VÄRMEFORSK
STIFTELSEN FÖR VÄRMETEKNISK FORSKNING

Förstudie av viktiga strömningstekniska faktorer vid inblåsning av kalkpulver för avsvalning och rökgaser.

Lars Ljung

BRÄNSLETEKNIK 268

Värmeforsk projekt B4-605

FÖRSTUDIE AV VIKTIGA STRÖMNINGSTEKNISKA FAKTORER VID INBLÅSNING AV KALKPULVER FÖR AVSVAVLING AV RÖKGASER.

Fluid dynamic aspects of sorbent injection for SO_x control, a prestudy.

Mars 1986

Lars Ljung

3K Engineering AB
Box 1326
111 83 STOCKHOLM

tel 08-7230270

Innehållsförteckning

1.	SAMMANFATTNING	3
2.	SUMMARY	4
3.	ALLMÄNNA FAKTORER AV BETYDELSE VID AVSVAVLING MED KALKPULVER	5
4.	STRÖMNINGSTEKNISKA FAKTORER AV BETYDELSE VID AVSVAVLING	5
4.1	Jetstrålar i tvärström, impulsens betydelse	6
4.2	Strömningsbilden i pannan, hastighetsförhållanden	8
4.3	Inverkan av kalkmängd och temperatur på strålar	9
4.4	Geometriska faktorer vid inblåsning (vinklar, antal strålar, tvärsnittsform)	9
4.5	Betydelsen av jämn kalkfördelning i strålarna	10
4.6	Inverkan av eventuell rotation i strålarna	10
5.	DISKUSSION AV STRÖMNINGSTEKNISKA FENOMEN	11
5.1	Hur sker turbulent blandning?	11
5.2	Inverkan av partiklarnas tröghet	12
5.3	Uppskattning av tidsbehov för gasdiffusion	13
5.4	Jämförelse mellan tidsstorheter	14
5.5	Har turbulensen i strålarna någon betydelse?	16
5.6	Val av lämpligt antal inblåsningsstrålar	16
5.7	Coanda-effekten	17
6.	PRAKTISKA SYNPUNKTER PÅ KALKINBLÅSNING	18
6.1	Betydelsen av jämn kalkdosering	18
6.2	Styrning vid varierande panneffekt	18
6.3	Risk för bildning av kalkklumpar	18
6.4	Inblåsning med recirkulerade rökgaser	18
6.5	Möjligheter att kontrollera blandningsförloppet eller resultetet av avsvavlingen	19
7.	HJÄLPMEDEL FÖR DIMENSIONERING AV INBLÅSNINGSSYSTEMET	19
8.	SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER	20
9.	REFERENSER	21

1. SAMMANFATTNING

Avsvavling av rökgaser kan ske genom att kalkpulver sprutas in direkt i en panna. Många villkor måste uppfyllas för att en effektiv avsvavling skall kunna erhållas. I denna förstudie behandlas de strömningstekniska aspekterna på avsvavling med kalkpulver i förbränningsanläggningar.

Det är av central betydelse att en så stor del som möjligt av både rökgaser och kalkpartiklar kommer i kontakt med varandra under tillräcklig tid och inom lämpligt temperaturområde. För att åstadkomma detta injiceras kalkpulvret med ett antal turbulenta jetstrålar. Placeringen och dimensioneringen av dessa strålar är av avgörande betydelse för resultatet av avsvavlingen.

Det finns en omfattande litteratur som behandlar turbulenta jetstrålar, t ex korrelationer för avböjning av jetstrålar i tvärströmmar. Dessa litteraturuppgifter är dock av litet värde utan kunskap om de faktiska strömningsförhållandena i en anläggning. För en praktisk dimensionering av en panna krävs kunskap om strömningsbild, gashastigheter och temperaturer. Detta medför ett omfattande behov av mätningar och modellförsök.

I rapporten diskuteras olika strömningstekniska fenomen som är av betydelse t ex turbulens och tröghetskrafter på kalkpartiklarna. Några av fenomenen kan beskrivas kvantitativt med tidsstorheter. Detta gäller t ex för hur snabbt gasdiffusionen till partiklarna kan äga rum. Ett entydigt resultat av dessa beräkningar är vikten av att tillräckligt finkornigt kalkpulver används.

För fortsatta studier föreslås dels en studie över möjligheterna att använda datormodeller för att t ex simulera blandningsförloppet vid kalkinblåsning. Dessutom föreslås en studie över möjligheterna att under drift av förbränningsanläggningar övervaka och styra blandnings- och avsvavlingsförloppen.

2. SUMMARY

Sulphur can be removed from flue gases through direct in furnace injection of a suitable sorbent. Several condition must be fulfilled in order to achieve an efficient desulphurization. This prestudy is however only concerned with the fluid dynamics aspects of sorbent injection.

For efficient desulphurization it is of course necessary to get a good mixing of the sorbent particles with the flue gas. The hold up time of the particles should be long enough in a suitable temperature interval.

For design of the sorbent injection system it is necessary to have a detailed knowledge of flow patterns, flue gas velocities and temperatures in the furnace. An extensive use of measurements and fluid flow modeling is thus required.

Discussed in the report are different fluid dynamic aspects that are of importance, e.g. turbulence and particle inertia. In some cases numerical values for different entities with dimension time can be estimated and compared. An implication of that is the importance of using a sorbent with small enough particle size.

For further work on sorbent injection systems two studies are proposed:

A) A study of possibilities of fluid and particle flow simulations with available computer models.

B) A study of in furnace observation and fluid control of injection jets.

Keywords:

Sorbent injection, limestone injection, particle flow, particle jets, turbulent jets, desulphurization, in furnace injection, SO_2-control.

3. ALLMÄNNA FAKTORER AV BETYDELSE VID AVSVAVLING MED KALKPULVER

Vid avsvavling med kalkpulver är många olika faktorer viktiga för att ett gott resultat skall erhållas. Först och främst måste förutsättningarna för de kemiska reaktionerna gälla. Kalk i form av CaO och svavel (som SO_2 och SO_3) måste således finnas i tillräckliga koncentrationer och på samma platser i pannan. Temperaturen måste vara tillräckligt hög för att en god kinetik skall erhållas och för att kalken skall kunna brännas till CaO. Temperaturen måste samtidigt vara tillräckligt låg för att undvika sintring eller sönderdelning av bildat sulfat)

Exempel på andra faktorer som är viktiga för resultatet av avsvavlingen är:

Koncentrationen av kalkpulver

Svavelhalten i rökgaserna

Tillräcklig omblandning så att kalk och svavel finns på samma platser i pannan

Tillräcklig uppehållstid

Lämplig typ av sorbent (kemisk sammansättning, porositet)

Kornstorlek

Hanterbarhet t ex i doseringsutrustningen.

(Anmärkning: I rapporten har kalk använditts som en gemensam beteckning för olika sorbenter som $CaCO_3$, CaO, $Ca(OH)_2$, $MgCO_3 \cdot CaCO_3$ osv.)

4. STRÖMNINGSTEKNISKA FAKTORER AV BETYDELSE VID AVSVAVLING

Inblåsningen av kalkpulver skall utföras så att en tillräckligt jämn blandning av kalkpulver och rökgas erhålls inom lämpligt temperaturområde. Det är självklart viktigt att en så stor del som möjligt av rökgasflödet kommer i kontakt med kalken. Samtidigt är det viktigt att undvika zoner med onödigt hög koncentration av kalkpulver som kommer att utnyttjas dåligt.

Strömningsbilden i pannan och gashastigheterna i kalkstrålarna är av central betydelse för hur inblandningen fungerar.

4.1 Jetstrålar i tvärström, impulsens betydelse

Det finns många publicerade undersökningar av hur jetstrålar avböjs i en tvärström. De flesta avser dock endast rena gaser och således ej tvåfasflöden med fasta partiklar.

Många korrelationer för hur avböjningen sker finns angivna. De flesta kan allmänt skrivas:

$$y/d = A\ J^B\ (x/d)^C$$

x är avståndet från munstycket längs tvärströmmen
y är inträngningen av strålens mittlinje i huvudströmmen.
d är munstyckets diameter.
J är kvoten mellan impulsen i strålen och i tvärströmmen.

$$J = \rho_{stråle}\ u^2_{stråle} / \rho_{ström}\ u^2_{ström}$$

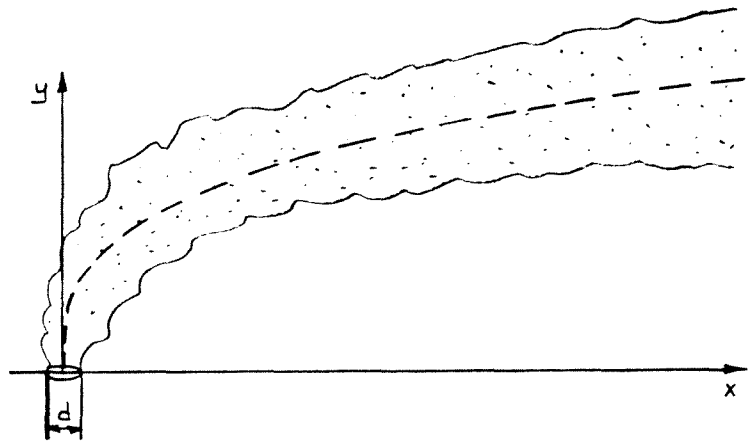
A, B och C är konstanter för vilka det går att finna många olika värden i litteraturen, se tabell 4-1.

Tabell 4-1 Värden på konstanterna i fomeln för inträngning av en jetstråle i en tvärström. (För mer utförlig information hänvisas till referenserna Rajaratnam, Rudinger samt Himes.)

Values of constants A, B and C in the expression for the centerline trajectory of a jet penetrating into a uniform cross stream (from Rajaratnam, Rudinger and Himes).

Referens	källa	A	B	C	partiklar
Rajaratnam	Ivanov	1	0,87	0,33	nej
	Shandorov	1	0,79	0,39	nej
	Gordier	1,31	0,74	0,37	nej
	Patrick	1	0,85	0,34	nej
	Williams	0,755	1	0,33	nej
Rudinger	Salzman	1,34	0,5	0,22	ja
Cetegen	?	1	0,43	0,36	?
Himes	Margason	1,59	0,33	0,33	nej
	Rudinger	1,39	0,3	0,27	ja

Figur 4-1 illustrerar korrellationen med C=0,3.



Figur 4-1 Avböjning av jetstråle i jämn tvärström.

Deflection of a jet in a uniform cross stream.

Det är i detta sammanhang av underordnad betydelse vilka numeriska värden som används för att beräkna hur en jetstråle avböjs. (Tabell 4-1 antyder dock att många undersökningar har utförts.) I en verklig panna är ju de faktiska strömningsförhållandena i allmänhet okända.

Formeln ovan visar att kalkstrålarnas inträngning (y) i pannan ökar med både bärargasens hastighet och munstyckenas diametrar (d). Om konstanterna väljs (enligt Rudinger) till A=1, B=0,45 och C=0,3 så erhålls:

$$y = A\, J^{B}\, x^{C}\, d^{1-C} \sim u_{\text{stråle}}^{2B}\, d^{1-C} = u_{\text{stråle}}^{0,9}\, d^{0,7}$$

För ett givet flöde $\dot{V}$ per stråle är hastigheten proportionell mot $\dot{V} / d^{2}$. Inträngningen blir därför större med mindre munstycken enligt:

$$y \sim \dot{V}^{0,9}\, d^{-1,1}$$

Så länge trycket räcker till kan alltså en önskad inträngning erhållas med ett begränsat bärarflöde genom att munstyckena görs tillräckligt små.

Uttrycken ovan gäller inte om kalkkornen är så stora att trögheтskrafterna på kornen dominerar. Ett problem är också att kalkpulvret kan ha en hastighet som är betydligt lägre än gashastigheten i strålen.

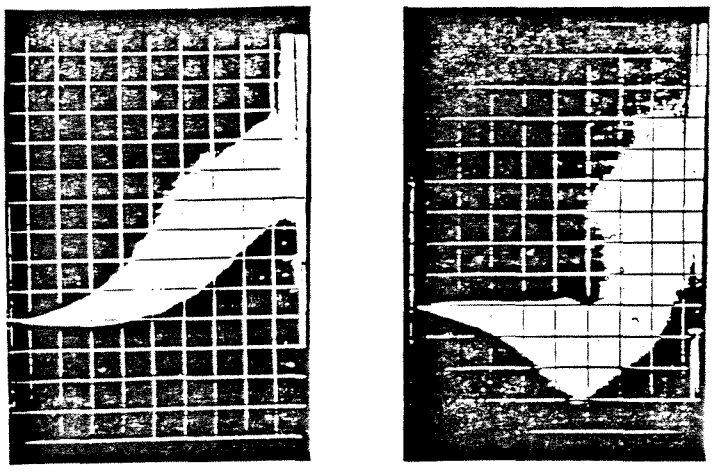
4.2 Strömningsbilden i pannan, hastighetsförhållanden

För att inblåsningssystemet skall kunna dimensioneras måste man ha en viss kännedom om strömningsförhållandena och gashastigheterna i pannan. I praktiken är det svårt att erhålla denna information. De hjälpmedel som kan användas är beräkningar av gasflöden, modellförsök samt simuleringsprogram.

Strömningsbilden påverkas kraftigt av cirkulationen och impulsen från enskilda brännare. Eftersom olika brännare kan vara i drift vid olika driftförhållanden kan man förmoda att strömningsbilden ofta är mycket varierande. Det är därför av vikt att modellförsök eller simuleringsberäkningar utförs för de driftfall som normalt förekommer i en panna.

Om sorbenten sprutas in i en zon i pannan där det sker en återströmmning rökgaser till brännarna kan följden bli att kalken dödbränns (sintras) eller att redan bildat kalciumsulfat sönderdelas. Förmodligen ger modellförsök här en tillräcklig information för att zoner med återcirkulation skall kunna undvikas. Datorsimuleringar kan i detta sammanhang dock ge en mer använbar information eftersom man i så fall också erhåller uppgifter om gastemperaturerna.

Figur 4-2 från Himes visar att strömningsförhållandena i en panna kan ge en helt annorlunda blandningsförlopp än en jämn tvärström.



(a) Uniform Flow Field (b) Burner Flow Field

Figur 4-2. Modellförsök som visar strömningsbildens inverkan på en stråle i tvärström (från Himes).

Model test of jet trajectories in uniform flow respectively a typical burner flow field (from Himes).

För att erhålla bästa möjliga avsvavling och ett optimalt utnyttjande av kalken vore det önskvärt att kalkstrålarna både kunde övervakas och styras under drift (se avsnitt 6.5)

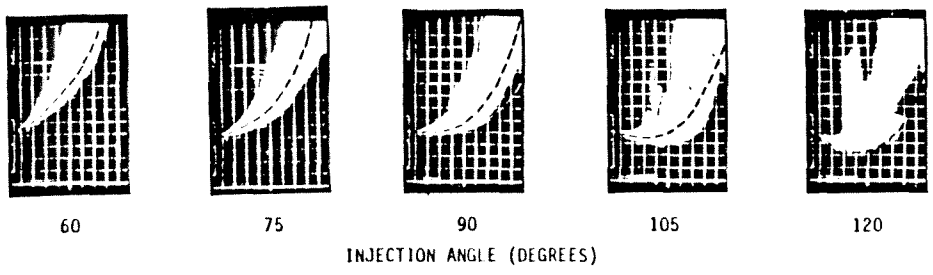
4.3 Inverkan av kalkmängd och temperatur på strålar

Kalkmängden inverkar genom impulsförhållandet J. Av korrellationen $y/d = A\ J^B\ (x/d)^C$ framgår att inträngningsdjupet ökar med ökad kalkmängd i strålen pga att $\rho_{stråle}$ och därmed impulsförhållandet J ändras. Detta möjliggör förmodligen att luftflödet i strålarna inte behöver regleras ned vid dellast. Kalkmängden måste ju ändå regleras efter panneffekten. Genom att strålarnas densitet ändras med kalkmängden kommer inträngningen i pannan att vara nära oberoende av pannans effekt. (Detta påstående stämmer åtminstone med erfarenheter från Malmö Energiverk.)

Temperaturen på bärargasen har troligen mycket liten inverkan på själva blandningsförloppet. Med ett givet drivtryck på bärargasen blir ju impulsen $\rho\ u^2$ oberoende av temperatur och densitet ρ. Övriga temperatureffekter på blandningsförloppet t ex termiska lyftkrafter kan försummas. Däremot har temperaturen på bärargasen en viss men liten inverkan på temperaturen i blandningszonen. Inverkan är liten eftersom det medryckta rökgasflödet oftast är betydligt större än flödet från ett munstycke.

4.4 Geometriska faktorer vid inblåsning (vinklar, antal strålar, tvärsnittsform, strålarnas placering)

Inträngningen påverkas av inblåsningsvinkeln. Figur 4-3 visar modellförsök med inblåsning i olika vinklar mot tvärströmmen. Genom att rikta strålarna något mot tvärströmmen (vinkel > 90°) erhålls en större genomträngning och ett något snabbare blandningsförlopp. Detta kan vara till fördel vid kalkinblåsning eftersom blandningsförloppet därmed till en större del kan tänkas äga rum inom rätt temperaturområde.



Jet Trajectories as a Function of Injection Angle in a Uniform Flow
(Momentum Ratio (J) = 317; Scaled 7.6 cm (3") Jet)

Figur 4-3. Inblåsning av jetstrålar i olika vinklar mot en tvärström (från Himes).

Jet trajectories as function of injection angle in a uniform flow (from Himes).

Antalet strålar är en parameter som bör lämpa sig för en viss optimering, se avsnitt 5.6 nedan.

Tvärsnittsformen på inblåsningsmunstyckena är troligen av underordnad betydelse såvida inblåsningen ej sker längs en långsmal spalt. Om munstyckena däremot utformas så att strålarna får rotation eller en transversellt oscillerande rörelse kan detta ha stor inverkan på blandningsförloppet.

För att välja lämplig placering av inblåsningsmunstyckena i en panna krävs troligen både temperaturmätningar och modellförsök. Mätningar av temperaturen krävs för val av en lämplig höjdnivå för kalkinsprutningen i pannan. Modellförsök krävs för att den dominerande strömningsbilden skall kunna kartläggas. Utan denna kunskap är det troligen svårt att finna en placering av munstyckena som ger ett tillräckligt bra resultat för avsvavlingen.

4.5 Betydelsen av jämn kalkfördelning i strålarna

Klumpar av kalkpulver måste givetvis undvikas. Pulserande dosering, t ex enligt Åbom, kan i detta avseende vara fördelaktigt. Hopklumpning bör dock kunna undvikas genom lämplig förvaring och hantering av pulvret.
I detta samanhang är det av intresse att studera orsaker till hopklumpning av pulver. Fukt är kanske den vanligaste orsaken. Mekanisk kompression och statisk elektricitet kan dock vara andra orsaker till hopklumpning.

Pulvret har en tendens till att följa rörväggar och separeras av tyngdkraften under transporten till munstyckena. Detta kan resultera i en ojämn och mer okontrollerad inblåsning av pulvret i pannan. En motåtgärd är att låta luftströmmen med kalkpulvret rotera i rörledningarna. Detta leder dock till att inträngningen i pannan blir mindre och mer svårkontrollerad. Andra åtgärder är hög gashastighet eller pulserande flöde.

4.6 Inverkan av eventuell rotation i strålarna

Rotation medför en större spridningsvinkel, snabbare omblandning men ett mindre inträngningsdjup i pannan. Kraftig rotation kan tom ge upphov till en återströmning mot munstycket. Rotation vid tvärströmning bör resultera i avlänkning pga Magnuseffekten. (Magnus-effekten innebär att t ex en roterande cylinder i en tvärström beter sig likt en vingprofil så att en kraft vinkelrätt mot strömmen erhålls.) Uppgifter om detta i litteraturen har hittills inte hittats. Detta är kanske en intressant möjlighet till styrning av strålarna i sidled.

Allmänt bör rotation på gasen i transportledningarna undvikas. Visserligen kan en rotation leda till en jämnare fördelning av sorbentpartiklarna i munstyckena. På grund av risken för strängbildning längs rörväggarna kan dock resultatet lika gärna bli det motsatta.

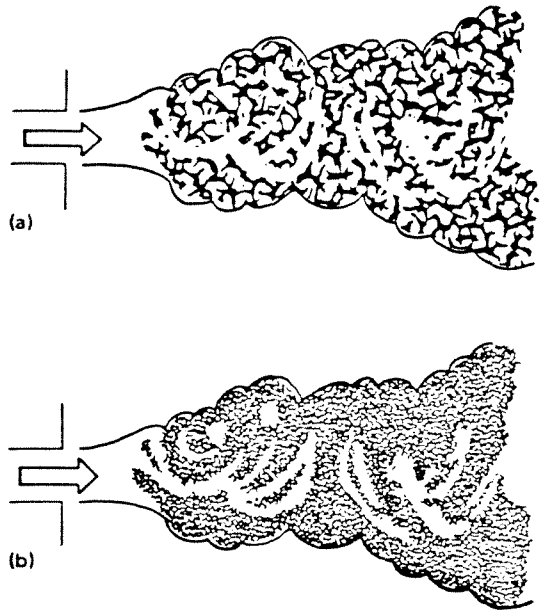
5. DISKUSSION AV STRÖMNINGSTEKNISKA FENOMEN

Här anges några egna funderingar kring fenomen som är av betydelse för inblandning av partiklar i gasflöden.

5.1 Hur sker turbulent blandning?

Exempel på fråga:
Hinner turbulensen med att blanda pulvret så att koncentrationen i pannan blir homogen på en "mikroskopisk" skala?

Figur 5-1 visar två turbulenta jetstrålar vid lågt respektive högt reynoldstal. Vid låga Re-tal blir de minsta virvlarna större än vid högre Re-tal. Om storleken på de minsta virvlarna är betydligt större än medelavståndet mellan kalkpartiklarna blir blandningen förmodligen mikroskopiskt inhomogen. Detta skulle i så fall leda till sämre avsvavling.



Figur 5-1 Turbulenta jetstrålar vid lågt (a) respektive högt reynoldstal (b) (från Tennekes).

Turbulent jets at (a) low and (b) high Reynolds numbers (from Tennekes). A low Reynolds number gives a coarse small-scale structure of the eddies and maybe an inhomogeneus mixing of the sorbent.

Gissningsvis är reynoldstalet i de jetstrålar som nu är av intresse mycket högt. (u=40 m/s, d=0,05 m och $\nu=2*10^{-5}m^2/s$ ger $Re=10^5$) De minsta virvlarna blir i så fall små.

Storleksordningen på de minsta virvlarna kan enligt Tennekes uppskattas med

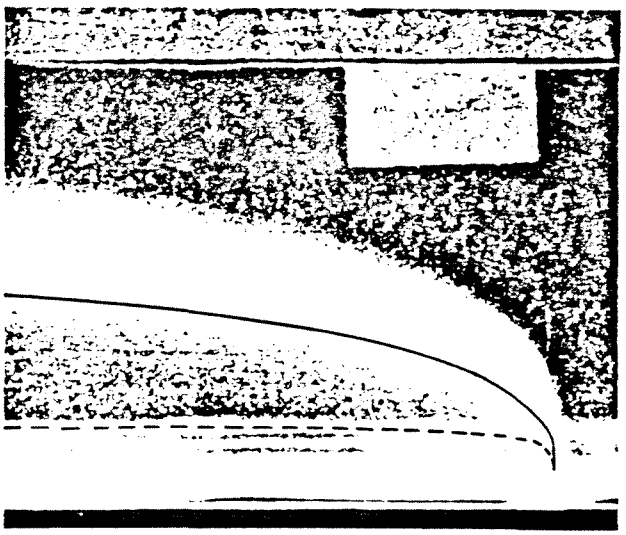
$$d\ Re^{-3/4} \approx 0{,}05*(10^5)^{-3/4} \approx 10^{-5} m$$

Enligt avsnitt 5.3 är detta mindre än medelavståndet mellan kalkpartiklarna även för ett mycket finkornigt kalkpulver. Den turbulenta blandningen blir alltså enligt detta resonemang homogen på en mikroskopisk skala.

5.2 Inverkan av partiklarnas tröghet

Om partiklarna är stora kommer de inte att följa luftströmmen vid inblåsningen i pannan. Kalkpulvret bör vara så finkornigt att skillnaden mellan luften och partiklarnas rörelse är litet.

Figur 5-2 visar ett experiment där partiklarnas tröghet medför en separation av bärargasen och jetstrålen.



Figur 5-2 Jetstråle med partiklar i tvärström. Pga partiklarnas tröghet separeras gasströmmen från partikelsvärmen. Figuren är hämtad från Rudinger. Streckad linje markerar gasstömmens mittlinje. Heldragen linje markerar mittlinjen för partiklarna.

Jet with solid particles in cross stream. Due to inertia the particles are separated from the carrier gas jet centerline. From reference Rudinger.

Partiklarna kommer att följa bärargasstrålen så länge den mekaniska relaxationstiden (se punkt 5.4 nedan) är betydligt kortare än löptiden för partiklar eller gas till blandningszonen.

Att stora partiklar kommer att separeras från bärargasen i en avböjd jetstråle har troligen ingen större betydelse vid kalkinsprutning.

En annan effekt av partiklarnas tröghet är att de får en slumpvis varierande hastighet relativt den omgivande turbulenta gasen. Denna relativhastighet kan förbättra massöverföringen till partiklarna. Dimensionslöst kan detta uttryckas med sambandet

$$Sh = 2 + 0{,}6\ Sc^{1/3}\ Re^{1/2}$$

Här är Sherwoods tal $Sh = \frac{\beta\ d_p}{D}$ med β = massöverföringstal (m/s), partikeldiameter d_p och diffusionskonstanten D (för SO_2 i rökgaser).
Schmidts tal Sc = v/D är av storleksordningen 0,5.
Reynolds tal $Re = \frac{u\ d_p}{\nu}$

Problemet här är att relativhastighetens medelvärde u för partiklarna är okänd. Även för stora partiklar är denna dock begränsad av och mindre än hastighetsfluktuationerna i jetstrålen.

Det är endast för stora partiklar som reynoldstalet kan bli så stort att det bidrar till massöverföringen. För dessa stora kalkpartiklar (kanske 100 µm) blir dock den totala ytan på partiklarna i en given rökgasvolym liten. Detta begränsar massöverföringen betydligt mer än bidraget från relativhastigheten.

5.3 Uppskattning av tidsbehov för gasdiffusion

En enkel beräkning av tidsbehovet för diffusion av t ex SO_2 till partiklarna har utförts. Från fysikaliska data som svavelhalt i kolet, temperatur, Ca/S-förhållande, densitet på CaO-korn mm kan volymandelen kalk i rökgaserna uppskattas till ca $5*10^{-7}$. Om kornstorleken antages till d (meter) blir antalet korn per volymsenhet av storleksordningen:

$$N = 5*10^{-7} / d^3$$

Medelavståndet är av storleksordningen $l = N^{-1/3} = 130\ d$.
Tiden som krävs för diffusion av gaser denna sträcka är av storleksordningen:

$$\tau = l^2 / D = \frac{d^2}{D\ N^{2/3}}$$

(En noggrannare analys resulterar i en dominerande tidskonstant som är 0,95 gånger detta värde.)

Diffusionskonstanten är av storleksordningen $D \approx 10^{-4}$ m^2/s.

Detta ger diffusionstiden $\tau = \frac{d^2}{10^{-4} * (5*10^{-7})^{2/3}} = 1{,}6*10^8 \, d^2$

Med några olika kornstorlekar erhålls följande diffusionstider:

d (µm)	τ (s)
1	$1{,}6*10^{-4}$
10	$1{,}6*10^{-2}$
100	1,6

Slutsatsen av detta är att alltför stora korn leder till stora medelavstånd och en alltför långsam yttre massöverföring.

5.4 Jämförelse mellan tidsstorheter

Avsikten här är att jämföra olika storheter med dimensionen tid som är relevanta för avsvavlingsförloppet. Exempel på tidsstorheter är förutom tidsbehovet för gasdiffusionen 1) partiklarnas uppehållstid, 2) tidskonstant för värmeväxling (termisk relaxationstid), 3) tidskonstant för impulsutbyte (mekanisk relaxationstid), 4) tidsskalan för virvlarna i det turbulenta blandningsförloppet samt 5) tidsbehov för sulfateringsreaktionen i kalkpartiklarna.

1) Uppehållstiden beror på pannstorleken och rökgasernas hastighet. För avsvavlingsprocessen är endast uppehållstiden inom det verksamma temperaturområdet av intresse. Gissningsvis är uppehållstiden vanligen mellan 0,1 och 1 sekund.

2) Tidskonstanten för värmeväxling (den termiska relaxationstiden) anger hur snabbt en partikel kommer i termisk jämvikt med omgivande gas och värmestrålning.

Den termiska relaxationstiden beräknades för en partikel av bränd kalk med diametern 10 µm vid temperaturen 1000 K till ca 0,2 s. (Om hänsyn endast togs till värmeledning erhölls en tidskonstant på 17 s. Den stora skillnaden beror på värmestrålningens dominans vid höga temperaturer.)

Den termiska trögheten är förmodligen inte till något hinder för avsvavlingsreaktionen. Stora partiklar värms givetvis långsammare (ty $\tau_{strålning} \sim d_p$) med de ger ju ändå inte något större bidrag till avsvavlingsreaktionen (såvida de inte sprängs sönder av temperaturvariationen).

3) Tidskonstanten för impulsutbyte mellan partiklar och gas (den mekaniska relaxationstiden) är för sfäriska partiklar vid låga reynoldstal (då Stokes formel $C_D = 24/Re$ gäller)

$$\tau_m = \frac{\rho_p \, d_p^2}{18 \, \mu}$$

För att en kalkpartikel med d_p= 10 µm, ρ_p= 1500 kg/m^3 och gas med viskositeten µ = 4*10^{-5} m^2/s erhålls τ_m= 2*10^{-4}s. Innebörden av detta är att partiklarna följer gasströmmen även vid mycket snabba hastighetsvariationer. Återigen ger större partiklar väsentligt större tidskonstanter.

I detta sammanhang kan det vara av intresse att diskutera en patentansökan (se referens Elofsson) för avsvavling. Grundidén tycks där vara att man med hjälp av kraftiga ljudvågor skall kunna aktivera kalkpartiklarna så att en bättre avsvavlingsgrad erhålls. I patentansökan föreslås emellertid att ljudets frekvens skall ligga mellan 15 och 85 Hz. Eftersom relaxationstiden för praktiskt användbara partiklar är mycket kortare än periodtiden för ljudet kommer partiklarna att följa med i den akustiska vibrationen. Ljudet kommer därför inte att förbättra massöverföringen. Skall man använda ljud för att påverka avsvavlingsförloppet måste frekvensen väljas betydligt högre, exempelvis > 5 kHz.

4) Tidsskalan för turbulensen, dvs ungefär cykeltiden för olika virvlar, sträcker sig över ett stort område beroende på virvlarnas storlek. För blandningsförloppet är sannolikt de mest högfrekventa förloppen av intresse. I turbulent strömning begränsas frekvensen för hastighetsfluktuationerna av fluidens vikositet. Denna högsta frekvens (eller minsta tidskonstant) kan exempelvis jämföras med den mekaniska relaxationstiden för partiklarna.

Storleksordningen på den minsta turbulenta tidskonstanten kan enligt Tennekes uppskattas med

$$\tau_{turbulens} \sim Re^{-1/2} \, l/u$$

där l och u är karakteristisk längd respektive hastighet. Med exempelvis strömning från en jetstråle med l = d = 0,05 m, u = 40 m/s och Re = 10^5 erhålls $\tau_{turbulens} \sim$ 4*10^{-6}s. Även om förutsättningarna för denna beräkning är diskutabla antyder den att turbulensen kan vara av stor betydelse för massöverföringen. Detta motsäger alltså resultaten från avsnitt 5.2 ovan.

5) Tidsbehovet för sulfateringsreaktionen beror av en mängd faktorer som inte kan beaktas i detta projekt. Uppskattningar av reaktionstiderna har genomförts i referenserna Alvfors och Svedberg. Beroende på förutsättningarna uppges reaktionstider på 0,1-0,5 sekunder för kalcinering och 0,5-1,5 sekunder för sulfatering.

Detta kan vara större än partiklarnas uppehållstid i rätt temperaturzon. Om så är fallet kan kanske en lämplig placering

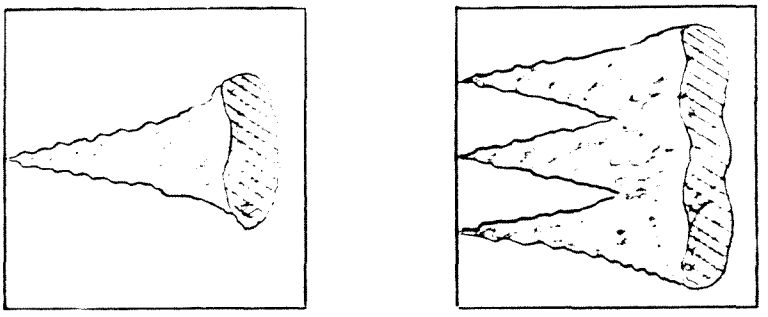
och riktning av munstyckena användas för att förlänga uppehållstiden för partiklarna så mycket att reaktionsutbytet ökar.

5.5 Har turbulensen i strålarna någon betydelse?

Turbulensen i strålarna har troligen en viss liten inverkan på den turbulenta blandningen i pannan (litteraturuppgifter på detta finns men de är vaga). Turbulent strömning i ledningarna är dock sannolikt avgörande för en god fluidisering av kalkpulvret innan detta når munstyckena. Detta säkerställs förmodligen enklast med tillräcklig hastighet på bärargasen.

5.6 Val av lämpligt antal inblåsningsstrålar

Figur 5-3 illustrerar schematiskt det ganska självklara faktum att flera jetstrålar kommer att blandas med en större andel av rökgasflödet än en enda jetstråle.



Figur 5-3 Andel av rökgasflödet som blandas blir större med flera jetstrålar än med en.

The mixed share of the flue gas flow increases with the number of mixing jets.

Fördelen med ett större antal jetstrålar är att en större andel av rökgasflödet kommer i kontakt med kalkpartiklarna. Nackdelarna med många strålar är att installationen av utrustningen blir dyrare samt möjligen att strålarnas inträngning i rökgasflödet försämras något.

Antag att ett givet drivgasflöde med ett givet tryck fördelas på ett valbart antal munstycken. Hastigheten och därmed impulskvoten J blir oberoende av antalet munstycken om den totala tvärsnittsarean i munstyckena är konstant.

Detta medför att inträngningen i en tvärström endast blir svagt beroende av antalet munstycken. För ett stort antal i rad

kommer strömningen att likna strömningen från en spalt i tvärström. En sådan plan jetstråle avböjs troligen något mer en enskilda jetstrålar. (Trots att en omfattande litteratur har letats fram saknas dock verifierande uppgifter om att så är fallet.)

En enskild jetstråle i tvärström orsakar en intensiv omblandning. Enligt Rajaratnam är ombandningen från en stråle i tvärström betydligt större än för en stråle som stömmar ut i stillastående fluid. Orsaken till detta är främst tryckskillnaden mellan "lovart- och läsidan" av den avböjda strålen. Om nu ett stort antal parallella strålar används så kan man förmoda att denna tryckdrivna omblandning försämras något.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att det är svårt att ange ett optimalt antal strålar. Flera strålar är således bättre än en enda, men många strålar skall undvikas. Förmodligen är placeringen av munstyckena och valet av lämplig impuls viktigare än antalet strålar.

5.7 Coanda-effekten

Coanda-effekten innebär att en turbulent jetstråle ger upphov till ett undertryck i omgivningen som kan påverka strålens utbredning. Två närliggande strålar tenderar således att attrahera varandra. Likaså tenderar jetstrålar till att följa väggar runt hörn osv.

Sannolikt ställer Coanda-effekten till en del problem vid inblåsning av kalk i pannor genom att man inte riktigt kan förutsäga var strålarna tar vägen. Figur 5-4 illustrerar hur turbulenta jetstrålar kan påverka varandra pga Coanda-effekten.



Figur 5-4 Coanda-effekten medför att jetstrålar attraherar varandra. (a) en enkel stråle, (b) två strålar, (c) samma flöden som (b) men endast en av strålana är färgad (från Tritton).

(a) Single plume;(b) plumes showing Coanda effect;
(c) same flow as (b) but with dye on only one side. (From Tritton).

6. PRAKTISKA SYNPUNKTER PÅ KALKINBLÅSNING

6.1 Betydelsen av jämn kalkdosering

Det är givetvis av vikt att alla munstyckena erhåller rätt och förmodligen lika stor dosering av kalkpulver. Vilken teknik som finns för detta har av tidsskäl dock ej studerats.

Förmodligen är det viktigt att tillräckligt höga hastigheter upprätthålls i transportledningarna för kalkpulvret till munstyckena. Pulverflödet kan annars bli kraftigt varierande. Höga hastigheter kan dock ge problem med erosion av ledningar och munstycken.

Pulserande inblåsning (se Åbom) eller rotation i transportledningarna kan här vara till fördel.

6.2 Styrning vid varierande panneffekt

Hur skall kalkinsprutningen regleras när panneffekten varieras? Självklart måste matningen av kalkpulver följa panneffekten. Man har dock en viss frihet att variera inblåsningsflödet. Enklast är kanske ett konstant luftflöde. Vid dellast kommer då impulsen på strålarna ändå att minska pga den lägre medeldensiteten i strålarna.

6.3 Risk för bildning av kalkklumpar

Klumpar kan bildas av olika anledningar t ex fukt, mekanisk kompression eller statisk elektricitet. Åtgärder mot detta kanske kan föreslås. Inverkan av klumpbildning på resultatet bör vara jämförbart med en olämplig storleksfördelning på partiklarna.

Finns det kanske en risk att partiklar klumpas samman inne i pannan där de kan bli klibbiga pga hög temperatur? (Risken är troligen liten pga att partikeltätheten är låg.)

6.4 Inblåsning med recirkulerade rökgaser

Det bör finnas flera fördelar med att blåsa in kalkpulvret med rökgaser, t ex att 1) kalkkornen snabbare når lämplig temperatur, 2) att recirkulationen medger lämplig temperatur i en större del av pannan (närmare brännarna) samt 3) att kalkpulvret enklare kan hållas torrt.

Nackdelarna är behovet av recirkulationsfläkt och utrustning för dosering som skall fungera vid hög temperatur.

6.5 Möjligheter att kontrollera blandningsförloppet eller resultatet av avsvavlingen

Det är tydligen mycket svårt att observera kalkstrålarna under drift av en koleldad panna. Det vore intressant att på något sätt förbättra möjligheterna till en sådan direkt observation. Detta skulle möjliggöra att man under drift har möjlighet att justera gasflödena till kalkstrålarna så att en optimal avsvavling kan erhållas.

Mängden flygaska från kolet är troligen av samma storleksordning eller större än kalkmängden. Detta gör det svårt att observera kalkstrålarna. Genom tillsats av någon speciell substans till kalkstrålarna kan de kanske göras synliga. Substansen skulle kunna tillsättas tillfälligt till enskilda strålar. Om substansen emitterar tillräckligt mycket ljus vid ett smalt våglängdsområde kan ett optiskt filter användas för att dämpa det störande ljuset från flammor och flygaska. Förslagsvis tillsätts markeringssubstansen i gasform till enskilda munstycken.

Möjligheten till observation av enskilda kalkstrålar under drift är endast meningsfull om varje stråle också kan styras individuellt. Detta bör vara enkelt att genomföra, åtminstone för gasflödena. Däremot är det kanske inte så stor idé med en individuell kalkdosering.

Möjligheterna till mätning med en rörlig sond bör också undersökas. Sonden skulle kunna registrera SO_x-halten eller tillsats av en inert spårgas som helium.

7. HJÄLPMEDEL FÖR DIMENSIONERING AV INBLÅSNINGSSYSTEMET

De hjälpmedel som finns tillgängliga för dimensionering av inblåsningssystemet är 1) överslagsberäkningar, 2) modellförsök, 3) simuleringsprogram samt 4) direktobservation och mätningar på befintliga anläggningar.

För överslagsberäkningar t ex med formeln ovan för inträngning i tvärström, saknas oftast information om aktuella gashastigheter. Beräkningarna kan därför troligen endast utnyttjas för dimensionering av de maximala gasflödena. För optimering av avsvavlingen behövs troligen bättre metoder.

Modellförsök med en kall strömningsmodell bör ge en god bild av de aktuella strömningsförhållandena. Möjligheterna att utprova lämpliga placeringar av kalkstrålarna bör vara goda. Samtidigt bör arbetet med modellförsök bidra till att en god förståelse över de strömningstekniska fenomenen i en anläggning uppnås.

Det finns dock flera nackdelar med modellförsök. Modellen ger ju t ex ingen information om temperaturen i blandningszonen är lämplig. I en modell kan man inte heller ta hänsyn till rökgasernas termiska expansion eller den termiska konvektionen i stora pannor. Dessutom är det svårt att täcka in tillräckligt

många olika driftfall, att få rätt gascirkulation från brännare osv. Slutligen kan man förmoda att modellförsök är dyrbara.

Användning av tillräckligt bra simuleringsprogram skulle kunna vara ett utomordentligt hjälpmedel för dimensionering av kalkinjektionssystem. Frågan är dock om de i dag tillgängliga programmen klarar av dessa mycket komplexa strömningsproblem. Gissningsvis är det en hel del arbete kvar innan simuleringsprogrammen är tillräckligt tillförlitliga (detta bör utredas närmare).

Direkt observation, mätning och erfarenhetsåterföring är troligen både de bästa och enklaste hjälpmedlen. Möjligheterna till direktobservation vid koleldning är dock begränsade.

8. SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

För en strömningstekniskt riktig dimensionering av ett kalkinblåsningssystem till en panna är det nödvändigt att inhämta tillräcklig information antingen genom mätningar på befintliga pannor kompletterat med modellförsök för olika inblåsningsgeometrier. Alternativt kan kanske datormodeller användas för att simulera strömningsförloppen vid inblåsning av en sorbent. Behovet av mätningar och modellförsök skulle därmed kunna minskas eller tom elimineras.

Av denna anledning föreslås som ett lämpligt fortsättningsprojekt efter denna studie också en studie över möjligheterna att utnyttja datormodeller för att simulera blandningsförlopp i förbränningsanläggningar.

Det vore intressant att närmare studera vilka optiska eller andra metoder som skulle kunna användas för observation av blandnings och avsvavlingsförloppen under drift av en panna. En sådan observationsmetod skulle också kunna utnyttjas i samband med prov av kalkstrålar som styrs med varierande impuls eller cirkulation.

Uppskattningar av olika tidskonstanter, t ex för gasdiffusion till partiklarna, visar entydigt att kalkpartiklarna måste vara tillräckligt små (av storleksordningen 10 µm).

9. REFERENSER

Alfors — P. Alfors, G. Svedberg
Avsvavling genom kalkinblåsningsförsök i falltubsugn
Stiftelsen för värmeteknisk forskning
Bränsleteknik 212

Andreopoulos — J. Andreopoulos, W. Rodi
Experimental investigation of jets in a crossflow
J. Fluid Mech.(1984), vol.138 pp.93-127

Bruyatskii — E.V. Bruyatskii, E.A. Gaev
Deformation of a turbulent jet in a cross stream
Sov.Appl.Mech. v12 n6 jan.1976 pp620-625

Cetegen — B.M. Cetegen, T.R. Johnson, D. Moyeda, R. Payne
Influence of sorbent injection aerodynamics on SO_2 control
Paper ID 4A
Joint symposium on dry SO_2 and simultaneus NO_x control. June 1986 Raleigh North Carolina USA

Elofsson — R. Elofsson
Sätt att vid eldning av fasta bränslen i en med rörlig rost, företrädelsevis Wanderrost, försedd panna minska utsläppen av svavel- och kväveoxider.
Patentansökan nr 8401788-8

Himes — R.M. Himes, L.J. Muzio, G.R. Offen
Analysis of the sorbent injection process for in-furnace SO_2 control
Paper ID 4C
Joint symposium on dry SO_2 and simultaneus NO_x control. June 1986 Raleigh North Carolina USA

Holdeman — J.D. Holdeman, R.E. Walker
Mixing of a Row of Jets with a Confined Crossflow
AIAA Journal Vol. 15, No. 2, Feb. 1977

Koucky — R.W. Koucky, D.K. Anderson, P.R. Thibeault, J.L. Marion, C.C. Masser
Sorbent injector design for sulphur oxides control from tangentially fired furnaces by dry sorbent injection
Paper 4B

Joint symposium on dry SO_2 and simultaneus NO_x control. June 1986 Raleigh North Carolina USA

Rajaratnam — N. Rajaratnam
Turbulent Jets
(Developments in water science ; 5)
Elsevier Scientific Publishing Company
1976

Rudinger — G. Rudinger
Fundamentals of Gas-particle Flow
(Handboock of powder technology ; 2)
Elsevier Scientific Publishing Company
1980

Salzman — R.N. Salzman, S.H. Schwartz
Experimental Study of a Solid-Gas Jet Issuing Into a Transverse Stream
J. Fluids Eng., Trans. ASME, Vol.100 (1978) pp. 333-339

Subramanya — K. Subramanya, P.D. Porey
Velocity Distribution in Turbulent Cross Jets
Indian Journal of Thechnology
Vol. 20, November 1982, pp. 427-433

Svedberg — G. Svedberg, D. Simonsson
Reduktion av svavelemission genom kalkinjektion i förbränningsanläggningens eldstad - rektionskinetisk studie.
Stiftelsen för värmeteknisk förskning, Bränsleteknik 166.

Tennekes — H. Tennekes, J.L. Lumley
A first course in turbulence
MIT Press 1972

Tritton — D.J. Tritton
Physical Fluid Dynamics
Van Nostrand Reinhold
1977

Yuu — S. Yuu, N. Yasukouchi, Y. Hirosawa, T. Jotaki
Particle Turbulent Diffusion in a Dust Laden Jet
AIChE Journal Vol.24 No.3 May 1978 pp509-519

Åbom — J. Åbom
Insprutningsmekanism för torravsvavling
Institutionen för maskinsystem CTH 1987

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk Forskning och utveckling. Stiftelsens forskningsprogram är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem. Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Värmeverksföreningen
- Övrig industri

Värmeforsk samarbetar med Närings- och teknikutvecklingsverket (NUTEK).

STIFTELSEN FÖR VÄRMETEKNISK FORSKNING

Box 1765 · 111 87 Stockholm
Tek: 08-7900600 · Fax 08-796 00 37