däremot har ökningar och minskningar av flödet noterats.

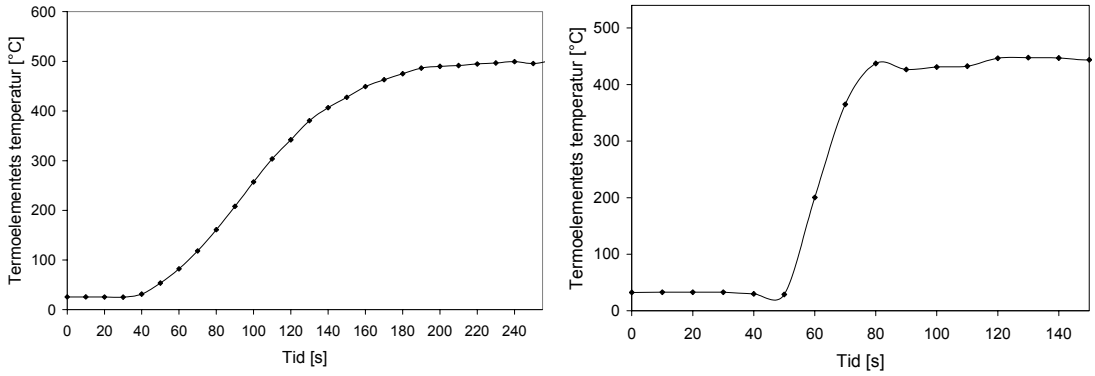
Under mätningarna kontrollerades även pannans driftdata som tex. effekt, syrehalt, fuktighet etc.

9.4 Resultat och analys

De resultat som visas är från mätningar är utförda med termoelement av typ N, jämförande mätningar med typ N och typ K finns att läsa om i ref [13]. De resultat som visas är mätningar från två olika punkter. Mätpunkt 1 är belägen intill pannans sidovägg och mätpunkt 2 är belägen i mitten av pannan, se figur 34.

9.4.1 Jämförelser med och utan gashastighet

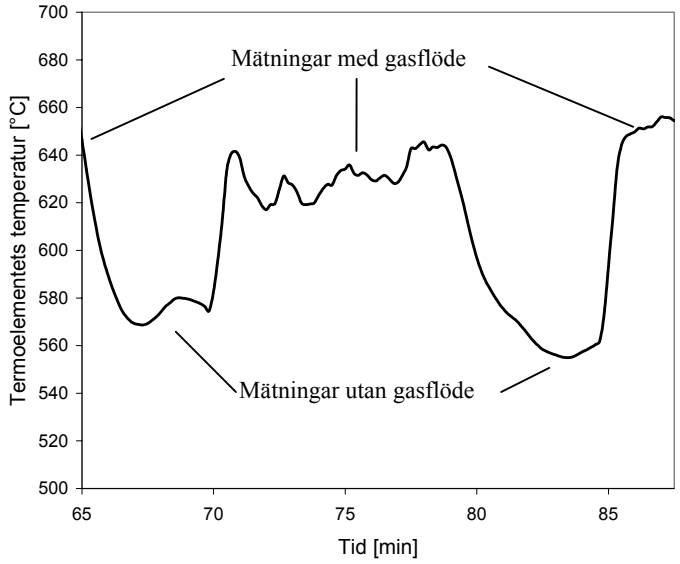
Figur 38 visar termoelementets temperatur med och utan gashastighet då sugpyrometern stacks in i pannan. Temperaturen registrerades medan sugpyrometern fördes in till mätpunkt 2. Det ses att i dem högra figuren, som visar temperaturen med gasflöde, så stabiliserar sig temperaturen snabbare än i den vänstra figuren, som visar temperaturen utan gasflöde. Detta innebär att sugpyrometern är mer noggrann vid realtidsmätningar än tex. mätning med ett mantlat eller kapslat termoelement. Notera att de två mätningarna är utförda vid olika tidpunkter och därför bör inte de absoluta värdena jämföras utan jämförelsen bör avse hur snabbt termoelementet svarar mot en omgivning med högre temperatur.



Figur 38. Till vänster ses termoelementets svar utan gashastighet i sugpyrometern och till höger ses termoelementets svar med gashastighet.

Figure 38. Thermocouple response without gas velocity (left figure) and with gas velocity (right figure).

En mätning utfördes där temperaturen mättes omväxlande med och utan gashastighet i sugpyrometern. Mätningarna upprepades i perioder i en omgivning med lägre temperatur än gastemperaturen. Resultatet kan ses i figur 39. De högre temperaturerna är uppmätta med gasflöde. Det är tydligt att en mycket högre temperatur mäts med gashastighet i sugpyrometern och således mäts en temperatur närmare den verkliga gastemperaturen.



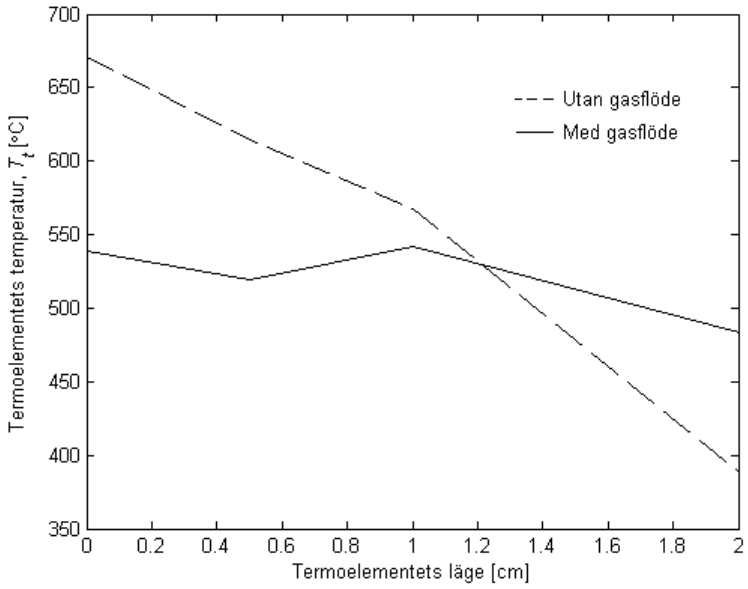
Figur 39. Resultat av omväxlande mätningar med och utan gashastighet. Mätningarna är utförda i ett område med $T_\infty < T_g$.

Figure 39. Result of measurements with and without gas velocity. The measurements is performed in an area with $T_\infty < T_g$.

9.4.2 Termoelementets läge i sugpyrometern

Vid sugpyrometerns kylmantel är temperaturen kallare än den verkliga gastemperaturen. Detta innebär att kan bli stora mätfel om termoelementets mätpunkt ligger för nära kylmanteln. En mätning utfördes där termoelementets läge varierades. Mätningarna skedde i mätpunkt 1, där mätvärdena medelvärdesbildades under perioder om ungefär 100s. Med termoelementets läge menas avståndet från strålskyddsrörets ändpunkt, där 0 cm innebär att termoelementets ände ligger ungefär 4 cm från kylmanteln och i strålskyddsrörets ändpunkt.

I figur 40 ses resultatet. Mätningen som utfördes utan gasflöde i sugpyrometern visar tydligt att temperaturen minskar ju närmare kylmanteln termoelementet befinner sig. Med gasflöde är temperaturskillnaderna mindre. Mellan 0 och 1 cm så är temperaturskillnaderna små.

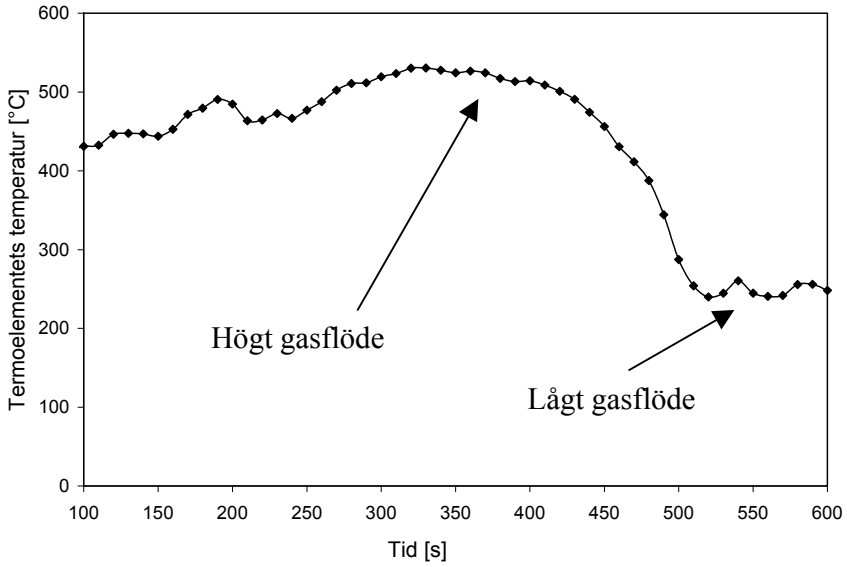


Figur 40. Jämförelse av mätningar med olika positioner av termoelementet. Mätningarna är utförda i ett område med $T_\infty > T_g$.

Figure 40. Comparison between measurements with different locations of the thermocouple. The measurements is performed in an area with $T_\infty > T_g$.

9.4.3 Mätproblem

Under mätningarna satte sugpyrometern igen sig vid ett flertal tillfällen. Figur 41 visar ett exempel på en mätning då ejektorpumpen delvis satte igen sig. Vid mätningen sjönk trycket över flödesmätaren kraftigt. Det vill säga flödet i sugpyrometern minskade och således även temperaturen. När sugpyrometern togs ur pannan noterades det att kylmanteln var täckt av fukt. Detta berodde på att bränslet hade en hög fukthalt och att vattenångan kondenserades mot den kalla kylmanteln. Vid mätningarna har det konstaterats att sugpyrometern mycket lätt sätter igen sig då bränslet är fuktigt. Detta mätproblem visar betydelsen av att kontrollera gasflödet. Det bästa är givetvis att gasflödet mäts kontinuerligt men om sådan utrustning inte finns bör sugpyrometern med jämna mellanrum kontrolleras, tex. genom att ta ut sugpyrometern ur pannan och inspektera mätspetsen.



Figur 41. Ett exempel på mätning då sugpyrometern satte igen sig.

Figure 41. An example on a measurement when the shielded aspirated thermocouple got clogged.

Ett annat problem som upptäcktes vid mätningarna var att termoelementets ändpunkt ibland låg an mot strålskyddsröret. Detta är ofta en konsekvens av att centrering fattas eller att centreringen inte fungerar som den ska. Då termoelementet ligger an mot strålskyddsröret förväntas mätfelet bli större. Mätningar utfördes då ett centrerat termoelement jämfördes med ett termoelement som låg an mot strålskyddsröret. Mätningarna gav dock inga kvalitativa resultat. Anledningen beror antagligen på att omgivningen förändrades mellan mätningarna. En annan anledning kan vara att kontaktmotståndet mellan termoelementet och strålskyddsröret var mycket stort då termoelementet låg an mot strålskyddsröret. Detta medför att värmeledningen mellan termoelementet och strålskyddsröret blir liten och på så vis kan större inga skillnader ses mellan mätningarna.

10 Resultatanalys

Utifrån de stationära och instationära beräkningarna kan det konstateras att sugpyrometerns noggrannhet beror av många faktorer. Den uppmätta temperaturen beror främst av:

- Strålningsfältet i förbränningsrummet
- Gashastigheten i sugpyrometern
- Gasens tidsvariationer i omgivningen
- Termoelementets och sugpyrometerns ytegenskaper
- Viskös upphettning (gasfriktion).

I en omgivning där strålskyddsröret avger strålning visades det, i bilaga A, att en högre temperatur hos termoelementet än den verkliga gastemperaturen kunde registreras. Detta inträffade vid mycket höga hastigheter och var en konsekvens av den viskösa upphettningen. Vidare visades det att mätfelet blir större hos sugpyrometern vid mätning i en omgivning där strålskyddsröret upptar strålning. Detta ses i avsnitt 7.2.1, figur 20.

Beräkningarna gav resultatet att en hög gashastighet i sugpyrometern bör användas för att minska mätfelet, helst en hastighet större än 60 m/s, men gärna över 100 m/s. Att gashastigheten i sugpyrometern har stor betydelse bekräftas av mätningar. Figur 41 i avsnitt 9.4.3 visar skillnaden i uppmätt temperatur för en låg respektive en hög hastighet.

Framförallt visar beräkningarna att sugpyrometerns noggrannhet kan variera kraftigt beroende på i vilken omgivningen mätning sker. Myten om att sugpyrometern ”mäter den verkliga gastemperaturen” bör därmed vara krossad.

Det är i princip möjligt att kompensera den uppmätta temperaturen utifrån den analytiska modellen som presenterades i avsnitt 6.3. Detta rekommenderas dock inte. Det finns alltför stora osäkerheter i uppskattningen av sugpyrometerns egenskaper, värmeövergångskoefficienter och omgivning. Däremot kan modellen användas för approximativa analyser, då den uppvisar samma trender som den mer sofistikerade modellen i FLUENT.

Mätningarna har framförallt visat att kontroll av gashastigheten i sugpyrometern är mycket viktig. Vid mätningarna upptäcktes det att sugpyrometern ofta satte igen sig. Denna typ av mätfel kan minskas genom att antingen mäta gasflödet väl under mätningen eller att med jämna mellanrum kontrollera pyrometern. Att termoelementet är centrerat bör också kontrolleras.

Mätningar visar också att mätpunkten bör vara belägen minst 3 cm från kylmantelns mynning för att minimera mätfelet. Detta kan ses i figur 40, avsnitt 9.4.2.

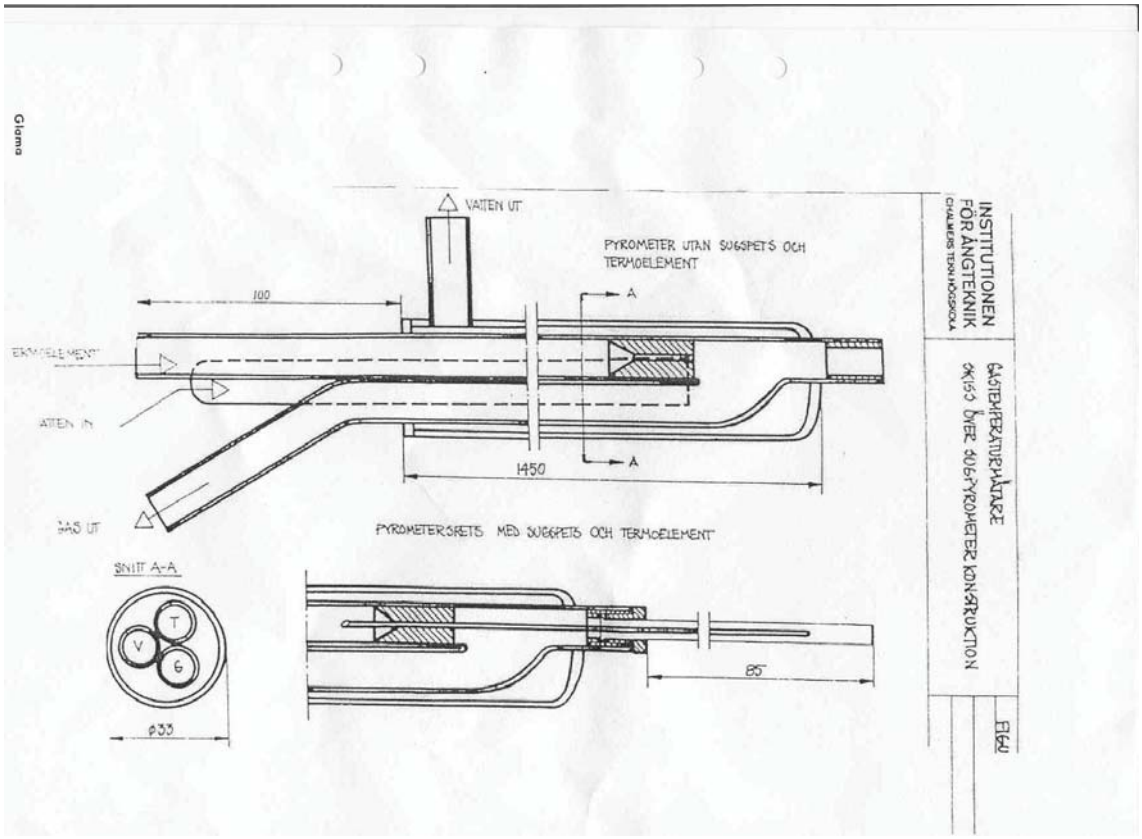
11 Konstruktion av sugpyrometer

Vid konstruktion av en sugpyrometer bör man beakta de fel som tidigare avsnitt pekat på. Det är viktigt att beakta ett antal olika parametrar. I Värmeforsk 23 finns ett förslag på hur en sugpyrometer kan se ut. Detta är dock inte någon tvingande konstruktion då sugpyrometrar ofta specialbyggs till speciella applikationer, t.ex. har ÅF:s sugpyrometrar har rektangulärt tvärsnitt för att kunna gå in i en fena mellan två tuber i en panna.

Valet av termoelement till sugpyrometern är väsentlig då de termiska och mättekniska förutsättningarna varierar. Vi rekommenderar i första hand två typer av termoelement; typ-N och typ-R. Vid temperaturer under 1300ºC är det typ-N som bör användas. Det är stabilt i temperaturområdet 200-1300ºC. Högre upp i temperaturområdet krävs ett platinabaserat termoelement och rekommendationen är typ-R. Arbetsområdet för detta element är upp till 1760ºC. Man skall dock vara försiktig med att använda platinabaserade termoelement då de kan förgiftas av reaktiva gaser samt att Seebeckkoefficienten är lägre än för andra termoelement, vilket medför sämre signal/brus förhållande och i slutänden en sämre noggrannhet.

Sugpyrometerns spets bör vara robust och värmetålig. Vi rekommenderar därför att man väljer stål upp till 1000ºC. Vid temperaturer därutöver bör keramisk spets användas eftersom stålspetsen blir mjuk.

Den konstruktion som redovisas i den gamla rapporten, se figur 42.



Figur 42 Förslag till konstruktion av sugpyrometer.. Bilden är tagen från ref[1]
Figure 42 Proposal on construction of suction pyrometer. Picture from ref[1]

Ovanstående förslag till sugpyrometer visar tre rör i vilket termoelementet går i ett rör, inkommande kylvattnet i ett och den utsugna gasen i ett. I ytterhöljet går returnerande kylvatten. I detta fall är sugpyrometern rund men den kan lika gärna ha ett rektangulärt tvärsnitt..

För att underlätta konstruktionsarbetet finns en lathund i bilaga B.

För att minimera mätfelet finns följande fem tips:

1. Gashastigheten i sugpyrometern skall vara mycket hög
2. Nya blanka termoelement skall användas
3. Termoelementets diameter skall vara liten jämfört med strålskyddsrörets
4. Termoelementets mätpunkt skall vara belägen minst 3 cm från kylmanteln
5. Mätning skall ske med termoelement av typ N eller typ R

Det är viktigt att använda så robusta detaljer som möjligt eftersom sugpyrometern ofta blir klumpig att hantera välj därför stål i första hand. För att få sug i pyrometern används idag dammsugare eller små tryckluftsdrivna ejektorer. Ejektorerna är att föredra då de inte kan at eld och har inga rörliga delar.

12 Slutsatser

Sugpyrometern är ett tillförlitligt mätinstrument som mäter medelvärden med hög noggrannhet, under förutsättning att sugpyrometern används rätt. För transienta mätningar kan dock stora mätfel fås. Den uppmätta temperaturen beror främst på i vilken omgivning man mäter i och vilken hastighet gasen har i sugpyrometern. Störst mätfel fås då strålningstemperaturen i omgivningen är högre än gastemperaturen. Då gashastigheten i sugpyrometern är hög och strålningstemperaturen i omgivningen är lägre än gastemperaturen så är mätfelet relativt okänslig för strålningstemperaturens storlek.

Sugpyrometerns mätfel minimeras om:

6. Gashastighet i sugpyrometern är mycket hög
7. Nya blanka termoelement används
8. Termoelementets diameter är liten jämfört med strålskyddsrörets
9. Termoelementets mätpunkt är belägen minst 3 cm från kylmanteln
10. Mätning sker med termoelement av typ N eller typ R

Denna rapport skall vara en modernisering av Värmeforsk rapport 23 vilket det är på det sättet att vi beräknat felen med moderna metoder och vi har utnyttjat termoelement som finns på marknaden och inte är det dyraste utan mer enkla material.

Tänk på att det dyraste termoelementet inte behöver vara bäst.

13 Litteraturreferenser

[1] Lars Strömberg, *Gastemperaturmätare Sugpyrometer*, Värmeforsk 23, September 1975

[2] Linda G. Blevins, William M. Pitts, *Modeling of Bare and Aspirated Thermocouples in Compartment Fires*, Fire Safety Journal, Vol.33, No. 4, November 1999

[3] J.P Holman, *Heat Transfer*, *8 ed*, McGraw-Hill, New York 2001

[4] Frank P. Incropera, David P. De Witt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, *Second edition*, Wiley, New York 1987

[5] Internetreferens: www.pentronic.se

[6] Dr. Noel A. Burley, *Nicrosil/Nisil Type N Thermocouples*.

[7] Henrik Alvarez, *Energiteknik. D. 1.* Lund, Studentlitteratur, 2003

[8] Gunnar Hellsten, *Tabeller och diagram*, Almqvist & Wiksell, Falköping 1992

[9] Internetreferens: www.ceramics.nist.gov

[10] Craig C Goodson, *Simulation of Microwave Heating of Mullite Rods*, Master's thesis, December 1997

[11] FLUENT user guide

[12] Dr. Hermann Schlichting, *Boundary-Layer Theory*, McGraw-Hill, 1979

[13] Roland Gårdhagen, Jonas Hägglund, Hans Lindqvist, Krister Wahlström, Elisabet Blom, *Mätning av temperaturer enligt EU:s direktiv om förbränning av avfall, undersökande temperaturmätningar och simuleringar*, Värmeforsk 801, 2002

[14] Pitts W.M, Braun E, Peacock R.D, Mitler H.E, Johnsson E.L, Reneke P.A, Blevins L.G, *Temperature Uncertainties for Bare-Bead and Aspirated Thermocouple Measurements in Fire Environments,* ASTM International, Wets Conshohocken, PA, 2002.

[15] Muntlig referens: Per Olowson, ÅF Energi&Miljö, Kvarnbergsgatan 2, 401 51 Göteborg

[16] Muntlig referens: Hans Wenegård, Pentronic, 590 93 Gunnebo

A Analys av beräkningsmodellen

Den här bilagan tar upp beräkningar som är avsedda för att studera om variationer hos vissa parametrar och randvillkor, som är svåra att uppskatta, har stor inverkan på resultaten. För samtliga beräkningar gäller de förutsättningar som är angivna i avsnitt 7.1, förutom att strålskyddrörets längd är 30 mm.

A.1 Inverkan av randvillkor

Det är svårt att uppskatta hur mycket turbulens som genereras vid inloppet. Reynoldstalen, vid en hastighet på ungefär 50 m/s, är sådana att det inte går att betrakta strömningsförhållandet som fullständigt laminärt eller fullständigt turbulent.

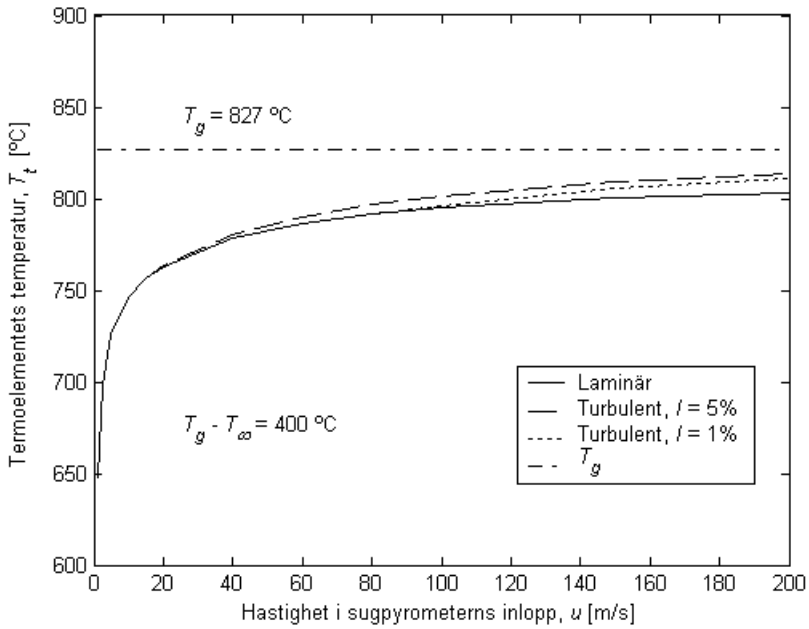
I modelleringen har det vid utloppet antagits att alla flödesgradienter är noll. Det antas alltså att termoelementets temperatur i mätpunkten är oberoende av temperaturen längre in i sugpyrometern. Det antas också att strömningsförhållandet längre in i sugpyrometern inte påverkar strömningsförhållandet i den studerade modellen.
.

Ovanstående resonemang kan sammanfattas i två frågor:

- Hur mycket påverkas termoelementets temperatur för olika grader av turbulens vid inloppet?
- Hur mycket påverkas termoelementets temperatur av förhållandena längre in i sugpyrometern ?

Figur 1 visar en laminär beräkning jämfört med två turbulenta beräkningar, där den turbulenta intensiteten, I, vid inloppsranden varierar mellan de turbulenta beräkningarna. Då inte uppmätta värden finns på de turbulenta parametrarna vid inloppsranden så brukar turbulent intensitet och hydraulisk diameter användas som randvillkor. Vanligtvis väljs I mellan 1 - 6%, ref [11].

I figuren ses termoelementets temperatur, T_t, för olika gashastigheter på inloppsranden. Det bör noteras att beräkningarna vid låga hastigheter, $u \leq 5$ m/s och höga hastigheter, $u \geq 100$ m/s kan vara något missvisande. Vid låga hastigheter kan inte längre inverkan av naturlig konvektion betraktas som försumbar och vid höga hastigheter så är det vanskligt att anta att gasen är inkompressibel. Resultaten vid dessa hastigheter ger dock en fingervisning om sugpyrometerns karakteristik.



Figur 1. Jämförelse av olika randvillkor i inloppet.

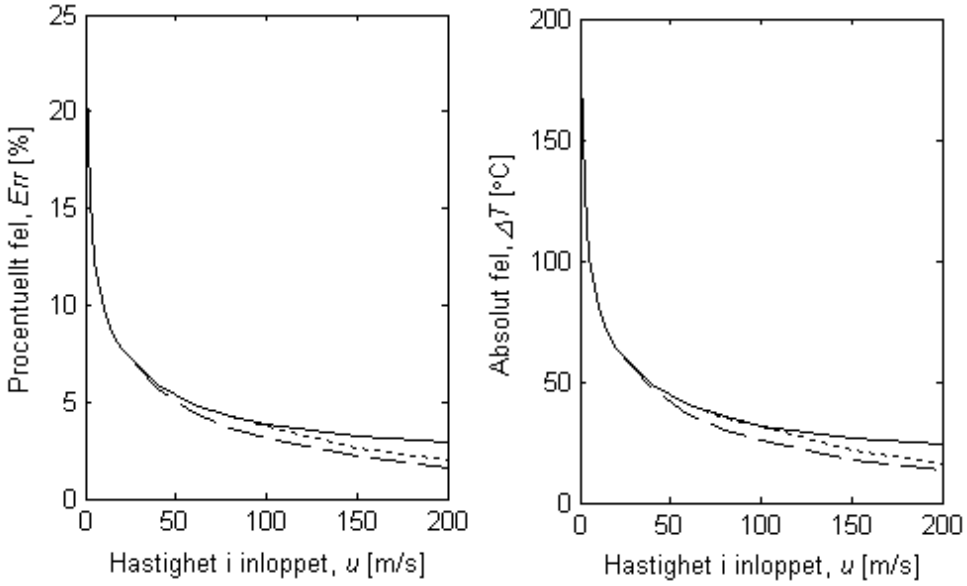
Figure 1. Comparison between different boundary conditions at the inlet.

I både figur 1 och figur 2, som visar termoelementets fel med avseende på gashastigheten i inloppet, ses det att beräkningarna inte nämnvärt skiljer sig åt för $u \leq 50$ m/s. Strömningen är då, i stort sett, laminär och randvillkoren i de turbulenta beräkningarna påverkar ej resultatet då inverkan av de turbulenta parametrarna dämpas ut i strömningens riktning.

I hastighetsområdet $50 \leq u \leq 100$ m/s är det bara beräkningen med $I = 5\%$ som avviker från övriga resultat och i hastighetsområdet $100 \leq u \leq 200$ m/s så skiljer sig alla resultat från varandra.

För u $\approx$ 200 m/s så börjar de turbulenta beräkningarnas resultat att sammanfalla med varandra. Strömningen är då, i stort sett, helt turbulent och oberoende av valet av turbulent intensitet vid randen. En anledning kan vara att vid höga Reynolds tal domineras turbulensen av rörelseenergi och det som händer vid termoelementet.

Det är således uppenbart att olika val av randvillkor vid inloppet påverkar beräkningsresultatet, speciellt vid sughastigheter. Det som idag frekvent används vid mätning med sugpyrometer 50 m/s. Detta beror på att strömningsförhållandena varken är fullständigt laminära eller turbulenta vid dessa hastigheter.



Figur 2. Procentuellt fel (vänster figur) och absolut fel (höger figur) för laminär strömning (heldragen linje), turbulent strömning med intensiteten 1 % (punkter) och turbulent strömning med intensiteten 5 % (streckad linje).

Figure 2. Relative error (left figure) and absolute error (right figure) for laminar flow (line), turbulent flow with intensity of 1 % (dots) and turbulent flow with intensity 5 % (dotted line).

Tabell 1 visar resultaten av beräkningarna för u = 60, 100 och 150 m/s. Här anges termoelementets procentuella fel, *Err*, i termer av den absoluta gastemperaturen.

$$Err = [\Delta T\,(°C)/T_g\,(°C)] \text{ x } 100\ \%. \quad (1)$$

För beräkningarna som visas i tabellen så anses det att termoelementets procentuella fel är litet, <5%, och att det inte varierar mycket. Men även om det procentuella felet inte varierar mycket mellan de olika beräkningarna så ger små skillnader stora utslag i absolut fel, ΔT. Här definieras det absoluta felet som

$$\Delta T = T_g - T_t. \quad (2)$$

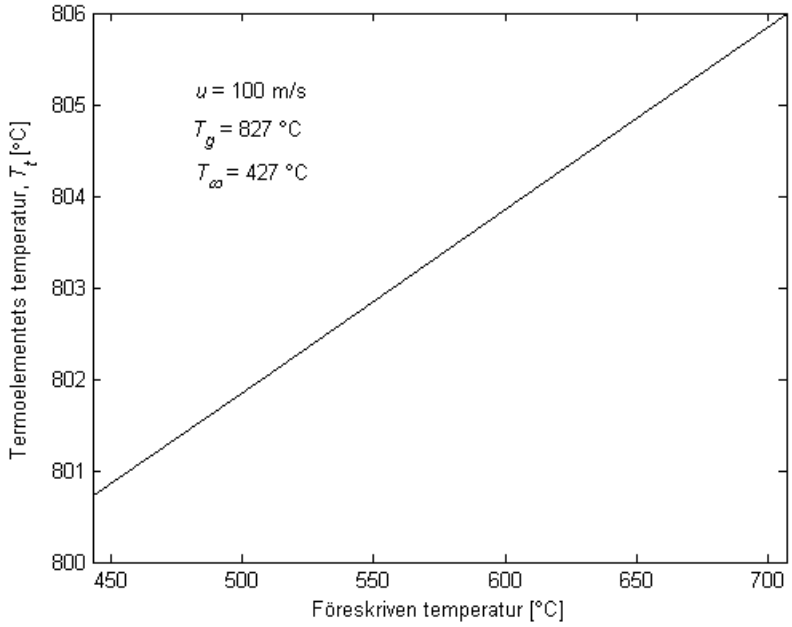
Den största skillnaden i absolut fel sker vid höga hastigheter. Där till exempel skillnaden för u = 150 m/s är 9 °C som störst mellan den laminära och de turbulenta beräkningarna. Eftersom Reynolds tal är högt är det missvisande att att betrakta strömningen som laminär. Jämförs då de två turbulenta beräkningarna fås en skillnad som bara är 3°C.

Sammanfattningsvis kan det konstateras att olika val av randvillkor påverkar resultatet, och om uppmätta värden hade funnits på de turbulenta parametrarna hade dessa varierat med hänsyn till omgivningen och sughastighet. Enligt ref[11] varierar vanligtvis den turbulenta intensitet mellan 1 – 6 % och för att minimera felet på grund av fel val av randvillkor väljs lämpligen intensiteten till I = 3%. Detta ger ett maxfel på grund av fel i randvillkoret på ungefär ± 4 °C i beräkningarna, vilket får anses vara acceptabelt.

Tabell 1. Sammanfattning av olika inloppsrandvillkor.

$T_g - T_\infty = 400$ ºC	$u = 60$ m/s Re = 3440	$u = 100$ m/s Re = 5730	$u = 150$ m/s Re = 8600
Laminärt			
T_t	787 °C	795 °C	800 °C
ΔT	40 °C	32 °C	27 °C
Err	4.9 %	3.8 %	3.2 %
Turbulent, $I = 1\%$			
T_t	787 °C	796 °C	805 °C
ΔT	40 °C	31 °C	21 °C
Err	4.9 %	3.8%	2.6 %
Turbulent, $I = 5\%$			
T_t	790 °C	802 °C	809 °C
ΔT	37 °C	25 °C	18 °C
Err	4.5 %	3.1 %	2.1 %

I modelleringen har det vid utloppet antagits att alla flödesgradienter är noll. Det antas alltså att temperaturen vid kylmantel inte påverkar mätpunktens temperatur. En undersökning där beräkningar med föreskrivna temperaturer på strålskyddsrörets ände vid utloppet utfördes. Detta är lämpligt eftersom strålskyddsröret ansluts till kylmanteln. Det bör dock noteras att modellen är endast 2.5 cm lång i denna beräkning och motsvarar bara en del av en mätspets. Den totala längden på en mätspets är vanligtvis längre, ungefär 4 – 15 cm. Den föreskrivna temperaturen motsvarar därför inte kylmantelns temperatur. I figur 3 ses resultatet. Märk här att temperaturen 707°C vid strålskyddsrörets ände (vid utloppet) inte är föreskriven utan fås då alla flödesvariabler har en nollgradient i utloppet. Hastigheten är 100 m/s i inloppet och för en minskning av 100°C på strålskyddsrörets ände fås ungefär en minskning av 2 °C i termoelementets mätpunkt. Vid höga hastigheter bör därför inte kylmantelns temperatur påverka termoelementets temperatur nämnvärt.



Figur 3. Termoelementets temperatur för olika föreskrivna temperaturer på strålskyddsrörets ände (vid utloppet). u = 100 m/s, T_g = 827 °C and T_∞ = 427 °C.

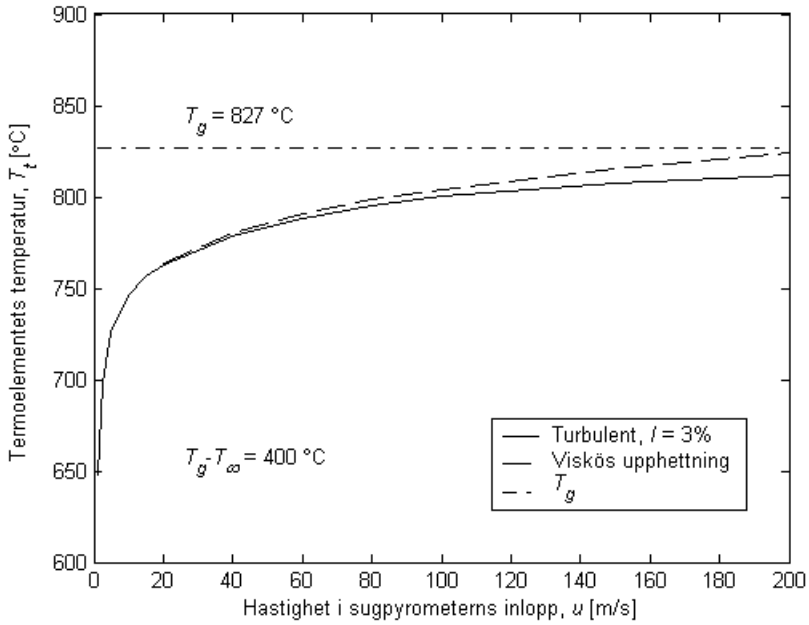
Figure 3. Thermocouple temperature for different prescribed temperatures on radiation shield (outlet). T_g = 827 °C and T_∞ = 427 °C.

A.2 Inverkan av viskös upphettning

Viskös upphettning uppstår då en gas strömmar över en kropp med hög hastighet. En del av gasens kinetiska energi omvandlas till friktionsvärme då molekylerna ”krockar” med kroppen, vilket medför en ökad värmeenergi hos kroppen.

I sugpyrometern kan viskös upphettning inträffa på insidan av strålskyddsröret och på utsidan av termoelementet vid höga hastigheter. Detta kan ge både en ”önskad” och ”oönskad” temperaturökning i mätpunkten. Temperaturökningen kan yttra sig i att den uppmätta temperaturen kommer närmare den verkliga gastemperaturen. Vid mycket höga hastigheter kan dock den uppmätta temperaturen bli högre än den verkliga gastemperaturen. Detta kan vara ett problem i tex. förbränningsrum med kylda väggar eftersom det ofta förutsätts att temperaturen som mäts alltid är lägre.

Figur 4 visar en jämförelse mellan beräkningar med och utan viskös upphettning. Det är tydligt att den viskösa upphettningen har stor inverkan på termoelementets temperatur vid höga hastigheter. För $u \leq$ 100m/s är inverkan liten och för u > 200 m/s inses att inverkan är så stor att termoelementets temperatur blir högre en den verkliga gastemperaturen.



Figur 4. Jämförelse av simuleringar med och utan viskös upphettning.

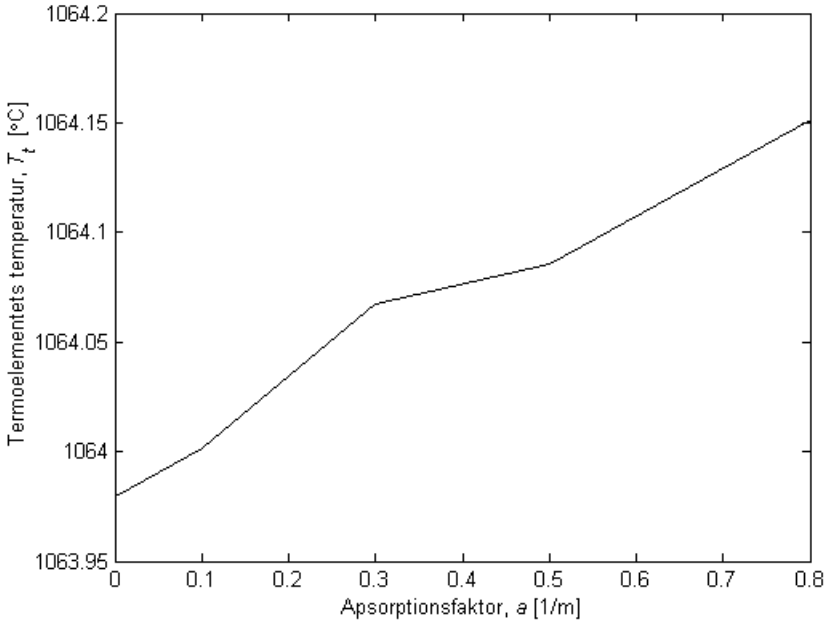
Figure 4. Comparison of simulations with and without viscous heating.

A.3 Inverkan av gasstrålning i sugpyrometern

En förbränningsgas innehåller ofta kemiska föreningar, till exempel vattenånga och koldioxid, som gör att den inte kan betraktas som transparent. En gas som inte är transparent absorberar och avger strålningsenergi. Gasen som sugs genom sugpyrometern kommer alltså att inverka på strålningen mellan termoelementet och strålskyddsröret.

Gasens strålningsegenskaper utgörs av dess absorptionsfaktor. Enligt ref [15] varierar vanligtvis absorptionsfaktorn, a, mellan 0.1 och 0.2 för den typ av förbränningsgas som studeras. Det finns dock en osäkerhet med valet av gasens absorptionsfaktor, då den egentligen är temperaturberoende och våglängdsberoende. För att studera hur känslig termoelementets temperatur är för olika värden på denna faktor så har ett antal beräkningar utförts då denna faktor har varierats.

I figur 5 ses hur den beräknade temperaturen hos termoelementet varierar för olika värden på gasens absorptionsfaktor. Studeras figuren inses att inverkan av gasstrålningen mellan termoelementet och strålskyddsröret är försumbar och att gasen kan ses som transparent. Detta kan förklaras genom att undersöka det optiska djupet, aL, där L är en karakteristiksk längd som beskriver den längd strålningsenergin färdas. Denna väljs i detta fall lämpligen till den kortaste längden mellan termoelementet och strålskyddsröret. Enligt ref [11] är ett medium med $aL > 3$ optiskt tjockt, det vill säga mediet inverkar mycket på strålningen, medan $aL < 1$ är optiskt tunt. Avståndet mellan sugpyrometern och strålskyddsröret är endast några millimeter vilket innebär att $aL << 1$ för ett stort antal värden på a. Således är inverkan av gasstrålning mycket liten mellan termoelementet och strålskyddsröret.



Figur 5. Jämförelse av simuleringar med olika absorptionsfaktorer.

Figure 5. Comparison of simulations with different absorption factors.

B Att tänka på vid konstruktion av sugpyrometer

Det finns ett flertal olika utformningar av sugpyrometrar. I denna rapport utvärderas en sugpyrometer med ett strålskyddsrör med en insugsöppning som innebär att termoelementet ser omgivningen genom öppningen. Detta innebär inte att just denna typ av sugpyrometrar är bäst. Det kan bland annat nämnas att flera koncentriska strålskyddsrör med insug är bättre ur ett mätperspektiv men det innebär också att konstruktionen är mer komplicerad. Det bör också vara en fördel om sugpyrometern är konstruerad så att termoelementet inte ser omgivningen, till exempel genom att strålskyddsröret är krökt i änden. Varje konstruktion är en anpassning för den omgivning sugpyrometern ska användas i och vilken noggrannhet som krävs. Detta leder till ett par frågor som bör besvaras vid nykonstruktion av sugpyrometer.

A. Vilka egenskaper har omgivning som sugpyrometern ska användas i?
B. Hur noggrann behöver mätningen vara?
C. Vilka geometriska krav finns?

A Vilka egenskaper har sugpyrometern omgivning

Den första frågan bestämmer bland annat vilket temperaturområde skall sugpyrometern skall arbeta i. Över 1000 °C kan inte mätspetsar av stål användas utan sugpyrometerns mätspets bör konstrueras med ett mer temperaturtåligt material, till exempel ett keramiskt material.

Vilka kemiska egenskaper har gasen i omgivningen? Om omgivningen är korrossiv, vilket är vanligt vid förbränningen av sopor och biobränsle, måste materialen i sugpyrometern väljas så att korrossiva effekter motverkas. En mätspets av rostfritt stål klarar de flesta omgivningar, men dess anslutning mot kylmantel rostar ofta ihop och det blir problem att byta ut spetsen vid skador. Den är dock mycket robust och lämpar sig för fältmätningar. En keramisk mätpets har bättre egenskaper mot korrossion, men är mycket skör och går lätt sönder.

B Hur noggrann behöver mätningen vara?

Vad ska mätdatan användas till? Behöver små skillnader hos gastemperaturen upptäckas? Är det viktigt att temperaturen mäts i realtid? Detta är frågor som bör besvaras då en sugpyrometer konstrueras. För vanliga fältmätningar behöver ofta inte uppmätt värde vara noggrannare än ungefär ±50 °C. Det finns då ingen anledning att använda sig av en sugpyrometer för vetenskapligt bruk. Det samma gäller då till exempel relativa mätvärden används för driftskontroll i ett förbränningsrum.

Däremot om noggrannheten är av stor vikt, till exempel vid mätningar med forskningsanknytning, så bör mycket tid läggas på hur sugpyrometern ska konstrueras. Det kan då vara av intresse att använda sig av flera koncentriska strålskyddrör och speciella termoelement med små dimensioner.

Nedan listas de egenskaper sugpyrometern bör ha för god noggrannhet. Sugpyrometerns mätfel minimeras om:

- Gashastigheten i sugpyrometern är hög
- Nya blanka termoelement används
- Termoelementets diameter är liten jämfört med strålskyddsrörets
- Termoelementets mätpunkt är belägen minst 3 cm från kylmanteln
- Mätning sker med termoelement av typ N eller typ R

C Vilka geometriska krav finns?

Hur stora är de förbränningrum som sugpyrometern ska användas i och hur nås de punkter i förbränningsrummet som ska mätas? Sugpyrometern längd måste anpassas så att önskade mätpunkter i förbränningsrummet kan nås. Vidare så måste sugpyrometerns tvärsnitt och längd anpassas så att mätpunkterna kan nås utifrån öppningarna i förbränningsrummet.

C Att tänka på vid mätning med sugpyrometer

Nedan följer en lista med råd och tips för att undvika några vanliga fel.

- Se till att termoelementen är så raka som möjligt före de förs in i sugpyrometern.

- Se till att inte termoelementen är felkopplade. Vanliga fel är polvändning, kortslutning och avbrott. Vid polvändning så är ofta termoelementet felkopplat till dataloggern. Vid kortslutning ligger termoelementtrådarna an mot varandra, vilket innebär att en felaktig mätpunkt skapas. Avbrott kan bero på att termoelementet inte är helt inkopplat till följd av att en av trådarna har lossnat från anslutningen i dataloggern eller att anlutningen är trasig.

- Kontrollera sugpyrometern och övrig mätutrustning med jämna mellanrum.

- Se till att termoelementet är centrerat i sugpyrometern och att dess ände är nära insugsöppningen, ungefär 0.5 cm – 1 cm från öppningen.

- Byt ut termoelementet med jämna mellanrum. Att använda samma termoelement i flera dagar i en mätmiljö med höga temperaturen kan innebära att egenskaperna hos termoelementet har förändrats sig mycket. Detta är vanligt för typ K, där stora fel kan fås. Att använda sig av typ N är att föredra, då dessa är mer lämpade för användning i höga temperaturer, eller typ R vid mycket höga temperaturer.

- Använd en datautrustning så att uppmätt temperatur kan studeras under mätningen. På så vis kan onaturliga temperaturförändringar ses då till exempel sugpyrometern sätter igen sig.

- Kontrollera gasflödet i sugpyrometern. Om temperaturen förändras kraftigt under mätningen kontrollera då att sugpyrometern har ett tillräckligt gasflöde. Detta görs enklast genom att kontinuerligt mäta gasflödet eller genom att känna efter med handen att det suger vid sugpyrometerns insug.

- Mätning i en punkt bör ske i minst några minuter. Det tar tid innan sugpyrometern stabiliserar sig. Det är också lämpligt att bestämma ett medelvärde av temperaturer uppmätta under en längre tid. Detta ger en mer rättvis bild av den normaltemperatur som förbränningsrummet har.

- Repetera mätningar och jämför. Om driften inte har förändrats mycket mellan mätningarna och temperaturerna skiljer sig mycket åt bör sugpyrometern och övrig utrustning kontrolleras.

- En samplingstid på 10 sekunder är vanligtvis lämplig. Kortare samplingstider ger bara svårhanterliga data.

- Kotrollera förbränningsrummets driftdata, till exempel effekt, syrehalt, fuktighet, last flöden med mera. Om underliga mätdata fås kan det bero på att driften eller bränslet förändrats.

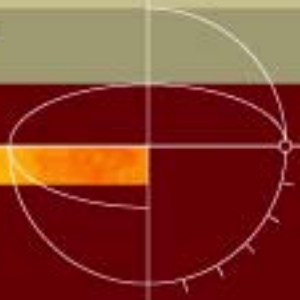
- Använd alltid minst två slangklämmor för anslutningarna. Det är förödande om vattentillförseln till sugpyrometern försvinner, då det kan innebära att sugpyrometern förstörs. Vid höga temperaturer blir kylmanteln mjuk, om inte vattenflöde finns, vilket kan innebära att kylmanteln viker sig.

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

Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig industri

VÄRMEFORSK SAMARBETAR MED STATENS ENERGIMYNDIGHET



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

Beställning av trycksaker
Fax 08-677 25 35

P4-305

884