



STIFTELSEN FÖR VÄRMETEKNISK FORSKNING

NOx-reduktion vid naturgaseldning genom vatteninsprutning

Göran Fermbäck

Ulrika Jantze

Mikael Jedeur-Palmgren

Kjell Wanselius

NO_x-REDUKTION VID NATURGASELDNING
GENOM VATTENINSPRUTNING

Stockholm 1990-06-05
THEORELL + VBB ENERGIKONSULTER AB
Göran Fermbäck
Ulrika Jantze
Mikael Jedeur-Palmgren

KW ENERGIPRODUKTER AB
Kjell Wanselius

SAMMANFATTNING

I föreliggande studie har möjligheterna undersökts att utnyttja vatteninsprutning i NO_x -reducerande syfte vid förbränning av naturgas.

En teoretisk modell för NO-bildningens termiska beroende redovisas. Vid kylning av flamman genom vatteninsprutning, visar teoretiska beräkningar på att NO-bildningen minskar markant. En litteraturstudie av utförda försök med vatteninsprutning i gasflammar stödjer dessa teorier.

I tre olika försök med gaspannor gav en insprutning av 5 vikts% vatten av rökgasflödet, en 70%-ig reduktion av NO-bildningen. Man har också funnit att denna reduktion ökar med ökande vatteninsprutning upp till den punkt där instabilitet uppstår i flamman vilket inträffar vid 20-25 vikts% vatten. I två av dessa försök har även mängden oförbränt undersökts. Några mätvärden från dessa undersökningar ges dock inte.

I studien refereras också till ett försök med vatteninsprutning i oljeflamma. Anledningen till att detta försök tas upp är att man här har funnit ett samband mellan NO-bildningen och läget för vatteninsprutningen i flamman. Detta innebär att vatteninsprutningens NO_x -reducerande effekt i gasflammar borde gå att optimera på samma sätt. En fortsatt studie föreslås i form av praktiska försök där risken för ofullständig förbränning kartläggs. Detta skulle då ske dels med en kombibrännare och dels i en andra försöksomgång med ett avståndsreglerat insprutningsmunstycke för vatten.

SUMMARY

The possibility of using water injection for NO_x -reduction in natural gas combustion has been studied.

A theoretical model for the thermal dependency for NO-formation is shown. With cooling of the flame by water injection, calculations show a significant NO-reduction.

A literature survey covering reports from tests made with water injection has been performed. All found reports support the theory that water injection is a useful NO-reducing method. Three different tests on gasfired boilers showed a 70% reduction of NO-formation when 5% wt water, calculated on the total flue gas flow, was injected. These studies also found that the NO-reduction increased with the amount of water up to 20-25% wt, where instability of the flame occurred. Two of these tests investigated the amount of unburnt but no results from these measurements has been presented.

A reference is also made to a test with water injection in an oil flame. In this test the authors have found a relation between the amount of NO-reduction and the position of the water injection nozzle. This means that it should be possible to optimize the NO-reduction in gas flames not only by the amount of water but also by the geometrical outfit of the burner and water injection nozzle.

An experimental test is proposed in order to evaluate the risk of incomplete combustion as a result of water injection.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sid
1. INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Målsättning	1
2. BILDNING AV KVÄVEOXIDER	3
2.1 Definition av NO _x	3
2.2 NO-bildning	3
2.2.1 Zeldovich mekanism	4
2.2.2 Prompt NO	9
2.3 Bildning av NO ₂	10
3. LITTERATURSTUDIE AVSEENDE VATTENINSPRUTNING	11
3.1 Försök med vatteninsprutning i oljeflammor	11
3.2 Försök utförda i en 130 kW's panna	13
3.3 Resultat från en gasturbin	16
3.4 Försök utförda i en 250 MW's panna	17
3.5 Försök i en testanläggning 0.6 MW	18
3.6 Studie utförd vid KTH ca 20 kW	21
3.7 Slutsatser	23
4. EKONOMI	25
5. SLUTSATSER OCH FÖRSLAG TILL MÄTPROGRAM	31
5.1 Kombibrännare	32
5.2 Insprutning med avståndsreglering	33
5.3 Val av försöksanläggning	36
6. PRELIMINÄRT MÄTPROGRAM	37
6.1 Mätningarnas utförande	37
6.1.1 Försök som utföres med kombinationsbrännare	37
6.1.2 Försök som utföres med insprutning motsatt flamriktning	40
6.2 Analyser	41
6.3 Kostnader och tidsuppskattning	42
7. REFERENSER	44

Bilaga 1 : Överslagsberäkning av värmeöverföring

1. INLEDNING

1.1 Bakgrund

NO_x-emissioner har blivit ett alltmer omdiskuterat problem i dagens energidebatt, bland annat i samband med införandet av naturgas i Sverige. Naturgas är ett rent bränsle så gott som fritt från svavelföreningar. Dessutom är naturgas ett bränsle som är lätt att bränna med goda förbränningsdata, vilket innebär att kolmonoxid och kolväteföreningar i rökgasen minimeras. Kvar står NO_x-emissionerna. En möjlig metod för att minska NO_x-emissionerna vid naturgaseldning är att spruta in vatten i flammen. Vattnet påverkar förbränningsreaktionerna men endast i ringa omfattning. Det huvudsakliga syftet med vatteninsprutningen är att sänka temperaturen i flammen och att undvika de lokala temperaturtoppar som ger upphov till omfattande NO_x-bildning. En fördel med vatteninsprutning jämfört med flera andra NO_x-reducerande åtgärder är att det kan vara ekonomiskt rimligt att införa denna metod även vid mindre förbränningsanläggningar.

En nackdel kan dock vara att förbränningen påverkas med en förhöjd halt av kolmonoxid och kolväten i rökgasen.

1.2 Målsättning

Målsättningen med denna studie är att undersöka möjligheterna att minska NO_x-emissionerna vid naturgaseldning genom att införa vatteninsprutning. Ett första steg är att utföra en litteraturstudie och med ledning av de resultat som publicerats från tidigare utförda försök, dra slutsatser beträffande huruvida vatteninsprutning är en tillräckligt

effektiv metod eller ej. Vidare skall olika metoder för insprutning av vatten utvärderas.

Med hjälp av de teoretiska beskrivningarna av NO_x -bildningen som framkommit ur litteraturstudien redovisas en teoretisk beräkning av vatteninsprutningens NO -reducerande effekt.

Dessutom skall lämpliga insprutningsmetoder beskrivas som i projektets fas 2 kan användas i praktiska försök. Ett förslag till mätprogram skall anges och en uppskattning av tidsåtgång och kostnader presenteras.

2. BILDNING AV KVÄVEOXIDER

2.1 Definition av NO_x

Vid emission av kväveoxider från förbränningsanläggningar använder man ofta begreppet NO_x . NO_x står för summan av kväveoxid NO och kvävedioxid NO_2 . Eftersom kväveoxiden omvandlas till kvävedioxid i atmosfären har man valt att uttrycka NO_x -mängden som summan av NO och NO_2 omräknat till NO_2 . Detta innebär att mängden NO räknas om till ekvivalent mängd NO_2 , vilken adderas till den verkliga NO_2 -mängden i rökgasen.

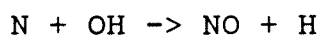
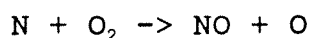
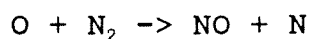
2.2 Mekanismer för bildning av NO

Kvävet som ger upphov till NO_x -emissionerna kommer antingen från kvävet i förbränningsluften, eller från organiska kväveföreningar i bränslet. Vid naturgaseldning är källan uteslutande förbränningsluft, eftersom inga organiska kväveföreningar förekommer i bränslet.

Bildning av NO_x från kväve i förbränningsluften kan ske dels via de s k Zeldovich reaktionsmekanismerna och dels via mekanismerna för s k prompt NO . Båda dessa reaktionsvägar anses vara relativt välbelagda och beskrivs under punkt 2.2.1 och 2.2.2. Bildning av NO enligt Zeldovich mekanism brukar även kallas termiskt NO_x , eftersom temperaturen har en stark inverkan på förloppet. Denna reaktionsväg ger endast vid höga temperaturer upphov till påtagliga NO_x -halter.

2.2.1 Zeldovich mekanism för NO-bildning

Bildning av NO enligt Zeldovich sker genom följande reaktioner:



Av dessa reaktioner är den första det hastighetsbestämmande steget. Det råder olika meningar om hastighetskonstantens storlek. Spridningen mellan olika referenser är minst en faktor två. Som en approximation kan för hastighetskonstanten anges

$$K(T) = 5 \cdot 10^{13} \exp^{-(37\,890/T)} \text{ ml mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

där T är temperaturen i grader Kelvin (8).

Av ovanstående framgår entydigt att bildningen av NO är starkt temperaturberoende och även beroende av uppehållstiden vid den höga temperaturen. Vidare har den atomära syrekoncentrationen en stor inverkan på NO-bildningen medan bränsletypen inte har någon inverkan alls. Enligt teoretiska beräkningar som redovisas i ref 7, blir molandelen NO i rökgasen

$$X_{\text{NO}} = \frac{K(T)}{R \cdot T} \cdot X_{\text{N}_2} \cdot X_{\text{O}_2} \cdot P \cdot t$$

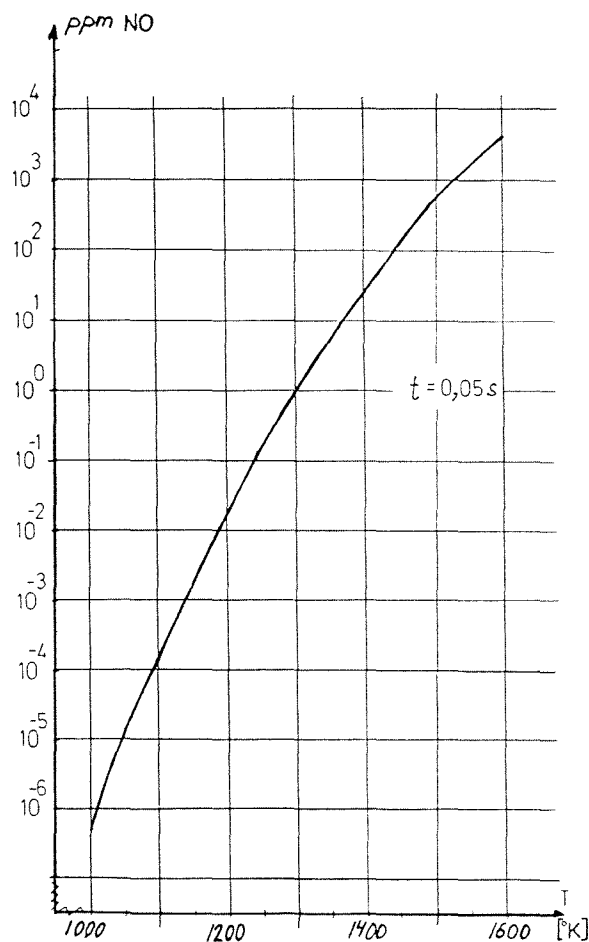
där hastighetskonstanten K(T) anges något annorlunda än i ref 8. och sättes till:

$$K(T) = 8,96 \cdot 10^{24} \cdot T^{-2,564} \cdot \exp[-6522 \cdot T^{-1}] \text{ cm}^3/\text{mol/s}$$

[T] = °K, [X] = %

[P] = Pa, [t] = s

I figur 2.1 visas den teoretiska NO-halten i rökgasen enligt den i ref 7 angivna beräkningsmetoden.



Figur 2.1 Teoretisk beräknad NO-bildning som funktion av flamtemperaturen.

För att bestämma temperaturen anger ref 5 en enkel värmebalans med vilken flamtemperaturen, θ_f , kan beräknas. Med den ingående luftens temperatur, θ_i , gasens värmevärde H och rökgasernas värmekapacitet C_p blir temperaturen.

$$\theta_f = \theta_i + \frac{H}{\sum m \cdot C_p} \quad [C^\circ]$$

$$[C_p] = \text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}) \quad [m] = \text{kg}$$

$$[H] = \text{J}/\text{kg} \quad [\theta_f] = ^\circ\text{C}$$

$$[\theta_i] = ^\circ\text{C}$$

Användes vatteninsprutning sänks temperaturen till

$$\theta_f = \frac{H - n \cdot L}{\sum m \cdot C_p} + \theta_i$$

där n är mängden vatten i förhållande till mängden bränsle och L är ångbildningsvärmets.

Dessa balanser ger dock bara den adiabatiska medeltemperaturen varför både högre och lägre temperaturer förekommer i lågan.

Vid förbränning av dansk naturgas med $\lambda = 2$ och en förbränningslufttemperatur av 20°C skulle flamtemperaturen bli $1\,565^\circ\text{K}$. Enligt diagram 2.1 skulle detta innebära 2.500 ppm i rökgasen.

Med 2 kg vatten per kg gas blir flamtemperaturen istället $1\,298^\circ\text{K}$. NO-halten i rökgasen skulle därmed sänkas till 1 ppm.

Även i referens 6 har man gjort en teoretisk beräkning av NO-bildningen.

Enligt dessa beräkningar medför en ökning av temperaturen från 1700°K till 1900°K en ökning av NO_x -emissionen med ca 50 gånger. En minskning av temperaturen till 1650°K medför å andra sidan att reaktionshastigheten för bildning av NO från luftkväve blir i stort sett försumbar dvs mindre än $1,5 \text{ mg}/\text{m}^3\text{s}$.

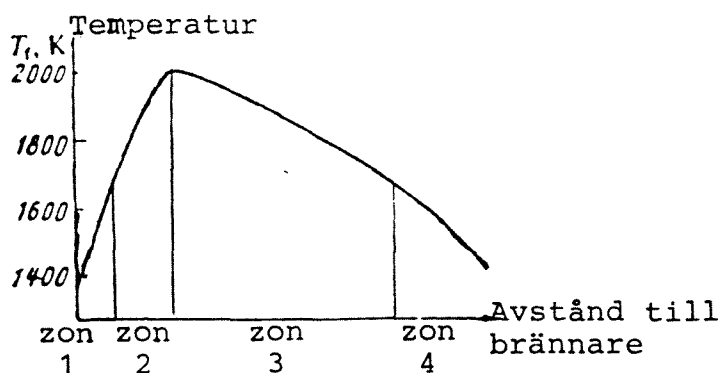
Den beräkningsmetod som används av författarna är något annorlunda än den av oss redovisade. Bägge visar dock på ett starkt samband mellan NO-bildningen och förbränningstemperaturen.

Det bör dock poängteras att bägge dessa beräkningar bara tar hänsyn till Zeldovich reaktion, varför de faktiska emissionerna kommer att vara annorlunda. Vad beräkningarna visar är dock att vatteninsprutningen genom sänkningen av förbränningstemperaturen bör kunna ge en kraftig reduktion av NO-bildningen.

Med tanke på NO_x -bildningens temperaturberoende har Vasliev et al i sin artikel, (6), funnit det vara relevant att dela upp flammen i följande temperaturzoner.

zon 1	:	min	-	1650 °K
zon 2	:	1650 °K	-	max
zon 3	:	max	-	1650 °K
zon 4	:	1650 °K	-	min

Denna zonindelning illustreras i figur 2.2.



Figur 2.2. Flammans temperatur i axiell led (6)

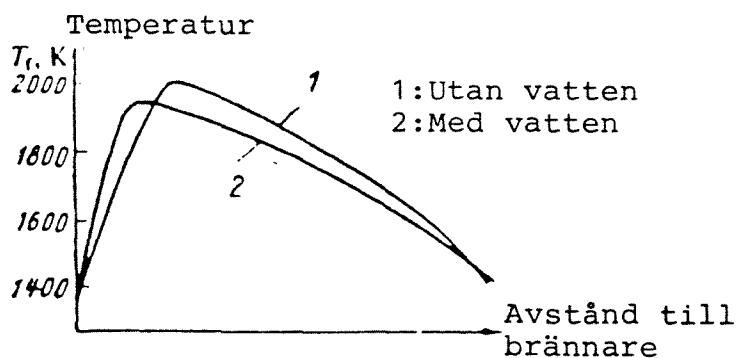
I zon 1 sönderdelas kolväten (ofullständig förbränning), och vid förekomst av organiskt bundet kväve bildas bränsle- NO_x och prompt NO_x .

I zon 2 sker en aktiv slutförbränning av produkterna från den ofullständiga förbränningen i zon 1. NO_x -bildning från luftens kväve äger rum i denna zon och hastigheten för NO_x -bildningen når sitt maximum.

I zon 3 är slutförbränningen fullständig. Fortsatt bildning av termisk NO_x sker och koncentrationen av NO_x från luftkväve når sitt maximala värde.

Zon 4 är en inaktiv zon med temperaturer under 1650 °K med försumbar förbränning och NO_x -bildning.

Genom tillsats av tillräcklig mängd vatten sker kinetisk aktivering av förbränningen, vilket ökar förbränningshastigheten och därmed temperaturen i den första zonen. I zon 2, där termisk NO_x -bildning från luftens kväve äger rum, kommer dock den maximala temperaturen att sjunka genom den kylande effekten som erhålls när det tillsatta vattnet upphettas och förångas. Nedanstående figur ger ett exempel på hur temperaturkurvan kan förskjutas vid vatteninsprutning.



Figur 2.3. Vatteninsprutningens påverkan på flamtemperaturen (6)

2.2.2 Prompt NO

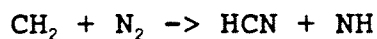
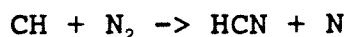
Vid mätningar har man funnit att bildningen av NO sker snabbare än det förlopp som Zeldovich mekanism beskriver.

Försök har utförts genom mätning av den axiella NO-koncentrationen i en flamma. Vid extrapolering till brännarhuvudet (längden = 0) erhålles en positiv skärning med y-axeln (NO-koncentration). Skärningspunktens läge beror av bränsletyp, temperatur, tryck och stökiometri på ett sätt som inte kan beskrivas med Zeldovich mekanism. (Den snabba genereringen av NO i reaktionszonen kallas prompt NO.)

Nedan beskrivs några av de kännetecken för NO-bildning som inte kan förklaras med Zeldovich mekanism, utan talar för att ytterligare en bildningsmekanism inverkar på förloppet.

- * Enligt Zeldovich reaktioner är NO-bildningen oberoende av bränsletyp. Prompt NO bildas emellertid i kolväteflammar, men inte i H₂- och CO-flammar.
- * Bildning av prompt NO är endast svagt temperaturoberoende i motsats till det starka temperaturoberoendet som gäller enligt Zeldovich mekanism.
- * Tryckberoendet för bildning av prompt NO överensstämmer inte med Zeldovich mekanism.
- * Understökiometrisk förbränning ger mer prompt NO än stökiometrisk och överstökiometrisk förbränning vid samma flamtemperatur.

Prompt NO bildas vid naturgasförbränning. Bildningen sker här genom en inverkan av kolväteradikaler på kvävemolekyler, varvid kväveföreningar som CN, HCN eller C_2N_2 bildas. Exempel på möjliga reaktionssteg är följande:



Dessa kväveföreningar brytes sedan ner för att slutligen bilda N_2 eller NO.

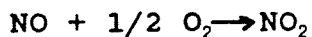
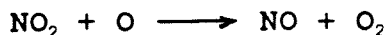
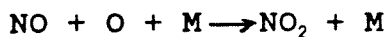
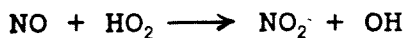
Eftersom bildningen av prompt NO är svagt temperaturberoende, kan även denna bildning hämmas av vatteninsprutning.

2.3 Bildning av NO_2

Vid själva förbränningen utgörs ca 95% av totalmängden kväveoxider (NO_x) av NO.

Bildningen av NO_2 är alltså försumbar jämfört med den totala NO_x -emissionens storlek. Vill man påverka NO_x -emissionen är det således framförallt en inverkan på NO-bildningen som är av betydelse.

Hur NO_2 bildas ur NO beskrivs av följande reaktioner:



där M står för en främmande molekyl som genom kollision överför energi men i övrigt ej deltar i reaktionen.

3. LITTERATURSTUDIE AVSEENDE VATTENINSPRUTNING

En litteraturstudie har genomförts i syfte att finna utförda forskningsprojekt och utredningar som behandlar vatteninsprutning. Ett flertal sökord och kombinationer av dessa har använts vid sökningarna som utförts i databasen "Energy". De väsentligaste sökorden har varit: Gas, vatteninsprutning, kväveoxid och NO_x .

Följande litteratursammanfattning innehåller samtliga de artiklar vi funnit som behandlar vatteninsprutning vid naturgaseldning. Att resultaten varit goda i samtliga fall beror alltså inte på att vi speciellt valt ut dessa, utan på att samtliga publicerade försök uppvisat gott resultat då det gäller NO_x -reduktion. Inte i någon av dessa rapporter har man dock gjort mätningar av mängden oförbränt dvs kolmonoxid och kolväten.

Med tanke på de positiva erfarenheterna som redovisas i referens 1-6 är det anmärkningsvärt att så få referenser, och ingen av nyare årgång, har kunnat finnas.

3.1 Försök med vatteninsprutning i oljeflamor, referens 6

I denna artikel nämns att tillsats av vatten ger ett mycket gott resultat för att på termisk väg hämma NO_x -bildningen. Detta goda resultat uppnås förutom i zon 1 även i zon 3. Vidare nämns att tillsats av 5-8% vatten (räknat per kg tillförd olja) i den del av flammen där NO_x -bildningen är maximal och temperaturen är uppe i 1950 °K, minskar temperaturen med 100°, varvid den beräknade NO -bildningen enligt Zeldovich minskar med en tiopotens.

Effekten av vatteninsprutning har även undersökts för andra emissioner som bl a benso(a)pyren. I följande tabell ges en översikt av resultat från försök utförda vid oljeeldning.

Zon där ånga tillsätts	Halt benzo(a)pyren (mg/100 m ³) i rökgasen	
	utan ånginsprutning	med ånginsprutning
2	20-30	10-12
1	20-30	6-8
2, 3	40-50	3-8

I detta fall har vatteninsprutningen således även bidragit till en minskning av benso(a)pyren och kan då knappast ha medfört en ökning av totala mängden oförbränt.

Några liknande försök vid gaseldning har inte stått att finna.

3.2 Försök utförda i en 130 kW's panna, referens 1

Denna rapport beskriver studium av vatteninsprutning vid naturgaseldning i en 130 kW's panna. Studien visar att den viktigaste variabeln för reduktion av NO_x -emissionen är mängden vatten som tillsätts. Vid tillsats av 4,5 vikts-% vatten (räknat per kg rökgas) erhålles en 70%-ig reduktion av NO_x . I studien sägs att man även undersökt hur emissionerna av CO , CO_2 , H_2 , N_2 och metan påverkas av vatteninsprutningen. Några resultat av dessa mätningar redovisas dock inte.

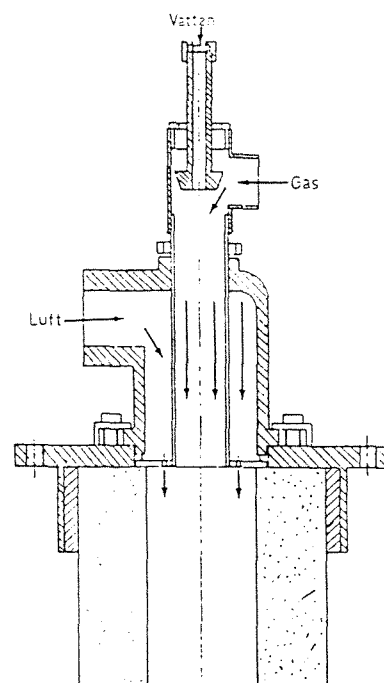
Vid försöken används en "Tunnel mixing burner" med kapaciteten 140 kW. Principen för brännaren visas i figur 3.1.

Vatteninsprutningen utfördes genom ett spraymunstycke av industriell typ, centralt placerat (axiellt) i brännaren.

Vid försöken användes spraymunstycken med olika sprayvinklar 40° , 60° och 80° .

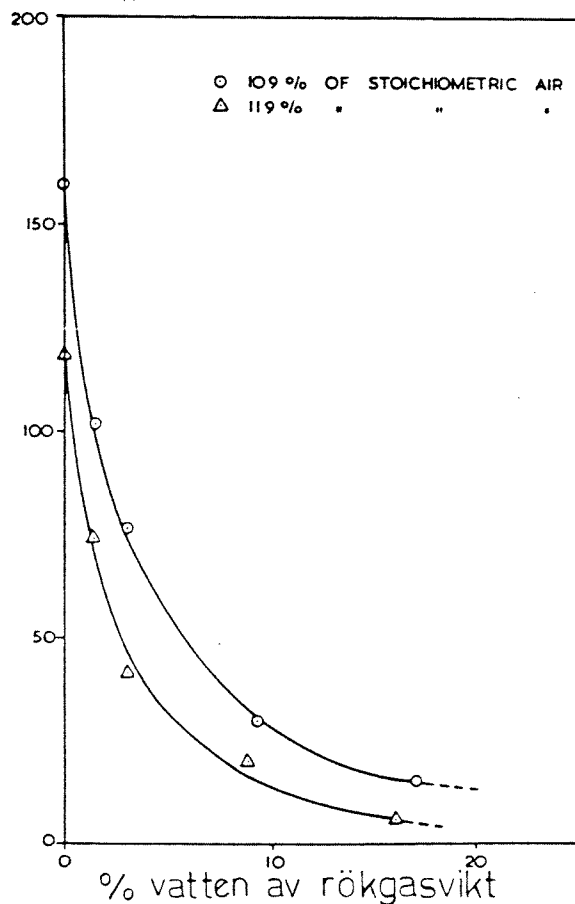
Dessutom varierades spraymunstyckets läge axiellt ca 2 cm. Vidare provades olika munstycken med olika utföranden och prestanda.

Figurerna 3.2 och 3.3 visar hur NO_x -emissionen påverkas av vatteninsprutning vid olika luftöverskott (munstyckets sprayvinkel var i dessa fall 40°).



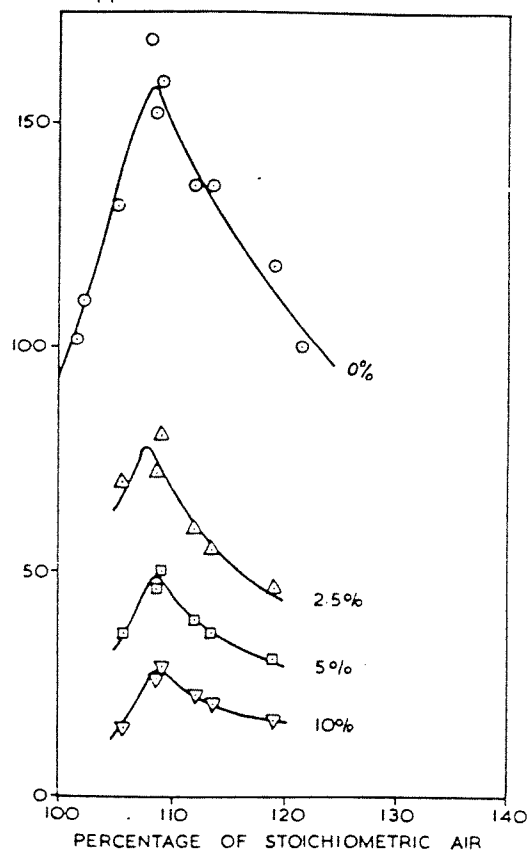
Figur 3.1 Brännare använd under försöket (1)

FLUE GAS NITROGEN
OXIDES CONCENTRATION
DRY BASIS (ppmv)



Figur 3.2 NO_x -emissioner
som funktion av
mängden insprutat
vatten för två
olika luftöver-
skott (1)

FLUE GAS NITROGEN
OXIDES CONCENTRATION
DRY BASIS (ppmv)



Figur 3.3 NO_x -emissionen
som funktion av
luftöverskott
vid några olika
mängder in-
sprutat vatten (1).
(i % av rökgas-
vikten).

Till en del beror sänkningen av NO_x -koncentrationen på en ökad mängd rökgas, men även i absoluta siffror sjunker mängden NO_x med ökat luftöverskott. För att diagrammen skall kunna jämföras med uppgifter ur andra rapporter har den procentuella vattentillförseln räknats om från vikts-% räknat per kg rökgas, till kg H_2O /kg bränsle. Följande korresponderande värden gäller.

O_2 , % av stökio- metrisk luftmängd	$\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg rökgas}} \cdot 100$	$\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg bränsle}}$
119	2,5	0,5
"	5	1,1
"	10	2,3
"	15	3,6
109	2,5	0,5
"	5	1,0
"	10	2,2
"	15	3,4

Värdena i ovanstående tabell är relativt lika för de båda luftfaktorerna. Vid en jämförelse med andra rapporter kan därmed en omräkning ungefärlig gälla för båda kurvorna i figur 3.2.

Instabilitet i flammen erhöles vid vattenmängder på ca 20-25 vikts-% (räknat per kg rökgas). Ur figur 3.3 ovan framgår att så höga vattenmängder inte erfordras för att erhålla en markant NO_x -reduktion.

Några försök utfördes med ett så lågt vattenflöde att atomiseringen av vattendropparna försämrades. Den procentuella reduktionen av NO_x försämrades i dessa fall upp till en faktor tre.

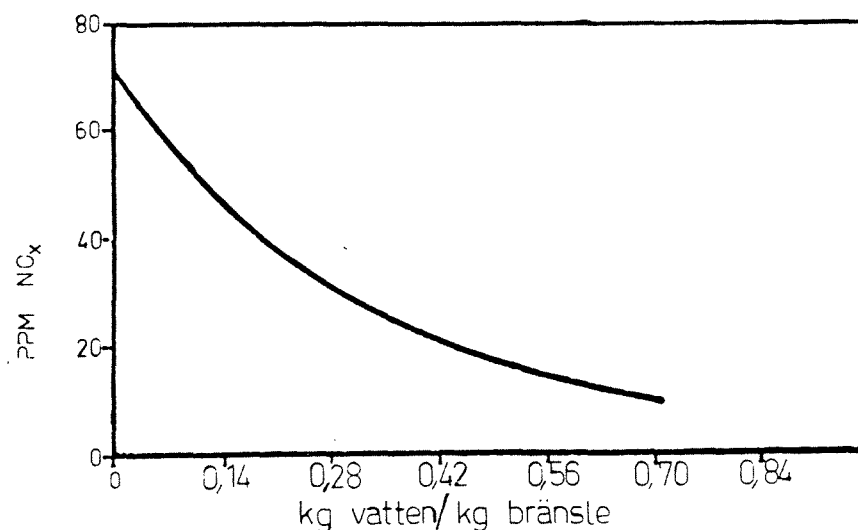
Försök med olika sprayvinklar visade att en större sprayvinkel endast gav en ringa förbättring av NO_x -reduktionen.

Ändring av munstyckets utlopp i axiell led, upp till ca 2 cm, hade en försumbar effekt på resultatet.

I rapporten anges att den kemiska förbränningsverkningsgraden inte ändrades pga vatteninsprutningen. Detta i sin tur måste innebära att ingen drastisk ökning av CO-halten förekom.

3.3 Resultat från en gasturbin, referens 4

Ref. 4 behandlar mycket kortfattat vatteninsprutning. Här anges att metoderna för vatteninsprutning kan variera t ex genom tillsats av vatten till bränslet, till förbränningsluften eller direkt i förbränningskammaren. Vidare nämns att oönskade effekter kan erhållas i form av minskad verkningsgrad (om vattenången inte kondenseras) samt korrosion. I figuren nedan visas hur NO_x -reduktionen beror av mängd tillsatt vatten vid drift av en gasturbin.

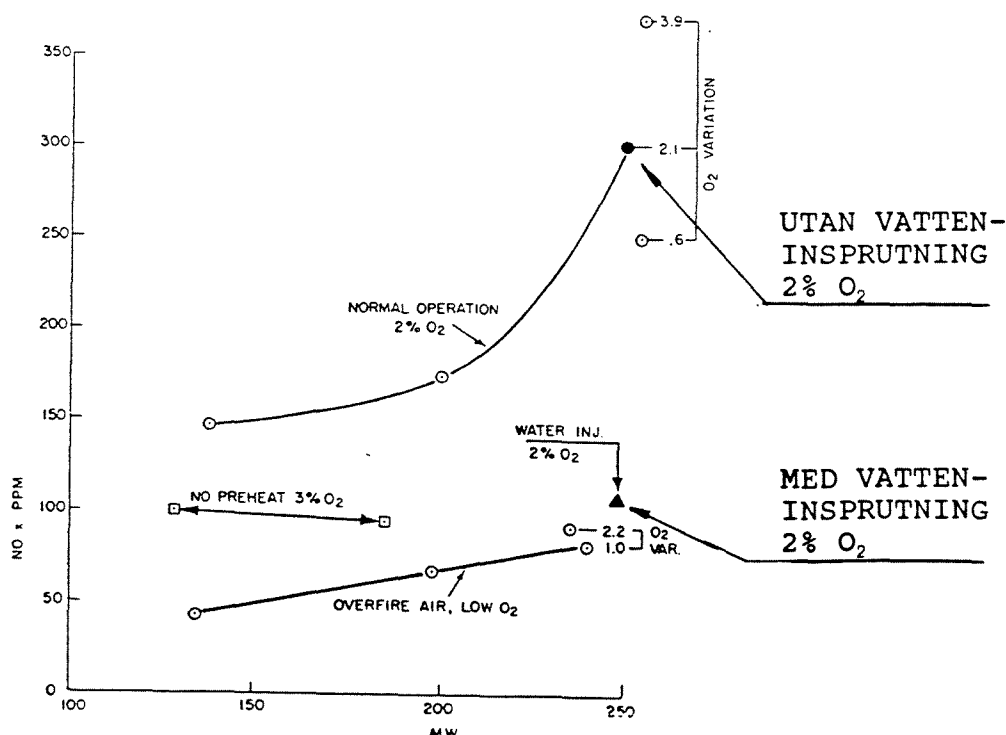


Figur 3.4. NO_x -emissionens variation med mängden insprutat vatten.

3.4 Försök utförda i en 250 MW's panna, referens 2

Försök med bl a vatteninsprutning har utförts i en 250 MW's tangentialeldad panna i syfte att minska NO_x -emissionen. Naturgasen tillfördes genom totalt 44 munstycken, uppdelade på fyra sektioner. Pannan är konstruerad för att kunna utnyttja olja som stöd- eller reservbränsle. Vatteninsprutningen kunde därmed ske genom de befintliga oljemunstyckena. Försöken visade att NO_x -emissionen minskade proportionellt mot den tillsatta vattenmängden. Optimal vattentillförsel vid fullast, och en O_2 -halt på 2%, minskade NO_x -emissionen från 300 ppm till 100 ppm. Inga förbrännings-tekniska problem uppstod till följd av vatteninsprutningen.

I nedanstående figur visas NO_x -emissionen vid olika reducerande åtgärder, däribland vatteninsprutning.



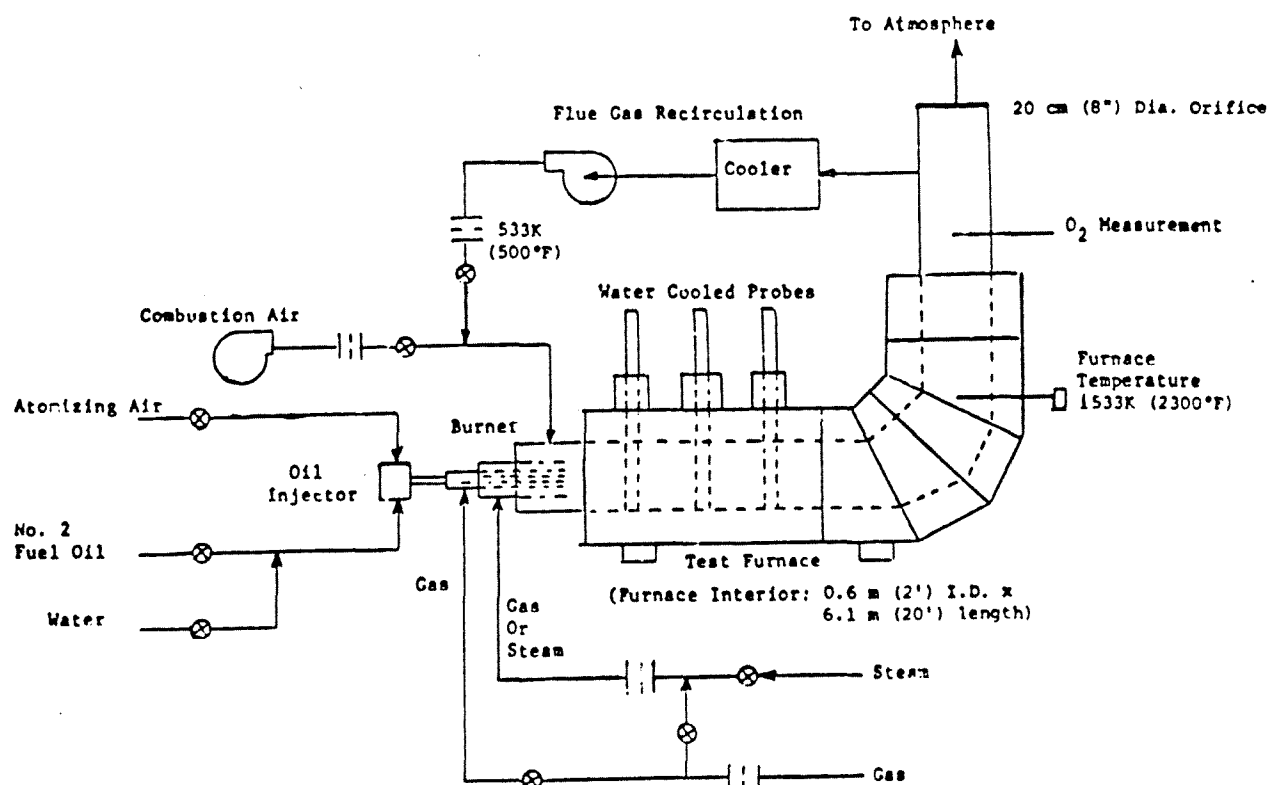
Figur 3.5 NO_x -emissionen vid olika reducerande åtgärder (2).

Vid det försök med vatteninsprutning som illustreras i figur 3.5, var den insprutade vattenmängden ca 1 kg vatten per kg tillfört bränsle.

3.5 Försök i en testanläggning 0,6 MW, referens 3

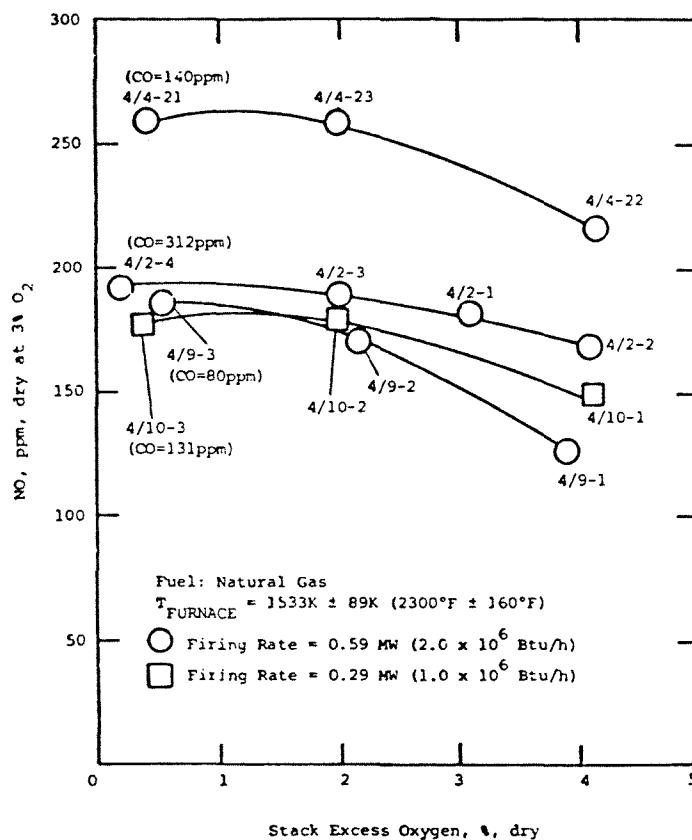
Försök har utförts i en ugn med effekten 0,6 MW. Brännaren har förberetts för att bli möjliggöra tillförsel av vatten till flammen (även andra NO_x -reducerande åtgärder har provats). Uppehållstiden i ugnen beräknas vara 2 sekunder vid maxlast. Under försökens gång hölls ugnstemperaturen konstant vid 1260°C , genom större eller mindre exponering av de vattenkylda tuberna. Detta gjordes för att simulera förhållandena i en fullstor anläggning.

Vid tillförsel av vatten utnyttjades kombinationsbrännarens normala oljeinjektor. I figur 3.6 visas schematiskt försöksutrustningen.



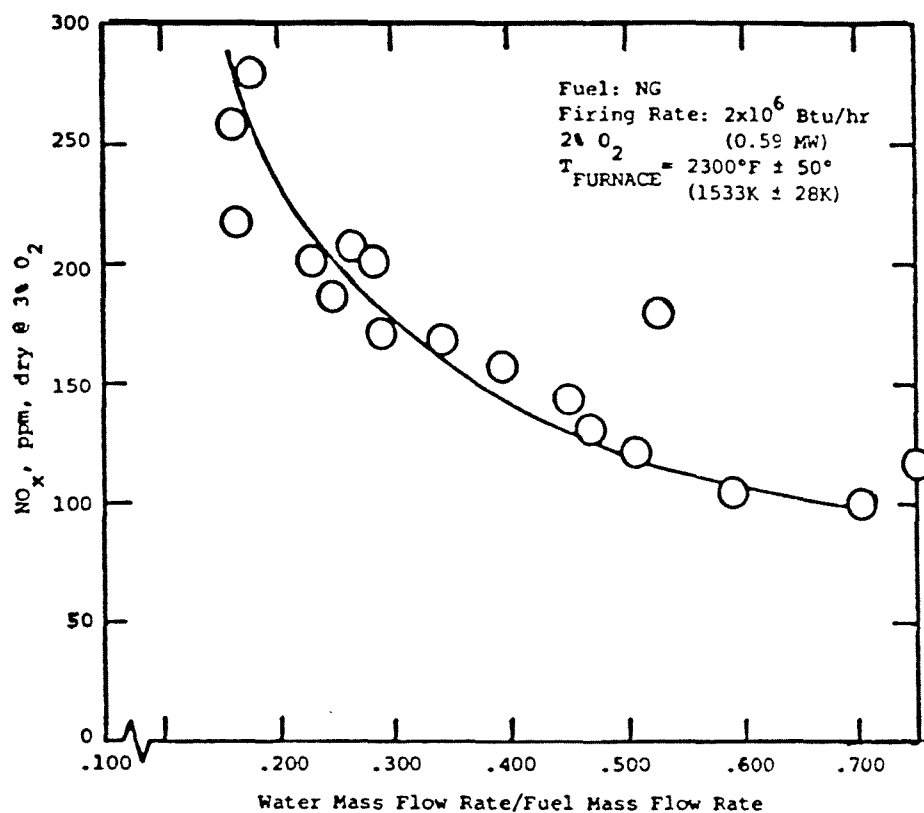
Figur 3.6. Schematisk beskrivning av försöksutrustning (3).

I figur 3.7 visas hur NO_x -emissionen beror av luftöverskottet. Att olika kurvar erhålles förklaras i rapporten av skillnader i luftfuktighet vilket enligt vår bedömning verkar osannolikt. Som framgår av figuren har även CO-halten mätts vid försöken.



Figur 3.7. NO -emissionen för olika luftöverskott vid några olika försöksserier (3).

Inverkan av vattenflödets storlek på NO_x -reduktionen, har studerats vid en O_2 -halt på 2%. Resultatet framgår av figur 3.8.



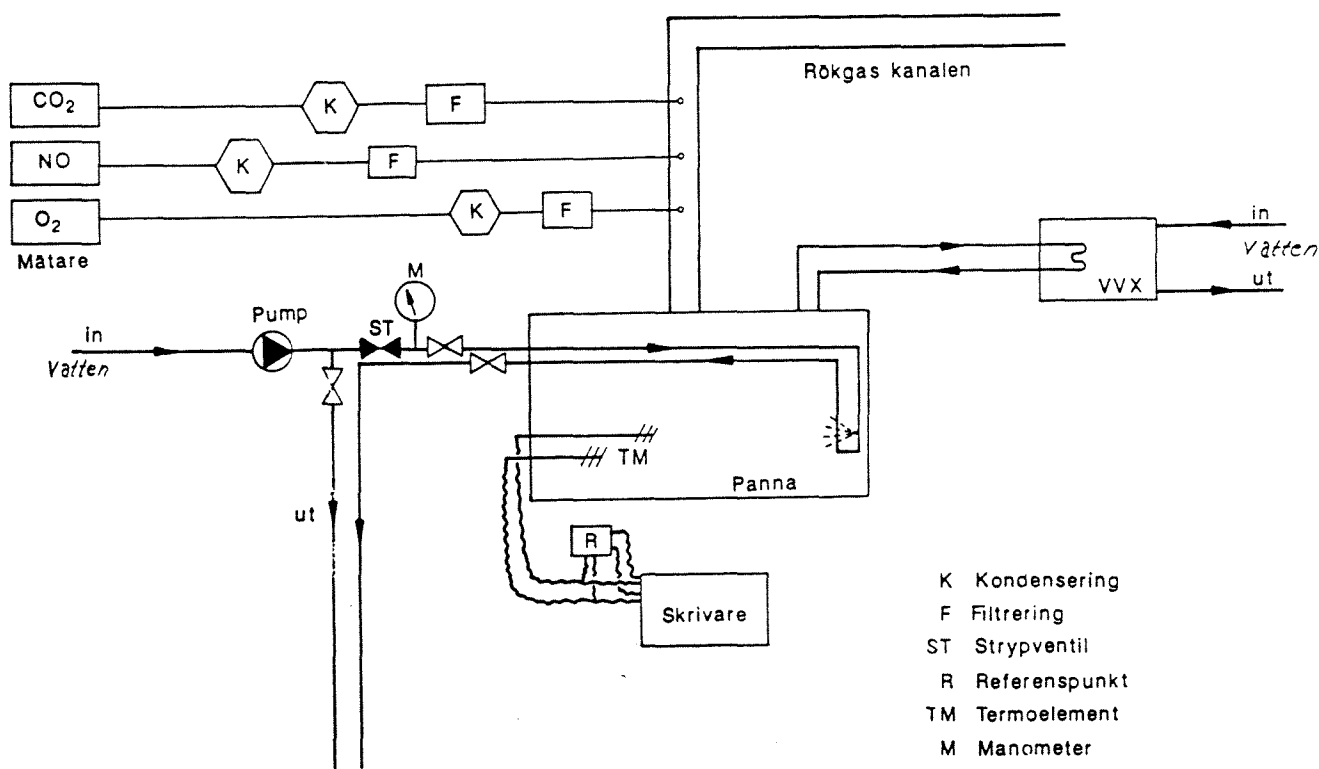
Figur 3.8. Vatteninsprutningens inverkan på NO -emissionen vid en O_2 -halt på 2% (3).

3.6 Studie utförd vid KTH ca 20 kW, referens 5

Vid institutionen för uppvärmnings- och ventilationsteknik, KTH, har försök utförts i syfte att minska NO_x -emissionen vid naturgaseldning.

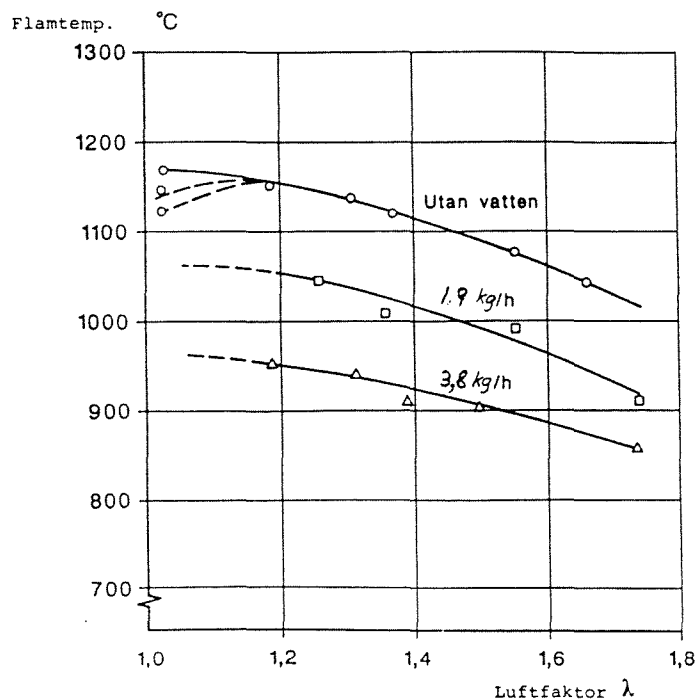
Försöken visade att en betydande reduktion av NO_x -halten kan erhållas genom vatteninsprutning. Vid en vattenmängd på 1,36 kg vatten/kg bränsle och en luft kvot på 1.2 minskade NO_x -halten från 26 ppm till 19 ppm.

Figuren nedan illustrerar uppställningen av försöksutrustningen.



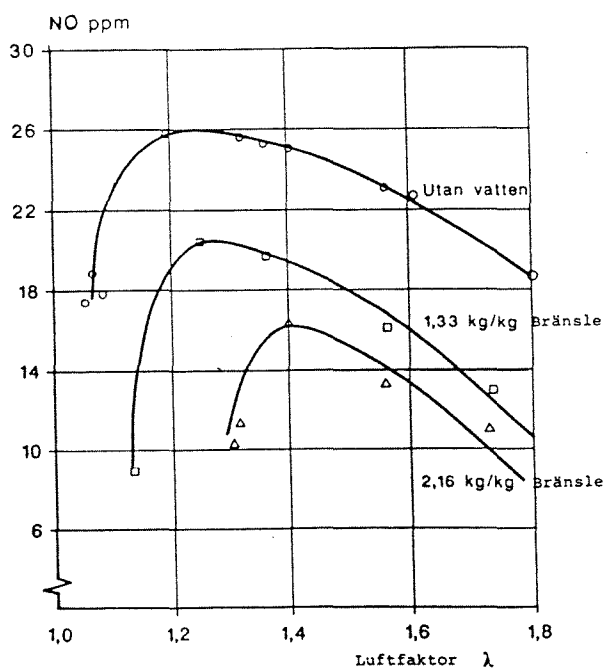
Figur 3.9. Schematisk beskrivning av försöksuppställning (5).

Flamtemperaturen uppmättes med termoelement vid olika luftfaktorer och vattenmängder. Följande figur visar vilka flamtemperaturer som erhöles.



Figur 3.10 Flamtemperaturens variation med varierat luftöverskott vid olika mängd insprutat vatten.

Hur den uppmätta NO-halten varierade beroende på luftfaktorn, dels utan vatteninsprutning och dels vid tillsats av två olika vattenmängder, illustreras i figur 3.11.



Figur 3.11 NO-emissionen som funktion av luftöverskottet vid olika mängd insprutat vatten.

De i figur 3.12 redovisade flamtemperaturerna är lägre än den temperatur då reaktionsmekanismerna enligt Zeldovich har någon betydelse. Förklaringen till detta kan vara svårigheter att mäta "rätt" flamtemperatur p.g.a att de kylande väggarna i provpannan stör samtidigt som temperaturfördelningen inte är helt jämn.

En annan förklaring till den uppmätta minskningen av NO_x -bildningen vid ökande vatteninsprutning kan vara att vattnet även har en positiv effekt vid bildning av prompt NO_x .

3.7 Slutsatser

I de beskrivna referenserna har vattnet tillförts på olika sätt. Med samtliga metoder har man fått en markant minskning av NO_x -bildningen.

Försök har utförts med varierande mängd tillfört vatten. Även här uppvisar de olika referenserna entydigt en sänkt NO_x -emission med ökande vatteninsprutning helt upp till den punkt där instabilitet i flammen uppstår dvs omkring 25 mass-% vatten i förhållande till rökgasen.

Hur CO-halten påverkas av den mängden tillfört vatten har bara kontrollerats i ett av försöken. Någon drastisk ökning av CO-halten har då inte kunnat konstateras.

Några försök med att arrangera vatteninsprutningen i olika zoner av gasflamman har inte utförts varför man utifrån referenserna inte kan dra några slutsatser om hur insprutningen bör utformas i praktiken. Försök med vatteninsprutning i olika zoner har i det studerade referensmaterialet endast utförts på oljeflammor.

Som framgår av redovisat material, är förutsättningarna goda att erhålla en kraftig NO_x -reduktion med hjälp av vatteninsprutning. En stor del av denna reduktion åstadkoms genom att flamtemperaturen sänks. Eventuellt kan dock även andra mekanismer påverka NO_x -reduktionen, som t ex vissa kemiska reaktioner. Det vore därför intressant att i ett framtida projekt studera NO_x -reduktion även i en låg NO_x -brännare. Därigenom kan man verifiera om vatteninsprutningen endast är ett alternativ till låg NO_x -brännare, genom komplettering av befintliga brännare, eller om det är möjligt att erhålla lägre NO_x -emissioner än vad som är möjligt med dagens låg- NO_x -brännare.

4. EKONOMI

Bränslekostnad

Hur påverkas bränsleekonomin av vattensinsprutningen? För att svara på den frågan måste vi studera hur verkningsgraden påverkas. I Europa används så gott som uteslutande det undre (effektiva) värmevärdet. Eftersom detta värmevärde inte inkluderar vattenångans kondensationsvärme kan beräkningar som baseras på det undre värmevärdet verka förvillande. Figur 4.1 på sid 29 visar hur pannverkningsgraden (exklusive omgivningsförluster) beror av utgående rökgastemperatur. Två fall illustreras i diagrammet, dels för ett bränsle bestående av 100% naturgas, dels för ett bränsle som består av 50% naturgas och 50% vatten. Figur 4.1 visar att vid 40°C rökgastemperatur är verkningsgraden högre för det fall att 50% av bränslet består av naturgas och 50% av vatten. Man kan därmed ledas att tro att man får ut mer energi i detta fall. Så är det emellertid inte, utan man erhåller lika mycket energi i båda fallen. Detta förutsätter dock att vattenången i rökgasen kondenseras och även lågtemperaturvärmes kan tas tillvara. Om detta inte görs kommer vattensinsprutning ge en ökad förlust med rökgasen, och därmed minskad verkningsgrad.

Om värdet av den lågtemperaturvärme som kan tas tillvara, inte kan sättas lika högt som det högtemperaturvatten eller ånga som produceras i pannan, måste även här göras en kostnadsmässig korrigering, som bör uppfattas som en kostnadspost vid vattendosering.

När man studerar figur 4.1 måste man ha i åtanke att värmevärdena för de båda bränslena i diagrammet är olika. Det undre värmevärdet för naturgas är 48,4 MJ/kg. Bränslet innehållande 50% vatten får därmed ett värmevärde som är hälften av naturgasens värmevärde minskat med förångningsvärmets för vattnet, dvs $48,4 \times 0,5 - 2,445 \times 0,5 = 22,98$ MJ/kg bränsle.

Följande beräkningar visar att bränsleförbrukningen blir lika stor oavsett om vatten sprutas in eller inte (beräkningarna är baserade på undre värmevärdet).

Förutsättningar: Effekt	100 kW
Kondensattemperatur	50°C
Utnyttjningstid	2200 h/år
O ₂ -halt	2%
Värmevärde utan vatten	48,4 MJ/Kg
Värmevärde med vatten	22,98 MJ/Kg

a. Bränsle 100% naturgas

$$t = 50^{\circ}\text{C} \quad \text{Verkningsgrad enligt fig 4.1} = 102,6\%$$

$$\text{Tillförd bränsleffekt} \frac{100}{1,026} = 97,47 \text{ kW}$$

För att erhålla 100 kW måste 97,47 kW tillföras genom naturgas.

$$\frac{97,47 \text{ kW} \cdot 3600 \cdot 2200}{48,4 \cdot 10^3} = 15\,950 \text{ kg bränsle/år}$$

b. Bränsle 50% naturgas, 50% vatten

$$t = 50^{\circ}\text{C} \quad \text{Verkningsgrad enligt fig 4.1} = 107,9\%$$

$$\text{Tillförd effekt} \quad \frac{100}{1,079} = 92,68 \text{ kW}$$

För att erhålla 100 kW måste 92,68 kW tillföras genom bränslet.

$$\frac{92,68 \cdot 3600 \cdot 2200}{22,98 \cdot 10^3} = 31\,940 \text{ kg bränsle/år}$$

dvs 15 970 kg naturgas/år.

Skillnaden i resultaten för fall a och b, som utgör 0,1%, beror på avrundningsfel.

Kostnaden för naturgasen blir i de båda beräkningsfallen 31 940 kr/år, vid ett ansatt naturgaspris på 2 000 kr/ton (15 öre/kWh).

Det är betydligt enklare att i stället för det undre (effektiva) värmevärdet, använda det övre (kalorimetriska) värmevärdet. I figur 4.2 på sid 29 illustreras samma sak som i figur 4.1. I figur 4.2 illustreras tydligt hur den verkliga energisituationen ser ut.

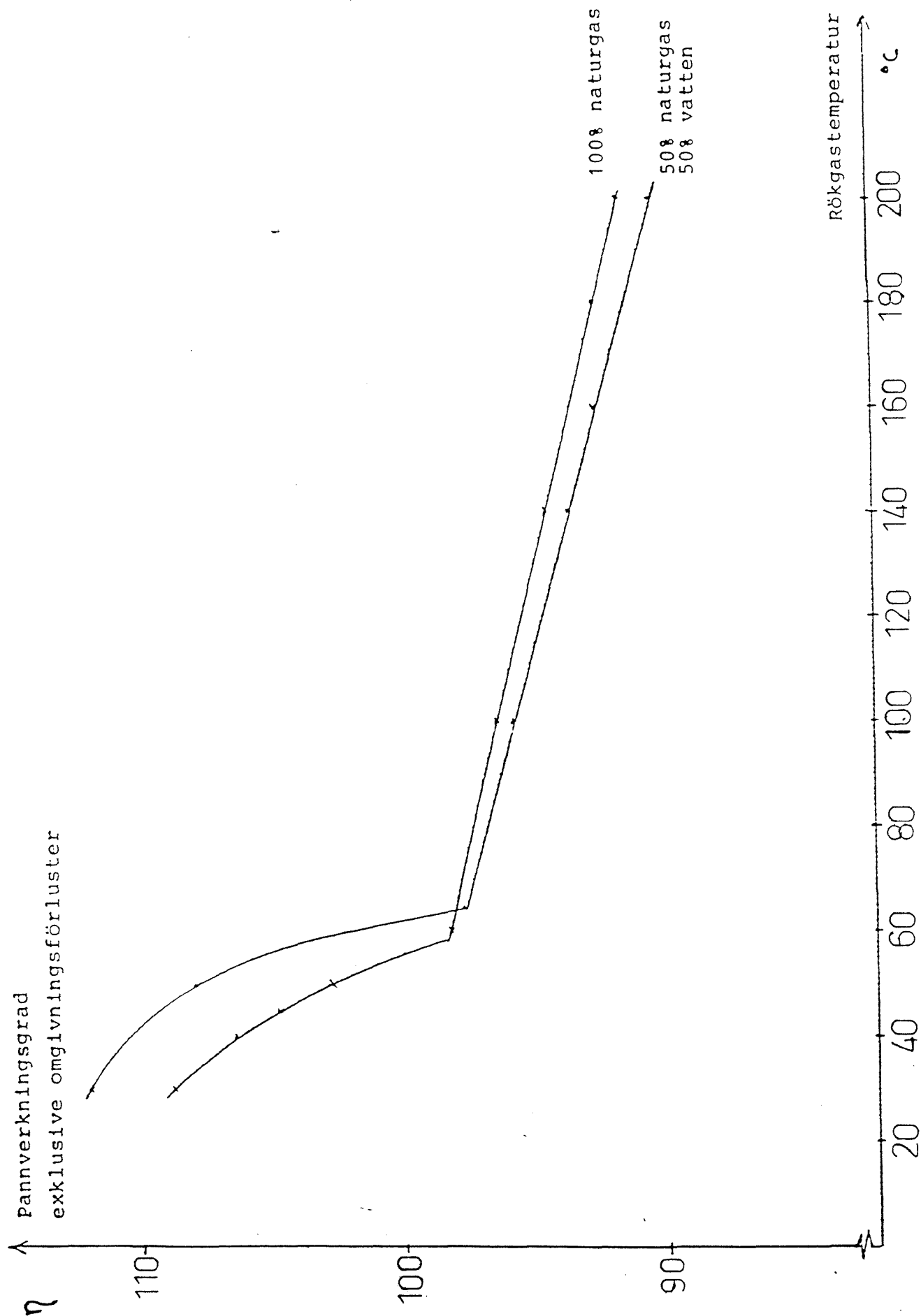
Vattenkostnad

Vid vatteninsprutning motsvarande en mängd av 1 kg vatten per kg bränsle, blir vattenbehovet i ovanstående beräkningsexempel 15 970 kg/år. Med en kostnad av 8 kr/m³ blir vattenkostnaden 128 kr/år, dvs den utgör 0,4% av bränslekostnaden. Ett alternativ är att utnyttja kondenserat vatten från rökgaskylaren varvid kostnaden för vattnet utgår.

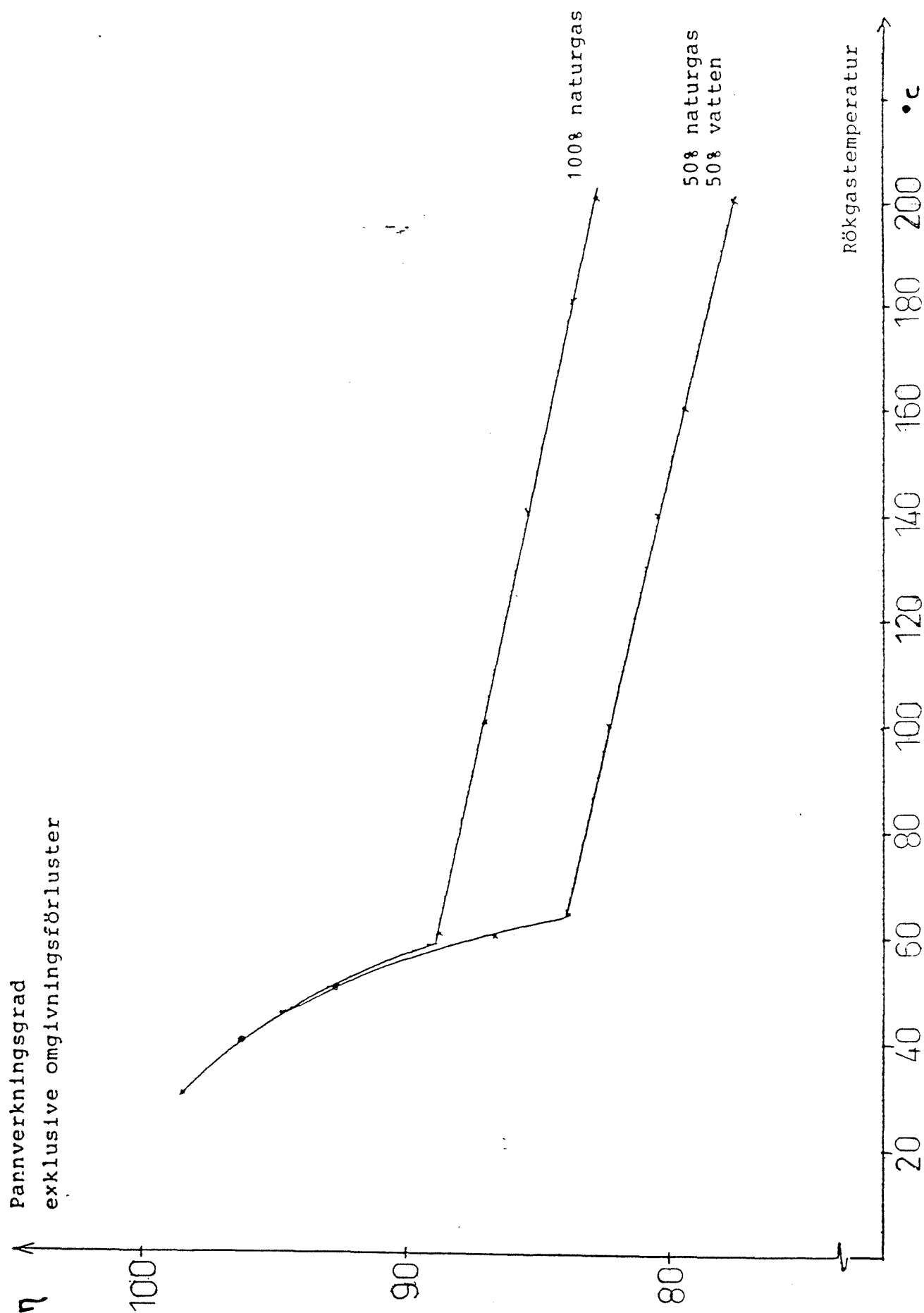
Övriga aspekter

Genom vatteninsprutning kommer förbränningsgaserna att få en generellt sett lägre temperatur och en annan sammansättning. Detta kommer att påverka värmeövergången i såväl naturgaspannan som i den efterföljande rökgaskondensorn. Ser vi till skillnaderna mellan en normal naturgaspanna utan vatteninsprutning så ökar effektuttaget i rökgaskondensorn vid vatteninsprutning. Således måste en större del av värmeenergin kunna tas till vara vid relativt låg temperatur samtidigt som rökgaskondensorns värmeöverföringsyta måste ökas.

Med en nivå på vatteninsprutningen kring drygt 1 kg vatten per kg bränsle ökar avgasvolymen med knappt 20%. Erfarenhetsmässigt har det visat sig att vid en given temperatur på kylvattnet till kondensorn ökar också ytbehovet med ca 20%. Detta motsvarar dock endast en liten ökning av den totala investeringskostnaden för rökgaskylaren.



Figur 4.1. Pannverkningsgrad exklusive omgivningsförluster, som funktion av rökgastemperaturen. Baserat på undre värmevärdet.



Figur 4.2. Pannverkningsgrad exklusive omgivningsförluster som funktion av rökgastemperaturen. Baserat på övre värmevärdet.

5. SLUTSATSER OCH FÖRSLAG TILL MÄTPROGRAM

Resultatet från litteraturstudien visar att vid samtliga försök som publicerats har en NO_x -reduktion erhållits. Från dessa resultat drar vi slutsatsen att det är av intresse att utföra försök med vatteninsprutning vid naturgaseldning för att säkerställa att inga negativa bieffekter förekommer.

En negativ effekt som brukar nämnas i samband med vatteninsprutning är försämrad ekonomi i form av försämrad verkningsgrad. I de fall man använder en kondenserande rökgaskylare, bortfaller emellertid denna negativa effekt, om man kan ta tillvara lågtemperaturvattnet från rökgaskylaren.

Den negativa effekt som därmed kan kvarstå är en försämrad förbränning. Vid de försök som beskrivs i litteraturen har denna fråga inte undersökts alls eller behandlats mycket ofullständigt. Vi finner det därför angeläget att studera hur vatteninsprutningen inverkar på halten kolmonoxid och oförbrända kolväten.

Vid värdering av möjliga insprutningsmetoder har vi beaktat att de metoder som skall utprovas bör vara så enkla som möjligt. En orsak är att försöken skall kunna utföras utan att alltför mycket tid läggs ner på att lösa praktiska problem. En annan viktig aspekt är att det vid kommersiell användning är fördelaktigt om metoderna på ett enkelt sätt kan tillämpas i befintliga pannor.

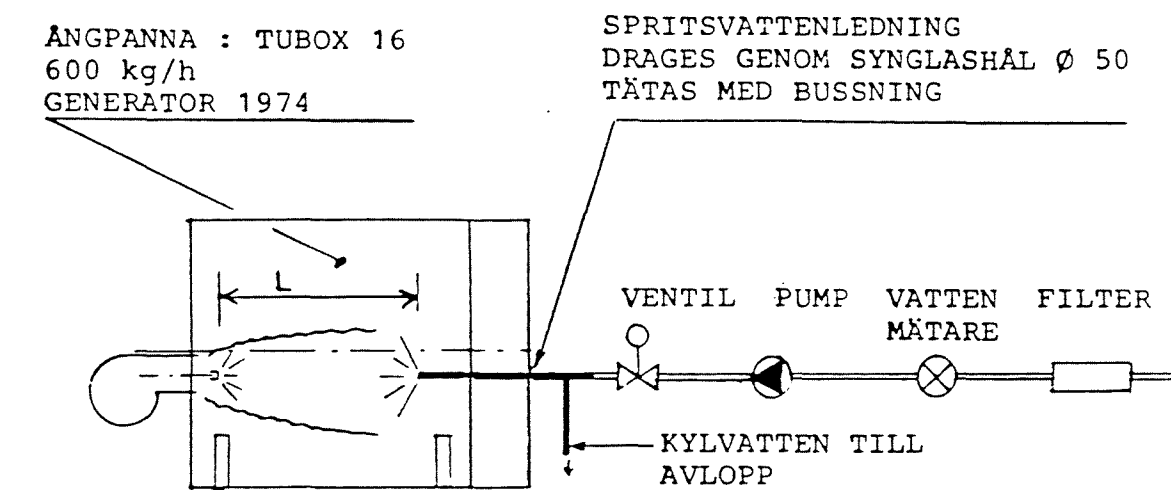
5.1 Kombibrännare

En enkel metod för vatteninsprutning är att använda en kombinationsbrännare för naturgas/olja, där man utnyttjar oljemunstycket för vatteninsprutning. Detta är den metod som till exempel utnyttjas i försöken enligt ref (1). Om denna metod fungerar är den mycket intressant på grund av att kommersiell utrustning redan finns på marknaden. Om metoden visar sig effektiv skulle därmed befintliga anläggningar kunna få en NO_x -reduktion utan några större investeringar, under förutsättning att anläggningen är utrustad med rökgaskondensering.

Eftersom vi i förhand inte kan bedöma hur pass lämplig kombibrännaren är för denna tillämpning föreslår vi att ytterligare en metod utprovas. Vi har då valt en metod där vatteninsprutningens läge i flammen kan varieras på ett sätt som beskrivs i kapitel 5.2.

5.2 Insprutningsmunstycke med avståndsreglering

Vid denna metod sker vatteninsprutningen motsatt flamriktningen som figur 5.1 visar.



Figur 5.1 Principskiss över vatteninsprutningssystem.

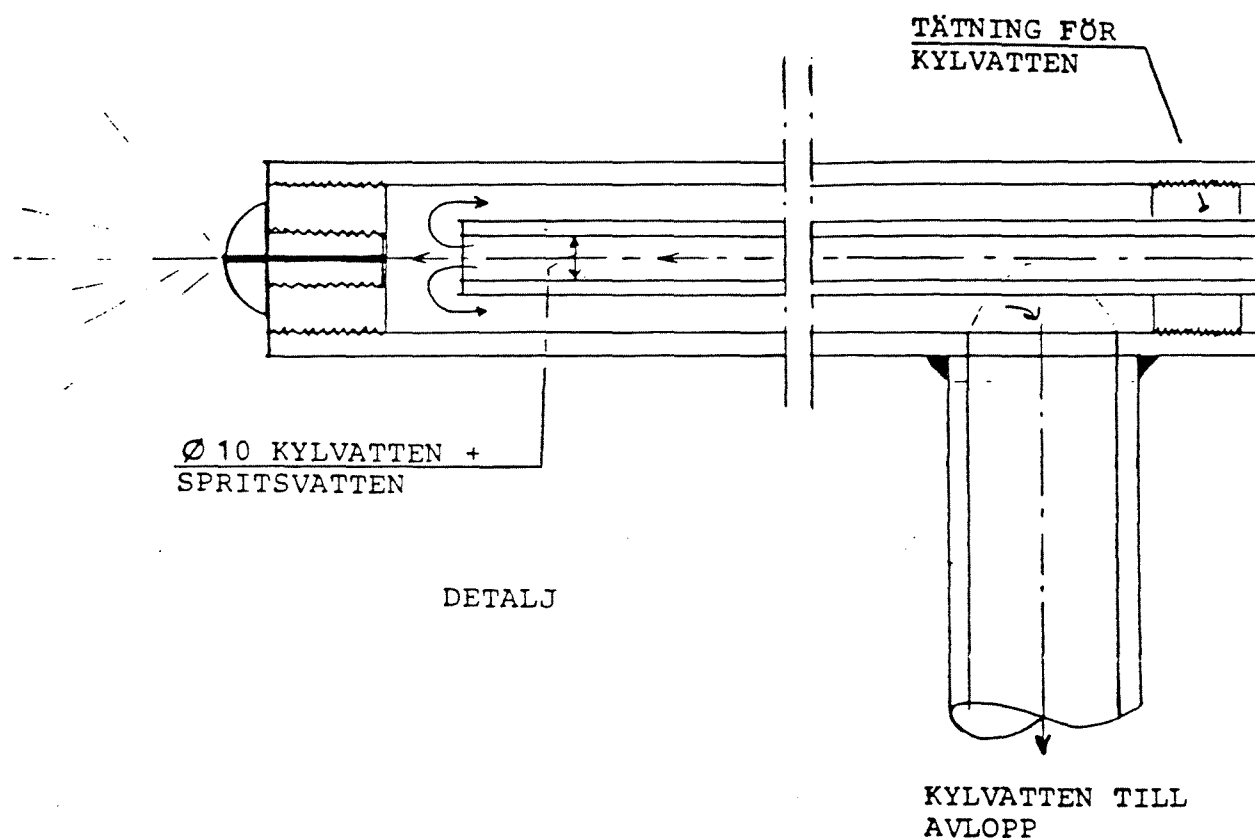
Avståndet L kan varieras och hur detta inverkar på NO_x -reduktionen och mängden oförbränt kommer att studeras. Detta är information som inte kan tas fram ur försöken med kombibrännare.

Figur 5.2 visar en mer detaljerad skiss på inlopps-rörets utförande. På grund av den höga temperaturen i flamman måste röret förses med kylning. En uppskattning av värmeöverföringen har utförts och beräkningsgången finns angiven i bilaga 1. I detta beräkningsfall har värdena ansatts i överkant vilket betyder att det verkliga värmeöverföringsbehovet torde vara något lägre.

Beräkningarna ger följande resultat:

Bortkyld effekt	50	kW	(maximalt värde)
Kylvattenflöde	0,24	kg/s	- " -
Insprutat vatten- flöde	0,05	kg/s	- " -
Hastighet mellan rören	1,0	m/s	- " -
Hastighet i inner- röret	3,7	m/s	- " -

Inloppsrörets utförande visas på omstående sida.
Ett kylt rör medför dock en risk för sot- och CO-
bildning varför uppmärksamhet måste riktas även på
detta problem vid mätningarna.



Figur 5.2 Inloppsrörets utförande.

Anm. För att erhålla en bättre reglering kan eventuellt vattenflödet för insprutning ledas genom centrumröret och kylvattenflödet ledas in i separata rör mellan centrumröret och ytterröret.

5.3 Val av försöksanläggning

Vi föreslår att de två ovan nämnda insprutningsmetoderna testas i en mindre förbränningsanläggning. Det är viktigt att samma anläggning utnyttjas för båda metoderna för att resultaten skall kunna jämföras.

Under projektets gång har vi i första hand haft två typer av anläggningar i åtanke för en första försöksserie. Den ena har varit Åkerlund & Rausings panncentral i fabriken i Lund som är utrustad med en reservpanna där försöken skulle kunna genomföras. Pannan är försedd med en kombinationsbrännare och lasten är relativt jämn över dygnet och över året. Vidare är pannan försedd med en kondenserande rök-gaskylare vilket möjliggör verkningsgradsprov under realistiska förhållanden.

Den andra pannan vi har haft i åtanke är en laboratoriepanna installerad på Drifttekniska Institutionen vid LNTH i Malmö. Fördelen med denna panna är placering vid högskolan med mätutrustning och personal som kan vara behjälpliga med tillverkning av vissa komponenter i experimentutrustningen och annat som kan vara nödvändigt under genomförandet av mätningen. Den panna som vi kan använda för mätningarna är en Tubox 16 med en kapacitet av 600 kg ånga/h. Pannan är tillverkad av Generator 1974.

Vi har i första hand valt den senare anläggning för de inledande försöken vars syfte är att verifiera vatteninsprutningens NO_x -begränsande effekt och studera hur vatteninsprutningen inverkar på mängden oförbränt.

6. PRELIMINÄRT MÄTPROGRAM

6.1 Mätningarnas utförande

Vi föreslår att förbränningseffekten hålls konstant under samtliga försöksserier. De parametrar som varierar är dels O_2 -halten och dels vattenmängden. Vid försöken med vatteninsprutningen motsatt flamriktningen ändras dessutom avståndet mellan brännaren och munstycket. Följande utgör ett förslag till mätprogram.

6.1.1 Försök som utföres med kombinationsbrännare

Försöksserie 1, kombibrännare

Den första försöksserien utföres utan vatteninsprutning för bestämning av NO_x -emissionen som ett referensvärde. O_2 -halten ändras från 0,5 till 3% enligt tabellen nedan.

Försök nr	kg H_2O /kg naturgas	O_2 -halt (%)
1	0	0,5
2	0	1,0
3	0	2,0
4	0	3,0

Försöksserie 2, kombibrännare

I de följande försöken hålls O_2 -halten konstant på exempelvis 2,0%. Vattenmängden varieras från 0,5 till 4,0 kg vatten/kg naturgas i steg om 0,5. I dessa försök är det intressant att studera hur de relativt stora vattenmängderna inverkar på NO_x -reduktionen och förbränningsförloppet. I tidigare utförda försök har vattenmängden ofta begränsats eftersom ångbildningsvärmén utgjort en förlust. Följande försök utföres i denna försöksserie:

Försök nr	kg H_2O /kg naturgas	O_2 -halt (%)
5	0,5	2,0
6	1,0	"
7	1,5	"
8	2,0	"
9	2,5	"
10	3,0	"
11	3,5	"
12	4,0	"

Försöksserie 3, kombibrännare

I denna försöksserie studeras O_2 -haltens inverkan på NO_x -reduktion och förbränningsförlopp. För att begränsa antalet försöksserier väljs en vattenmängd med ledning av resultaten från föregående försöksserie. O_2 -halten varieras mellan 0,5-3,0%.

Försök nr	kg H_2O /kg naturgas	O_2 -halt (%)
13	*	0,5
14	*	1,0
15	*	2,0
16	*	3,0

- * Vattenmängden väljs med ledning av resultaten från föregående försöksserie. Vattenmängden hålls konstant i försök 13-16.

Försöksserie 4, kombibrännare

Hur O₂-halten inverkar vid olika vattenmängder undersöks i försöksserie 4. I denna försöksserie begränsas både O₂-halt och vattenmängd till två värden vardera.

Försök nr	kg H ₂ O/kg naturgas	O ₂ -halt (%)
17	2,0	2,0
18	2,0	3,0
19	3,0	2,0
20	3,0	3,0
21	4,0	2,0
22	4,0	3,0

6.1.2 Försök som utföres med insprutning motsatt flamriktningen

Försöksserie 1, insprutning motsatt flamriktning

Även i dessa försök varieras vattenmängden och O_2 -halten. För att begränsa antalet försök till ett rimligt antal har båda dessa parametrar begränsats till tre nivåer vardera. Den första försöksserien utföres utan vatteninsprutning för att erhålla referensvärden.

Försök nr	kg H_2O /kg naturgas	O_2 -halt (%)
1	0	1,0
2	0	2,0
3	0	3,0

Försöksserie 2-4, insprutning motsatt flamriktningen

I dessa försöksserier ändras avståndet mellan brännarens utlopp och vatteninsprutningsmunstycket. I tabellen nedan motsvarar avståndet 100% pannans djup, dvs avståndet från brännarens utlopp till bakre pannväggen. Följande försök föreslås:

Försök nr	kg H_2O /kg naturgas	O_2 -halt (%)	Avstånd (%)
4, 11, 18	*	2,0	10
5, 12, 19	*	2,0	20
6, 13, 20	*	2,0	30
7, 14, 21	*	2,0	40
8, 15, 22	*	2,0	60
9, 16, 23	*	2,0	80
10, 17, 24	*	2,0	100

- * I försök 4-10 är vattenmängden: 2,0 kg H₂O/kg naturgas
- I försök 11-17 är vattenmängden: 3,0 kg H₂O/kg naturgas
- I försök 18-24 är vattenmängden: 4,0 kg H₂O/kg naturgas

Försöksserie 5, insprutning mot flamriktningen

I denna försöksserie studeras O₂-haltens inverkan vid olika vattenmängder. Avståndet mellan brännaren och insprutningsmunstycket hålls konstant på ett värde som bestäms av resultaten från försöksserie 2-4.

Försök nr	kg H ₂ O/kg	O ₂ -halt (%)	Avstånd (%)
naturgas			
25	2,0	3,0	*
26	2,0	4,0	*
27	3,0	3,0	*
28	3,0	3,0	*
29	4,0	3,0	*
30	4,0	4,0	*

- * Avståndet bestämmas av resultatet från mätserie 2-4 och hålles konstant under försök 25-33.

6.2 Analyser

Under försökens gång kommer hela tiden en analysutrustning att vara uppkopplad så att emissioner och förbränningsförlopp kan studeras noggrant. Förutom flamtemperaturen kommer följande storheter att uppmätas eller analyseras.

Tilloppsflöden

- Naturgasflödet avläses.
- Dagsaktuell analys av naturgasens sammansättning erhålles från leverantören.
- Vattenflödet avläses.
- Vattenanalys utföres vid ett tillfälle.

Rökgas

- O₂ och/eller CO₂
- CO
- NO + NO₂
- Summa kolväten
- Rök Gastemperatur
- Rökgasflöde samt verkningsgrad erhålles genom beräkningar.

6.3 Kostnader och tidsuppskattning

Följande utgör en uppskattning av arbetsinsatser och kostnader för att genomföra det föreslagna mätprogrammet.

<u>Aktivitet</u>	<u>Tidsåtgång</u>	<u>Kostnad</u>
Konstruktionsritningar för insprutningsmunstycke, beställning av pump etc.	1v x 1 pers	18 000
Undersökning av lämplig analysutrustning för förhyrning, samt eventuella resor för att inspektera utrustningen.	1v x 1 pers	18 000
Uppriggning av analysutrustning samt övriga förberedelser på plats.	1v x 1 pers	18 000

<u>Aktivitet</u>	<u>Tidsåtgång</u>	<u>Kostnad</u>
Testkörning samt försök med kombibrännare	2v x 2 pers	72 000
Uppriggning av insprut- ningsmunstycke, testkör- ning samt försök med insprutningsmunstycke	2v x 2 pers	72 000
Tillverkning av insprut- ningsmunstycke		5 000
Inköp av pump, filter etc		7 000
Bränslekostnad		6 000
Instrumenthyra och kalibreringsgaser		30 000
Resor och traktamenten		30 000
Utvärdering av försök med kombibrännare	1v x 1 pers	18 000
Utvärdering av försök med insprutn.munstycke	1v x 1 pers	18 000
Rapportskrivning	2v x 1 pers	36 000
Sekreterare		8 000
Övriga utlägg		5 000
Oförutsett		17 000
		378 000

Projektets totala kostnad beräknas alltså uppgå till
378 000 kr.

Totalkostnaden för en testserie omfattande enbart
försök med kombibrännare beräknas uppgå till 258 000
kr.

7. REFERENSER

1. Nitrogen oxides control in gas fired systems using flue gas recirculation and water injection. Institute of Gas Technology 1972, Session VI paper 2 conf 7206155. C.J. Halstead et al, Shell Research Ltd, 1972.
2. Reduction of NO_x emissions by combustion modifications to a gasfired 250-MW tangentialfired boiler. Institute of Gas TEchnology 1972, Session VI paper 3 conf 7206115. C.E. Blakeslee, Combustion Engineering Inc, 1972.
3. Subscale tests of combustion modification for steel furnaces. R.J. Tidona et al, KVB Inc, California, 1981, PB-81-236143.
4. Control techniques for nitrogen oxides emissions from stationary sources - second edition. U.S. Environmental protection agency, 1978, EPA-450/1-78-001.
5. NO_x-bildning vid gaseldning. Folke Peterson et al, KTH. BFR-rapport. A-serien nr 135.
6. Certain Features of the Formation of Toxic and Corrosive Products of Combustion of Gas and Oil. Vasilev et al, Thermal Engineering 30(3) 1983. S 171-173.
7. Eine neue Brennergeneration für Luftreinhaltung und Energieeinsparung von D. Altemark, R. Hess. Wärme Gas International, band 32 (1983). S 40-46.
8. Bildning och begränsning av NO_x vid naturgasförbränning. Edner. H et al. Värmeforskrapport 186.1985

BILAGA 1: ÖVERSLAGSBERÄKNING AV VÄRMEÖVERFÖRING
Vid föreslagen vatteninsprutning enligt figur 5.1
Hur stor blir den bortkylda effekten?

Antag att maximal flamtemperatur är 2 000°C.

Svartkroppsstrålningen blir 1 514 kW/m². Detta värde reduceras emellertid pga det verkliga ϵ .

Lägg till α -värdet för konvektion.

Beräkning av α :

$$\frac{\alpha \cdot d}{x} = 0,287 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,364}$$

Ansätt maximal gashastighet i flammen = 50 m/s

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} = \frac{0,15 \cdot 50 \cdot 0,02}{60 \cdot 10^{-6}} = 2500 \text{ (vid } t = 2000^\circ\text{C)}$$

$$\alpha = \frac{0,287 \cdot 2500^{0,6} \cdot 0,1^{0,364} \cdot 0,1}{0,02} = 138$$

Yttre rörets diameter har ansatts till 0,02 m.

Konvektiva värmeöverföringsbidraget blir:

$$\frac{P}{A} = \alpha \cdot N = 138 \cdot 2000 = 276 \text{ kW/m}^2$$

$$\text{Strålning} + \text{konvektion} = 1514 + 276 = 1790 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

Värdet reduceras något i praktiken. Ansätt att värmeöverföringen är 1600 kW/m².

Ansätt att den ekvivalenta rörlängden utsatt för 2000°C är 0,5 m.

$$\text{Rörets mantelyta: } 2 \pi \cdot r \cdot l = 0,031 \text{ m}^2$$

$$\text{Bortkyld effekt: } 1600 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \cdot 0,031 \text{ m}^2 = 50 \text{ kW}$$

Maximalt bortkyld effekt blir 50 kW.

Hur stor blir hastigheten mellan rören?

Ansätt att kylvattnets är 50°C

$$P = G_k C_k \quad 50 = G_k \cdot 4,19 \cdot 50 \quad G_k = 0,24 \text{ kg/s}$$

$$A = \frac{\pi d_y^2}{4} - \frac{\pi d_i^2}{4} = \frac{\pi}{4} (0,20^2 - 0,40^2) = 24 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$Q = uA \quad u = \frac{0,24 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^3}{\text{s} \cdot 1000 \text{ kg} \cdot 24 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 1,0 \text{ m/s}$$

Hastigheten mellan rören blir maximalt 1 m/s.

Hur stor blir hastigheten i innerröret?

Maximal vatteninsprutning kommer att vara 4 kg vatten/kg naturgas.

$$\begin{aligned} P_{\text{panna}} &= 600 \text{ kW} \\ H_u &= 51,9 \text{ MJ/kg} \\ &= 0,9 \end{aligned}$$

Med ovanstående data blir naturgasflödet:

$$\frac{600 \text{ kJ}}{\text{s} \cdot 51,9 \cdot 10^3 \text{ kJ} \cdot 0,9} \text{ kg} = 0,013 \text{ kg/s}$$

Maximal insprutad vattenmängd = $4 \cdot 0,013 = 0,051 \text{ kg/s}$
I innerröret transporteras dels vatten för insprutning och dels vatten för kylning.

$$G_{\text{innerrör}} = 0,051 + 0,24 = 0,29 \text{ kg/s} \quad 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$u = \frac{Q}{A} = \frac{2,9 \cdot 10^{-4}}{\frac{\pi \cdot 0,010^2}{4}} = 3,7 \text{ m/s}$$

Maximala hastigheten i innerröret blir 4 m/s.

UJEW P.006

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