
Rapport SGC 087

UTVECKLING AV KATALYTISK RENING AV AVGASER FRÅN BEFINTLIG PANNA

Fredrik Silversand, Katator AB
Tihamer Hargitai, Katator AB
Mikael Näslund
Inst. för Värme- och kraftteknik, LTH

December 1997



Rapport SGC 087

UTVECKLING AV KATALYTISK RENING AV AVGASER FRÅN BEFINTLIG PANNA

Fredrik Silversand, Katator AB
Tihamer Hargitai, Katator AB
Mikael Näslund
Inst. för Värme- och kraftteknik, LTH

December 1997

SGC:s FÖRORD

FUD-projekt inom Svenskt Gastekniskt Center AB avrapporteras normalt i rapporter som är fritt tillgängliga för envar intresserad.

SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan uppdragstagarna för respektive projekt eller rapportförfattarna svarar för rapporternas innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat eller i rapporterna gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapport får återges med angivande av källan.

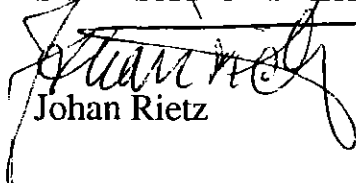
En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns i slutet på denna rapport.

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

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

Sydgas AB
Vattenfall Naturgas AB
Göteborg Energi AB
Helsingborg Energi AB
Lunds Energi AB
NUTEK

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Johan Rietz

Summary

A study concerning three-way catalysis in gas fired stationary installations has been conducted on the request of SGC AB - Swedish Centre of Gas Technology. Stoichiometric combustion enables an increased boiler efficiency due to the decreased flue-gas flow. Under stoichiometric conditions it is also possible to obtain an effective and simultaneous reduction of nitrogen oxides (NO_x), carbon monoxide (CO) and unburned hydrocarbons (UHC) through installation of a three-way catalyst. The study contains a detailed evaluation of three-way catalysis in a micro-scale boiler (0.5 - 2.5 kW_t) and a feasibility study of the concept, performed in a commercial boiler (20 kW_t).

The experiments show that it is possible to combust natural gas at stoichiometric conditions without excessive soot-formation. Through installation of an oxygen-sensor in the flue-gas channel it was possible to regulate the combustion process within a very narrow window around the well-known λ -window of three-way catalysis, i.e. the λ -value varied according to: $\lambda = 1.000 \pm 0.01$.

Installation of a three-way catalyst containing Pd/Rh as active materials, enabled a 90% reduction of the NO_x -emissions at a space velocity of 200 000/h.

Due to poor mixing of the flue gases close to the burner, the λ -window was broadened, which enabled a 20 - 40% reduction of the NO_x -emissions at λ -values as high as 1.05 - 1.2. The poor mixing, however, also resulted in a deficient CO-reduction which led to high CO-emissions.

In order to achieve an effective NO_x -reduction (>90%), low CO-emissions (<10 mg/MJ) and an increased boiler efficiency (1-2%), a system containing three-way catalysis (TWC), secondary air injection (SAI) and an oxidation catalyst (OC) can be used. The combustion should be conducted under slightly fuel-rich conditions ($\lambda = 0.99$ -1.000) to guarantee an effective utilisation of the TWC. The SAI/OC-system is installed at the flue-gas outlet and SAI is supplied at a flow rate corresponding to 1-2% of the total flue-gas flow. The unburned compounds are effectively combusted in the OC and temperature difference of the OC can be used to regulate the combustion process. The temperature difference of the OC should be around 20°C during operation.

An economic evaluation shows that the pay-off time of an TWC/SAI/OC-installation will be between 0.5 and 2 years provided that the boiler-installation is subjected to NO_x-charges.

Continued work will focus on larger installations (2 - 5 MW) where long-time evaluations will be performed.

Sammanfattning

I föreliggande studie har effekterna av trevägskatalys i gaseldade installationer utvärderats. Genom att sänka luftöverskottet vid förbränningen så att stökiometriska förhållanden uppnås, minskar rökgasförlusterna samtidigt som förutsättningar finns för en samtidig reduktion av kväveoxider (NO_x), kolmonoxid (CO) och kolväten (HC) genom trevägskatalys. I studien ingår dels en detaljerad utvärdering av trevägskatalys i en minipanna (0.5 - 2.5 kW) och dels ett koncepttest som utförts i en kommersiell villapanna (ca 20 kW).

Studien visar att det är möjligt att förbänna naturgas under stökiometriska förhållanden utan att problem uppstår med sotning eller bristfällig flamstabilitet. Genom installation av syresensor i rökgaskanalen har det varit möjligt att styra förbränningen inom ett mycket snävt intervall kring stökiometrisk förbränning, ($\lambda=1.000\pm0.01$), vilket är ett krav för en effektiv trevägskatalys.

Genom insats av en nätbaserad trevägskatalysator innehållande Pd/Rh som aktivt material uppnåddes en 90%-ig reduktion avseende NO_x vid en flödesbelastning motsvarande ca 200 000 katalysatorvolymeter per h.

Beroende på rökgasinhomogeniteter nära brännaren observerades en breddning av λ -fönstret där trevägskatalys kan utnyttjas. Detta resulterade i att en viss NO_x -reduktion (20 - 40%) kunde uppnås även i det överstökiometriska området ($\lambda=1.05 - 1.1$). Beroende på rökgasinhomogeniteterna visade det sig dock inte möjligt att nå acceptabla nivåer på CO-emissionerna vid stökiometrisk förbränning.

För att erhålla en effektiv NO_x -reduktion (>90%) med låga CO-emissioner (< 10 mg/MJ) och en ökad pannverkningsgrad (1-2%) föreslås ett system där förbränningen sker svagt understökiometriskt ($\lambda=0.99 - 1.000$). Härigenom säkerställs ett effektivt utnyttjande av trevägskatalysatorn och en hög NO_x -reduktionsgrad. Omedelbart före skorstenen installeras ett system för sekundärluftsinjektion (1-2% av totalflödet) följt av en oxidationskatalysator. I oxidationskatalysatorn nedbringas emissionerna av oförbrända komponenter till acceptabla värden samtidigt som temperaturdifferensen (optimalt ca 20°C) över katalysatorn kan utnyttjas för styrning av förbränningen.

En ekonomisk värdering ger vid handen att katalysatorinstallationen, beroende på nyttjandetid för anläggningen, återbetalas på 0.5 - 2 år förutsatt att anläggningen omfattas av systemet för NO_x -avgifter.

Fredrik A. Silversand
Katator AB

19 december 1997

Den avslutade studien bör följas av en demonstrationsinstallation i en anläggning på 2 - 5 MW, varvid också långtidsförsök kan utföras.

Innehåll

<i>Avsnitt</i>	<i>Sida</i>
1. Inledning	1
2. Bakgrund	2
3. Syfte och målsättning	12
4. Utrustning	13
5. Studiens genomförande	16
6. Resultat från försök i minireaktor	17
6.1 Grundemissioner av NO _x i minireaktorn	17
6.2 Studie av olika katalysatoralternativ	19
6.3 Flödets inverkan	21
6.4 Effekter av katalysatortemperatur och inhomogeniteter	22
6.5 Dynamiska försök	23
6.6 Försök med sekundärluftstillsats + oxidationskatalysator	24
6.7 Slutsatser	26
7. Resultat från försök i kommersiell panna	27
7.1 Grundemissioner	27
7.2 Reduktionsgrad med trevägskatalys	28
7.3 Inverkan av katalysatormängd	29
7.4 Effekter av sekundärluftsinjektion och oxidationskatalysator	29
7.5 Förenklad metod för styrning av bränsletillförseln	30
7.6 Verkningsgradsberäkningar	31
7.7 Slutsatser	32
8. Diskussion och ekonomisk analys	33
9. Fortsatta studier	36
10. Litteratur	38

1. Inledning

Katator AB har på uppdrag av Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) undersökt möjligheterna att implementera trevägskatalys i gaseldade pannor för att reducera kväveoxidemissionerna (NO_x) och öka pannverkningsgraden. NO_x -reduktionen åstadkoms genom en katalytisk reaktion mellan kväveoxiderna och olika reducerande komponenter i rökgaserna (främst CO och H_2) medan den ökade pannverkningsgraden uppnås genom det minskade rökgasflödet då luftöverskottet sänks.

Trevägs-katalys kan endast utnyttjas inom ett snävt fönster nära stökiometrisk förbränning ($\lambda=1 \pm 0.005$), varför stora krav ställs på den utrustning som kontrollerar och styr bränsletillförseln. Erfarenheter avseende trevägs-katalys kan hämtas från automotiva tillämpningar, där tekniken utnyttjats i över 20 år. I dessa sammanhang utnyttjas en syresensor (λ -sond) för att styra bränsletillförseln varvid en god reningsgrad kan uppnås. Automotiva tillämpningar kännetecknas av kraftigt instationära förhållanden avseende gasflöde, temperatur och rökgassammansättning, vilket ställer extrema krav på styrningens respons. Stationära förbränningsanläggningar, å andra sidan, har en väsentligt stabilare driftkaraktäristik, vilket medför att styr/regler-systemets utformning sannolikt kan förenklas.

En traditionell trevägs-katalysator består av en ädelmetallbelagd monolit, vilken generellt arbetar vid ett flöde motsvarande ca 60 000 rektorvolymeter per timme. Nackdelen med monolitbaserade katalysatorer är att de inte på något enkelt sätt kan anpassas till de geometriska begränsningar som föreligger i pannor. Katator AB har utvecklat en metod för framställning av katalytiskt aktiva nätstrukturer. Dessa kan enkelt anpassas till olika panngeometrier samt ger en rad följdfördelar, t. ex. höga mass- och värmeöverföringstal, lågt tryckfall samt hög termisk och mekanisk hållfasthet. De undersökningar som presenteras i denna studie har inriktats på nätkatalysatorer. Studien innehåller två delar: a) framtagande av designunderlag för nätbaserade trevägs-katalysatorer samt b) koncepttest utförd i en kommersiell villapanna.

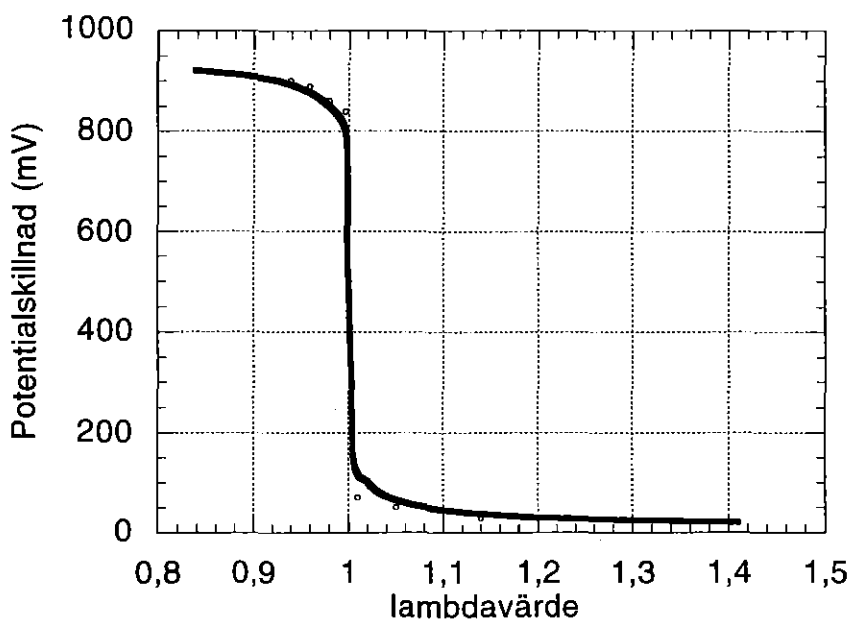
Baserat på erfarenheterna från denna studie är avsikten att utnyttja tekniken i förbränningsanläggningar som f.n. omfattas av systemet för NO_x -avgifter.

2. Bakgrund

Trevägs-katalys och λ -fönster

Trevägs-katalys innebär att NO_x reagerar med kolmonoxid (CO), vätgas (H_2) och kolväten (HC) över en katalysator i syrefri miljö. Om syre finns närvarande i gasblandningen sker företrädesvis en reaktion mellan syre och rökgasernas reducerande komponenter (CO, H_2 och HC), varvid NO_x -emissionen förblir opåverkad.

För att åstadkomma stökiometrisk förbränning kan en syresensor (λ -sensor) installeras i rökgaskanalen. I λ -sensorn mäts den elektriska potentialen över en ädelmetallbelagd (Pt) keramisk kropp (ZrO_2) som på ömse sidor utsätts för luft respektive rökgaser. I syrerik miljö erhålls en mycket låg potentialskillnad (<50 mV) över sensorn. Vid $\lambda=1$ erhålls en språngvis ökning av potentialskillnaden till drygt 800 mV. Vid fortsatt minskning av λ -värdet sker sedan en ytterligare långsam ökning av potentialskillnaden. För att λ -sensorn skall fungera krävs att den värms till drygt 350°C , antingen passivt i rökgasströmmen eller resistivt via en värmetråd, som i vissa fall installerats i sensorerna. I föreliggande studie har en resistivt uppvärmd λ -sensor från Bosch utnyttjats. Figur 1 visar hur potentialskillnaden varierar som funktion av λ -värdet för denna sensor vid naturgasförbränning.

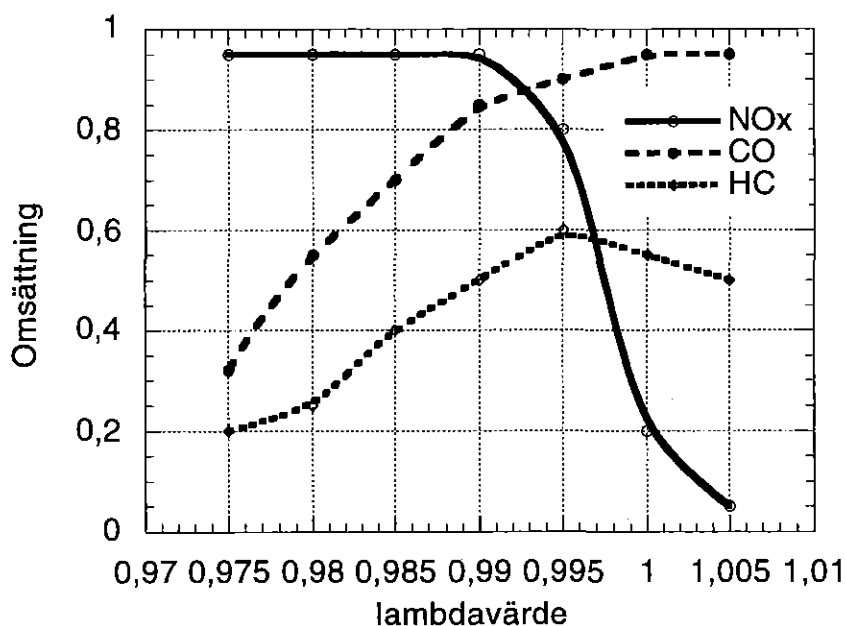


Figur 1 Potentialskillnad som funktion av λ -värdet
Sensor voltage vs. excess-air factor, λ

λ -sensorns respons är mycket snabb, speciellt kring den stökiometriska punkten, där förändringen i syrehalt detekteras inom 0.01 s [1]. Beroende på den branta karakteristiken vid $\lambda=1$ är det svårt att erhålla en distinkt styrauktoritet för gas-ventilen. I praktiska sammanhang löses detta genom att man låter λ -värdet pendla mellan en "bränslerik" och en "bränslefattig" nivå, d.v.s. λ -värdet pendlar inom λ -fönstrets gränser ($\lambda = [0.995, 1.005]$). För att förbättra katalysatorns egenskaper under oscillerande driftförhållanden kompletteras ädelmetallerna med ett synergistiskt metalloxidsystem för lagring av syre och NO_x . Under bränslerika förhållanden används härvid lagrat syre och NO_x för att förbränna CO , H_2 och HC . Under bränslefattiga förhållanden sker adsorption av syre och NO_x samtidigt som de brännbara komponenter som adsorberats på ädelmetallen förbränns. För att nå en optimal effekt av det synergistiska metalloxidsystemet måste mängden metalloxid stå i proportion till den frekvens och amplitud med vilken oscillationerna kring $\lambda=1.000$ sker.

Trevägs-katalysatorn består av en lämplig bärarematris, som försetts med ett keramiskt överdrag med hög specifik yta (m^2/g) samt belagts med en lämplig kombination av ädelmetaller. Vid rening av bilavgaser utnyttjas i allmänhet monoliter, vilka består av keramiska block med ett stort antal parallella kanaler, oftast i storleksordningen 320 000 - 640 000 kanaler per kvadratmeter tvärsnittsytan.

Monolitens kanaler har försetts med ett keramiskt överdrag (täcksikt) genom ett slamgjutningsförfarande. Tjockleken på detta skikt ligger generellt i intervallet 25 - 50 μm . Täcksiktet har sedan belagts med en blandning av ädelmetaller (oftast en blandning av Pt och Rh) i en halt motsvarande ca 2 g/l monolit. Utöver ädelmetallerna innehåller trevägskatalysatorn ett antal metalloxider som har syre- och NO_x -lagrande egenskaper. För syrelagring används oftast CeO_2 eller MnO_2 medan BaO och SrO visats sig ha goda NO_x -lagrande egenskaper. Normalt dimensioneras en trevägskatalysator för ett flöde på ca 60 000 reaktorvolym per timme, vilket innebär ca 1 l trevägskatalysator per l cylindervolym i automotiva tillämpningar. I figur 2 redovisas hur reduktionsgraden av CO, HC och NO_x varierar kring $\lambda=1$ vid avgasrening på naturgasdrivna fordon [2].



Figur 2 Omsättning av NO_x , CO och HC som funktion av λ -värdet vid trevägskatalys (naturgasförbränning)
Conversion of NO_x , CO-, and HC vs. the excess-air factor, λ , during three way catalysis (natural gas combustion)

Som framgår ur figuren erhålls en närmast språngvis minskning av NO_x -emissionen vid $\lambda=1$. Då λ -värdet minskas ytterligare sker, å andra sidan, en tydlig ökning av CO-och HC-emissionerna. Ur figuren kan man observera att λ -fönstret är något förskjutet mot bränslefeta förhållanden ($\lambda \approx 0.99 - 0.995$), vilket är typiskt för trevägskatalys i naturgassammanhang.

Tidigare studier inom området

Huvuddelen av studierna inom området trevägskatalys har inriktats mot automotiva tillämpningar medan erfarenheterna från stationära förbränningsanläggningar är bristfälliga.

Anledningen till att trevägskatalys hittills inte implementerats i stationära förbränningsanläggningar förklaras kanske främst av de speciella geometriska förhållanden som råder i pannor och som gör det svårt att installera monolitbaserade katalysatorer. Vidare finns ingen tradition av att komplicera och fördyra brännareutformningens arrangemang för styrning av bränsle/luft-förhållandet. Dessutom anses förbränning nära $\lambda=1$ kunna resultera i en försämrad förbränningsprocess med risk för kraftigt ökade emissioner av CO och HC samt sotning.

Katator AB har inom ramen för projektet genomfört en omfattande litteratursökning avseende trevägskatalys i förbränningsanläggningar, bl.a. i databaser som Energy, Compendex och Chemical Abstract men endast funnit ett fåtal referenser som beskriver tillämpningsområdet (2 st). En utökning av sökprofilen till att även omfatta automotiva tillämpningar resulterade å andra sidan i en enorm mängd referenser (1000-tals).

J. J. Steringa m. fl. från Gasunie i Nederländerna har undersökt effekterna av trevägskatalys i rekuperativa strålningsbrännare (15 - 30 kW) med höga grundemissioner av NO_x [3]. I detta fall placerade man en konventionell bilavgaskatalysator i rökgasströmmen från strålningsbrännaren, varvid katalysatortemperaturen varierade mellan 350 och 650°C. Syreöverskottet uppmättes med en λ -sensor och utsignalen från denna användes för att styra bränsletillförseln. Försöken visade att reduktionsgrader på 90% eller mer m.a.p. NO_x kunde uppnås om λ -värdet låg under 1.001. Vid $\lambda=1.000$ låg reduktionsgraden på ca 98% samtidigt som CO- och HC-emissionerna var försumbara (anges till 0 ppm). Eftersom flödet endast motsvarade ca 20 000 reaktorvolym per timme var katalysatorn kraftigt överdimensionerad, vilket förklarar de relativt höga omsättningsnivåerna. I studien ingick också ett långtidstest, varvid en tydlig prestandaförsämring kunde observeras. Vid efterkontroll fann man dock att katalysatorn varit utsatt för extrem överhettning (monoliten hade till viss del smält), varvid termisk deaktivering skett.

M. Orjala från VTT i Finland utrustade en eldrörspanna med en naturgaseldad brännare på 50 kW samt en trevägskatalysator [4]. Trevägskatalysatorn placerades efter en värmeväxlare varvid rökgastemperaturen kunde sänkas till intervallet 150 -

500°C. Katalysatorn utgjordes i detta fall av en metallmonolit av fabrikat Kemira OY. Tyvärr anges inte flödesbelastningen över katalysatorn, men NO_x-reduktionsgrader på nära 100% uppnåddes inom ett viss driftfönster.

I båda dessa studier har konventionella trevägskatalysatorer baserade på monolitiska strukturer och Pt/Rh som aktivt material använts. Det är välkänt att Pt är väsentligt mindre effektiv på att förbänna metan än Pd samtidigt som den termiska stabiliteten hos Pt är sämre än den hos Pd. Enligt McCarty m. fl. är en katalysator innehållande Pd som aktiv komponent tillsammans med MnO₂ som syrelagrande komponent effektiv och högtemperaturstabil vid trevägskatalys i naturgasdrivna fordon [5]. Genom att ersätta Pt med Pd reduceras också katalysatorkostnaden i viss utsträckning.

Enligt Summer m. fl. erbjuder Pd ett stort antal fördelar framför Pt/Rh, som normalt används i trevägskatalysatorer [6]:

- Lägre kostnad
- Överlägsen reduktion av HC
- Högre termisk stabilitet och bättre kallstartegenskaper

Motsvarande erfarenheter av Pd i trevägskatalysatorer redovisas av Yamada m. fl. [7], som speciellt studerat skillnaderna mellan Pd/Rh- och Pt/Rh-katalysatorer då det gäller HC-reduktion inom λ -fönstret. Pd/Rh ger härvid bättre HC-reduktion än Pt/Rh.

Typiska emissioner vid flamförbränning samt möjlig reduktionsgrad med trevägskatalys

Kväveoxidemissionerna från äldre gaseldade pannor ligger oftast i storleksordningen 50 - 100 mg/MJ [8]. I moderna anläggningar installeras vanligen olika typer av låg-NO_x-brännare, vilket möjliggör sänkta NO_x-emissioner till intervallet 10 - 40 mg/MJ [9]. I tabell 1 redovisas typiska NO_x-emissioner från olika typer av moderna gaseldade installationer [9].

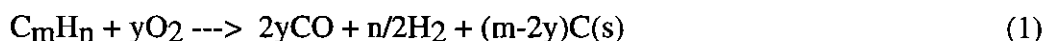
Tabell 1 NO_x-emissioner från olika gaseldade installationer
NO_x-emission from different gasfired installations

Installation	NO _x -emission (mg/MJ)
Panna med atmosfärsbrännare	15
Varmvattenberedare	30
Ång-/hetvattenpannor + låg-NO _x -brännare	15 - 30
Rekuperativa brännare	20 - 125

Genom att implementera trevägskatalys i det äldre pann/brännare-beståndet är det möjligt att reducera NO_x-emissionerna till under 10 mg/MJ. För modernare pannor/brännare kan NO_x-reduktionen drivas ännu längre. Detta innebär att vissa av de anläggningar som i dag är NO_x-avgiftsbelagda istället kan få åtnjuta en avgiftsrestitution.

Möjliga problemområden

Förbränning vid låga syrenivåer kan medföra kraftigt ökade utsläpp av CO och HC samtidigt som risken för sotbildning ökar, speciellt om bränslet innehåller tyngre kolväten (t. ex. långa alifatiska kolväten eller aromater). B. S. Haynes m. fl. har gjort en omfattande studie avseende sotbildning vid förbränning av olika bränslen [10]. Betrakta nedanstående reaktion (1):



En termodynamisk betraktelse ger vid handen att sot endast borde bildas då $m > 2y$, d.v.s. då C/O-förhållandet blir större än 1. Experiment har dock visat att sot börjar bildas långt tidigare eller i samband med att flammans luminiscens ökar. Detta inträffar typiskt vid ett C/O-förhållande kring 0.5. I tabell 2 redovisas kritiska C/O-förhållanden för sotbildning för olika bränslen då förbränningen sker i en Bunsenbrännare. Likvärdiga resultat erhålls också i andra typer av brännare.

Tabell 2 Kritiska C/O-förhållanden för sotbildning [10]

Limits of soot formation

Bränsle	C/O-förhållande vid begynnande sotbildning		C/O-förhållande vid $\lambda=1.000$
Metan	0.45	>	0.25
Etan	0.47	>	0.29
Propan	0.53	>	0.3
Eten	0.61	>	0.33
Acetylen	0.83	>	0.4

Som framgår ur tabellen bör risken för sotbildning vara liten vid stökiometrisk förbränning ($\lambda=1$) av de flesta gasformiga bränslen, förutsatt att bränsle/luft-blandningen är homogen vid förbränningen. I fallet med vätskeformiga bränslen sker sotbildningen i kontaktytan mellan vätskedropparna (aerosoldropparna) och förbränningsluften (diffusiv förbränning), varvid sotbildning i detta fall sker även vid $\lambda>1$ (oljeflammor är gula!). I sådana fall är det förenat med svårigheter att utnyttja trevägskatalys eftersom katalysatorn då kommer att beläggas med sotpartiklar och härigenom deaktiveras.

De kraftigt ökade grundemissionerna av CO och HC reduceras i trevägskatalysatorn. Om dess kapacitet är otillräcklig kan en oxidationskatalysator med separat sekundärluftsinjektion placeras efter trevägskatalysatorn.

λ -sondstyrningen i sig kommer inte att innebära några problem eftersom tekniken är dokumenterad och noggrant utredd i ett stort antal studier.

Kostnaden kan utgöra ett problem i små anläggningar. λ -sonden och tillhörande regulatorutrustning bedöms kosta i storleksordningen 10 kSEK. Kostnaden för trevägskatalysatorn är avhängig anläggningens utformning och storlek samt av reduktionsgraden men bör ligga i intervallet 15 - 30 kSEK per MW installerad effekt. Ytterligare kostnader kan i vissa anläggningar uppkomma för sekundärluftsinjektion och oxidationskatalysator.

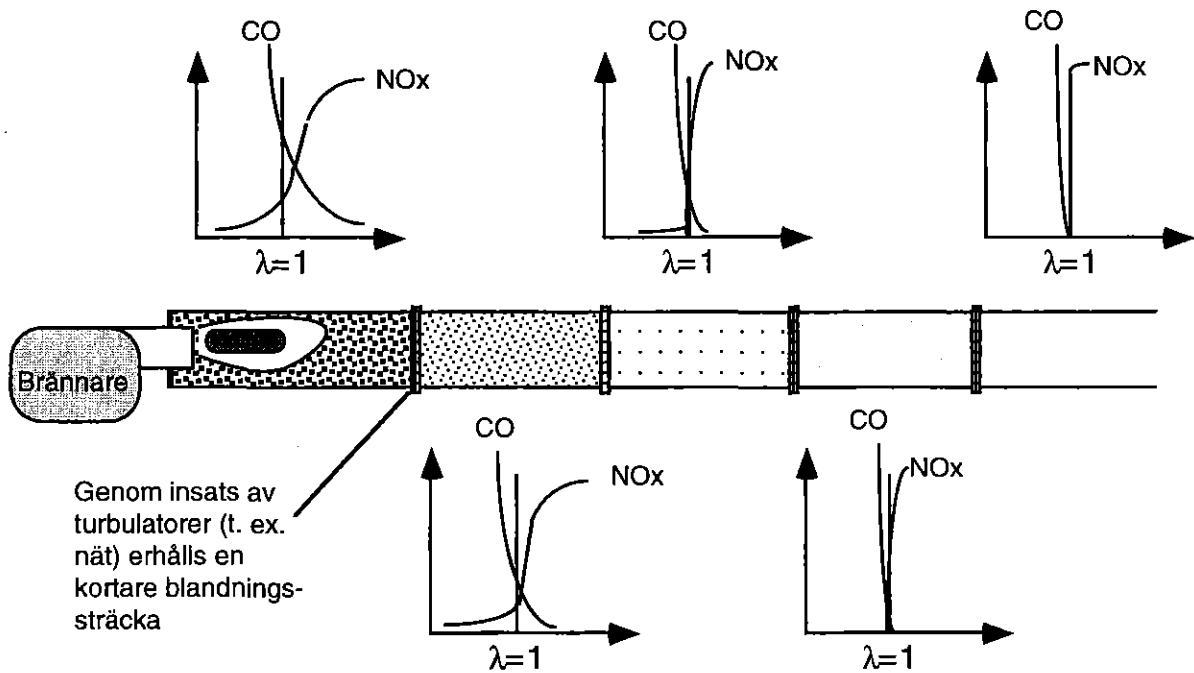
Systemkonstruktion och konceptutformning

Nätkatalysatorn erbjuder en stor geometrisk flexibilitet och möjliggör en rad olika placeringar och arrangemang. Man kan skilja mellan tre huvudtyper av installationer:

- a) Stökiometrisk förbränning + trevägskatalysator
- b) Förbränning vid $\lambda < 1.000$ + trevägskatalysator + sekundär luftinjektion + oxidationskatalysator
- c) Normal förbränning ($\lambda = 1.1 - 1.2$) + sekundär bränsleinjektion + trevägskatalysator + sekundär luftinjektion + oxidationskatalysator

Dessa huvudtyper av installationer har olika applikationsområde och kompletterar därför varandra. Den tekniska komplexiteten och kostnaden ökar från alternativ a) till c), men tillförlitlighet och prestanda förbättras samtidigt.

Alternativ a) förutsätter en mycket exakt och noggrann kontroll av λ -värdet, vilket endast kan åstadkommas med en syresensor som installerats i röksgaskanalen. Detta alternativ förutsätter vidare att rökgasblandningen är fullständigt homogen, vilket sällan är fallet i förbränningsanläggningar – åtminstone inte i en position nära förbränningsrummet. Om rökgasammansättningen är inhomogen sker en breddning av λ -fönstret samtidigt som reduktionsgraden för CO/H₂ och HC kraftigt försämras. I figur 3 visas effekterna av röksgasinhomogeniteter på reduktionen av NO_x och CO. För att åstadkomma en samtidig och effektiv reduktion av samtliga komponenter krävs att katalysatorn placeras långt ifrån brännaren så att rökgaserna hinner homogeniseras via turbulent och molekylär diffusion alternativt via turbulatorer som kan installeras, jfr. figuren.

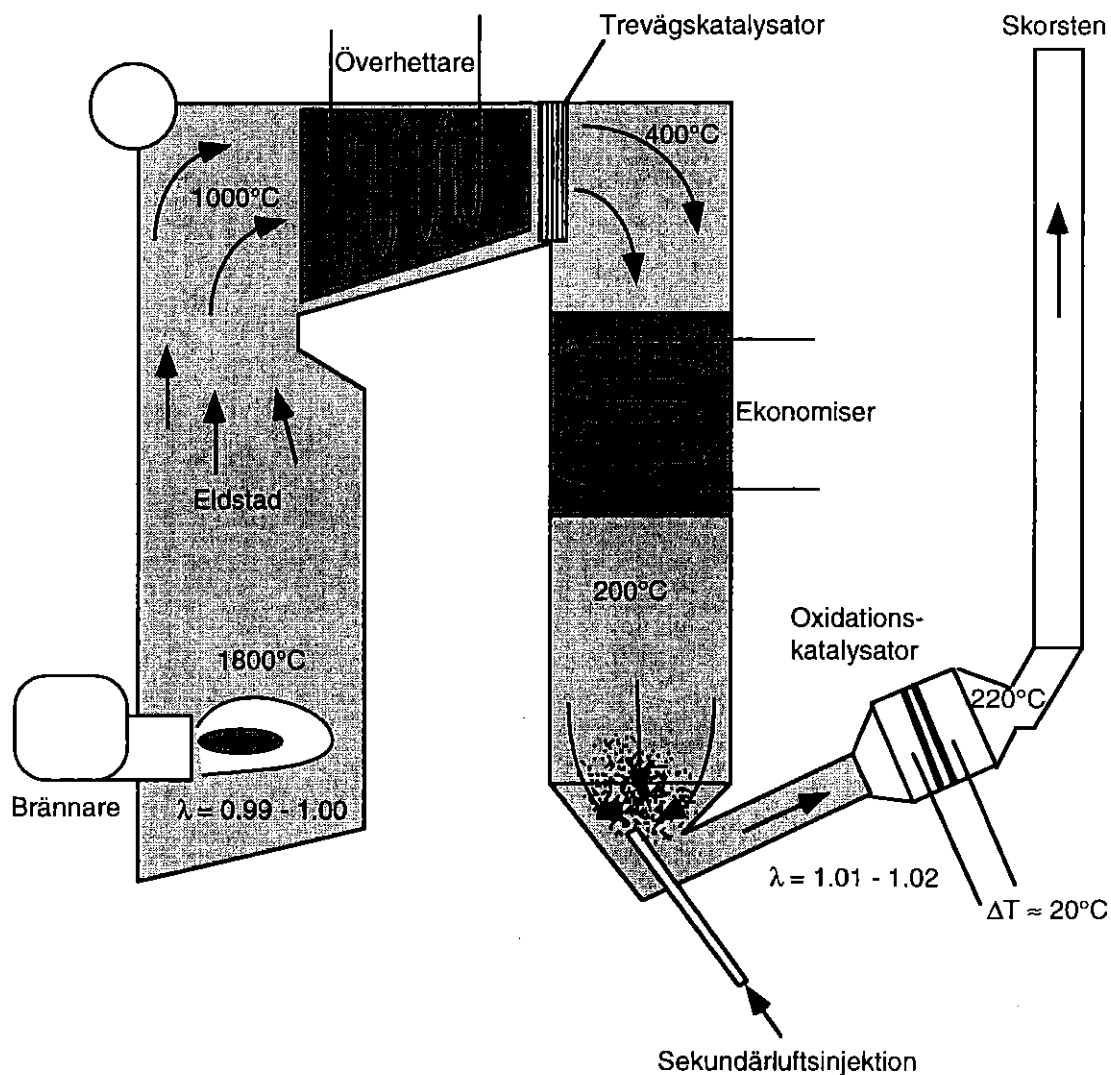


Figur 3 Effekterna av olika placering av trevägskatalysatorn
Reduction level at different catalyst positions along the flue-gas channel.

Detta innebär att katalysatorn måste placeras efter kyltorna eller mycket nära skorstenen, varvid temperaturnivån kan bli för låg för trevägskatalys.

Alternativ b) tar sin utgångspunkt i att rökgasinhomogeniteter faktiskt existerar nära brännaren varvid det gäller att driva NO_x -reduktionen så lång som möjligt i trevägskatalysatorn. Genom att förbränningen få ske något understökiometriskt förbrukas allt syre och trevägskatalysatorn kan ge en mycket hög reduktionsgrad m.a.p. NO_x . Efter trevägskatalysatorn injiceras sekundärluft (motsvarande några procent av totalflödet), varefter rökgasblandningen får passera genom en oxidationskatalysator där olika brännbara komponenter effektivt oxideras. Eftersom de brännbara komponenter som existerar efter trevägskatalysatorn främst utgörs av CO och H_2 (HC sönderdelas under syrefattiga förhållanden i trevägskatalysatorn), kan förbränning ske vid temperaturer i intervallet 150 - 200°C, d.v.s. vid en normal rökgastemperatur. Genom att mäta temperaturdifferensen över oxidationskatalysatorn kan man säkerställa en effektiv NO_x -reduktion i trevägskatalysatorn (i detta fall krävs alltså ingen λ -sensor!). NO_x -reduktionen är effektiv då CO/ H_2 -halterna i rökgaserna från brännaren ligger i storleksordningen 1000 ppm eller högre, vilket innebär en temperaturökning på ca 20°C över oxidationskatalysatorn. Eftersom rökgasflödet genom pannan minskas genom nedjusteringen

av λ -värdet från 1.2 till 1.0 erhålls en ökning av pannverkningsgraden på några procent. Temperaturökningen över oxidationskatalysatorn medför att ungefär 50% av denna verkningsgradsvinst går förlorad om inte förbränningsvärmets kan tas om hand. Utrustningen för sekundärluftsinjektion respektive oxidationskatalysatorn placeras i en position omedelbart före skorstenen. Genom utnyttjande av katalytiska nät kan denna installation göras extremt kompakt varför eventuella problem med geometriska begränsningar undviks, jfr. figur 4.



Figur 4 Trevägs-katalys med sekundärluftsinjektion och oxidation i en ångpanneinstallation
Three-way catalysis with secondary air injection and oxidation

Alternativ c) är mest generellt av samtliga systemutformningar och kan i princip utnyttjas i alla tänkbara installationer och för alla bränslen (även fasta bränslen). I detta fall låter man förbränningen ske vid luftöverskott, varvid problem med

sotning och ökade CO-och HC-emissioner undviks. Genom att tillsätta ytterligare gasformigt bränsle (så att allt syre förbrukas) i en position efter brännaren och låta rökgasblandningen passera genom trevägskatalysatorn erhålls en effektiv NO_x -reduktion. Rester av oförbrända komponenter tas därefter hand om i ett system innefattande sekundärluftsinjektion och katalytisk oxidation, likvärdigt med alternativ b) enligt ovan. Beroende på likheterna med konventionella reburningsystem har vi valt att kalla detta koncept för katalytisk reburning ("catalytic reburning").

3. Syfte och målsättning

Målsättningen med utvecklingsprojektet kan uttryckas enligt följande:

"Att uppnå en väsentlig reduktion av NO_x -emissionen från gaseldade anläggningar med vidmakthållen eller ökad pannverkningsgrad genom installation av en nätbaserad trevägskatalysator."

Med väsentlig reduktion avses här en reduktionsgrad motsvarande lägst 90%. NO_x -emissionen från kommersiella pannor av äldre design ligger ofta i storleksordningen 50 - 100 mg/MJ, vilket innebär att NO_x -emissionen skall sänkas till intervallet 5 - 10 mg/MJ.

Under förutsättning att rökgasernas innehåll av brännbara komponenter inte ökar samt att rökgastemperaturen vidmakthålls, kan rökgasförlusterna minskas till följd av att rökgasflödet blir lägre då λ -värdet vid förbränningen sänks. Den minskade rökgasförlusten medför att pannverkningsgraden bör kunna ökas med någon eller några procent.

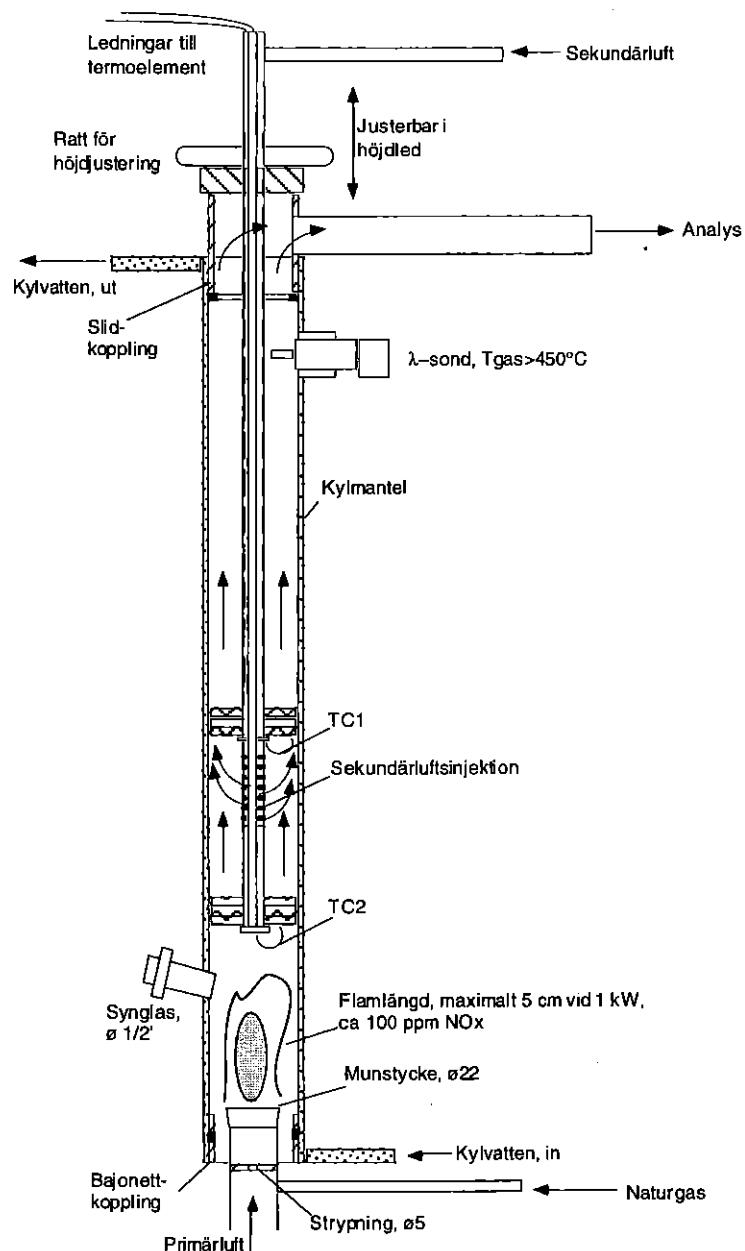
Syftet är att utnyttja kunskapen från denna studie vid dimensionering och installation av katalytiska nät i sådana gasinstallationer som omfattas eller kommer att omfattas av systemet för NO_x -avgifter.

4. Utrustning

Laboratorieutrustning

Ett minireaktorsystem enligt figur 5 har utnyttjats i studien. Försöksutrustningen består av ett mantlat rör, vilket kyles av kylvatten som strömmar längs mantelytan. I rörets nedre del installeras en brännare, där naturgas/luft kan förbrännas (effekt 500 - 2500 W). Ett synglas har installerats för att kunna göra visuella studier av flammans kvalitet vid olika luftöverskott. Katalysatorn appliceras på en gängad axel varvid katalysatorns höjd över flammans topp kan justeras för att uppnå ett lämpligt temperaturintervall. Sekundärluft kan injiceras via den gängade axeln, varvid ett andra katalysatorlager kan installeras ovanför sekundärlufttillförseln för att åstadkomma en effektiv slutförbränning av HC/CO om detta visar sig nödvändigt. Temperaturen mäts med termoelement (typ J), vilka ligger i termisk kontakt med katalysatornäten. Katalysatornäten utformas som cirkulära ($\varnothing$ 40 mm), veckade skivor, vilka kan staplas ovanpå varandra. En λ -sond, för identifiering av stökiometrisk förbränning samt för styrning av bränsletillförseln, installeras i reaktorns övre del.

Rökgassammansättningen analyseras m.a.p. O₂ (elektrokemisk cell), CO (NDIR), CO₂ (NDIR), metan (NDIR) samt NO_x (kemiluminiscens).



Figur 5 Laboratorioreaktor
Experimental set up

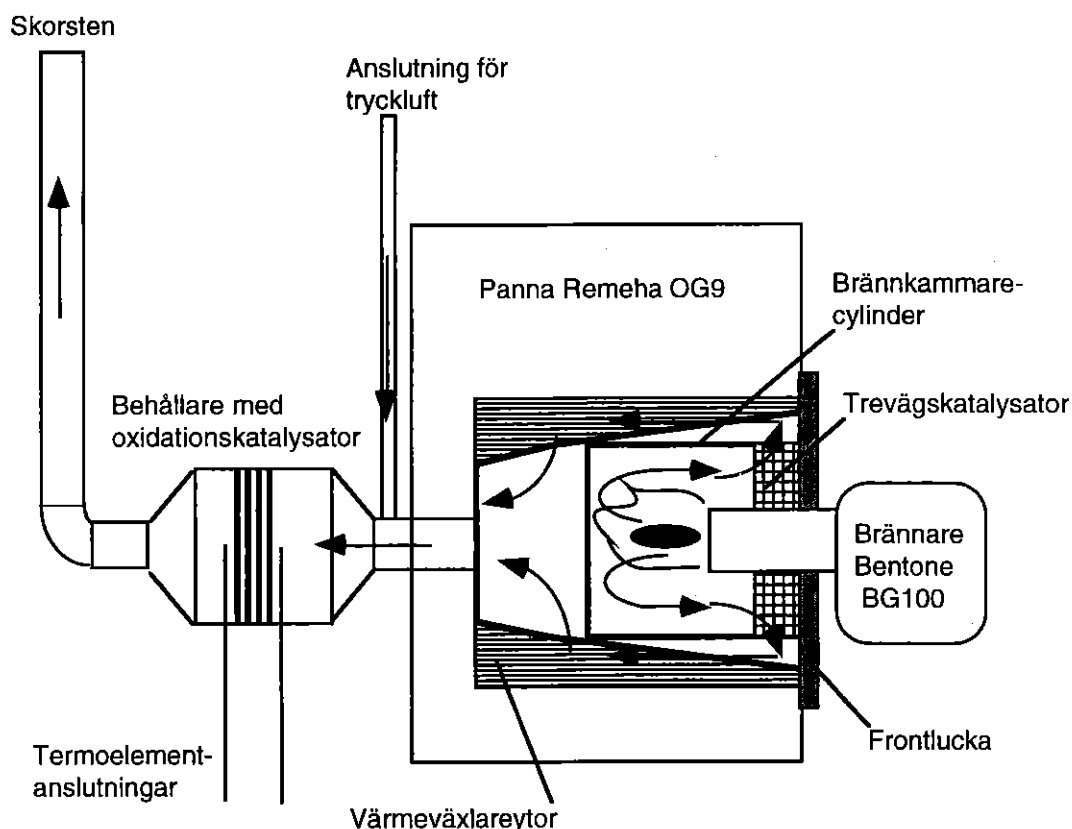
Panna/brännare

Vid fullskaleförsöken har en kommersiell panna (Remeha OG9 - 17 kW) utnyttjats tillsammans med en brännare av fabrikat Bentone (BG 100 - 7 - 40 kW).

Brännaren är monterad i en lucka och förbränningsrummet är utformad som en cylindrisk behållare, jfr. figur 6. Rökgaserna tvingas vända i den cylindriska behållaren och strömmar via en spalt i cylinderns framkant ut i värmeväxlaredelen

och längs kyltorna i den cylindriska värmeväxlaren. Den cylindriska värmeväxlaren är direkt ansluten till skorstenen.

För att undersöka effekterna av sekundärluftsinjektion och insats av oxidationskatalysator har pannan kompletterats med tryckluftsinjektion och behållare för oxidationskatalysator. Vid implementeringen av trevägskatalysatorn har den cylindriska behållare (ø 300 mm) som innesluter förbränningsrummet kortats med 8 cm och ersatts med ett eller flera lager av katalytiskt aktivt nät. Varje lager katalysatornät får härvid en anströmningsyta på 8 dm².



Figur 6 Skiss över panna/brännare

Figure showing boiler and burner

Pannförsöken har utförts på inst. för Värme-och Kraftteknik vid Lunds Tekniska Högskola och i samarbete med tekn. dr. M. Näslund. Rök-gassammansättningen analyserades på samma sätt som vid laboratorieförsöken, d.v.s. med avseende på O₂ (elektrokemisk cell), CO (NDIR), CO₂ (NDIR), metan (NDIR) samt NO_x (kemiluminiscens).

5. Studiens genomförande

Studien har uppdelas i ett antal delmoment enligt följande.

- A) Minireaktorförsök
 - Översiktlig litteraturstudie
 - Design/konstruktion/driftsättning av minireaktor
 - Utveckling/tillverkning av trevägskatalysator
 - Experimentella försök med katalytisk rening
- B) Försök med λ -sond
 - Marknadsinventering och upphandling
 - Implementering av λ -sond i minireaktor
 - Design/implementering av λ -sondstyrning i minireaktor
- C) Fullständigt försök i miniskala
 - Noggrann kartläggning av driftintervall för trevägskatalysator i lab.-reaktor
- D) Försök i panna, 20 kW
 - Kartläggning av grundemissioner och temperaturnivåer
 - Designberäkningar och systemutformning
 - Implementering av katalysator
 - Noggrann kartläggning av driftintervall för trevägskatalysator i gaspanna
 - Utvärdering och förslag på fortsatt arbete
- E) Rapportering

Etapp A:

Litteraturinventeringen syftar till att dokumentera om liknande försök finns presenterade i den öppna litteraturen, dels i form av tidsskriftartiklar och dels i form av patent. Litteraturstudien inriktas också på en kartläggning av eventuella problem vid utnyttjande av trevägskatalys då metan/naturgas används som bränsle. Ett minireaktorsystem för experimentella försök konstrueras i enlighet tidigare redovisad figur. Etapp A innefattar också utveckling/tillverkning av trevägskatalysator för aktuell applikation. Som aktivt material utnyttjas företrädesvis kombinationer av ädelmetallerna Pt/Rh och Pd. Ädelmetallen promteras med sällsynta jordartsmetaller, övergångsmetaller samt med alkaliska jordartsmetaller. För att nå fram till en effektiv trevägskatalysator i aktuell applikation (metanförbränning) krävs visst optimeringsarbete avseende katalysatorns exakta sammansättning. Etappen avslutas med en detaljerad kartläggning av metodens potential vid rening av rökgaser från flämförbränning av naturgas (naturgas erhålls från flaska). Studien innefattar tester som avser klarlägga katalysatorns kapacitet (flödets inverkan) och känslighet för variationer i syreöverskottet och resulterar i ett dimensioneringsunderlag.

Etapp B:

Denna etapp fokuseras på frågor som berör implementering och funktion hos λ -sonden. Målsättningen är härvid att installera en λ -sond i minireaktorn för att kunna utnyttja dess signal vid styrningen av bränsletillförseln till brännaren.

Etapp C:

En detaljerad studie avseende trevägskatalys vid λ -sondövervakad flamförbränning utförs och testerna i denna etapp utgör ett slutligt koncepttest inför försöken i gaspannan.

Etapp D:

Denna etapp inleds med en noggrann kartläggning av temperaturprofilen längs rökgasstråket samt av grundemissionerna från brännaren. Baserat på denna information och tidigare framtaget dimensioneringsunderlag avseende katalysatorn designas/tillverkas och installeras en lämplig trevägskatalysator för aktuell brännare/panna. Undersökningarna innefattar en kartläggning av driftintervallet för trevägskatalysatorn i aktuell panna. Emissionerna uppmäts under olika driftbetingelser och egenskaper som flamstabilitet och sotbildning studeras. Studien resulterar i ett klarläggande av metodens potential i en verklig applikation då katalysatorn är optimalt utformad med avseende på geometri, kapacitet och kemisk/fysikalisk sammansättning. Effekterna av sekundärluftsinjektion med efterföljande oxidationskatalysator berörs också i denna deletapp.

Etapp E:

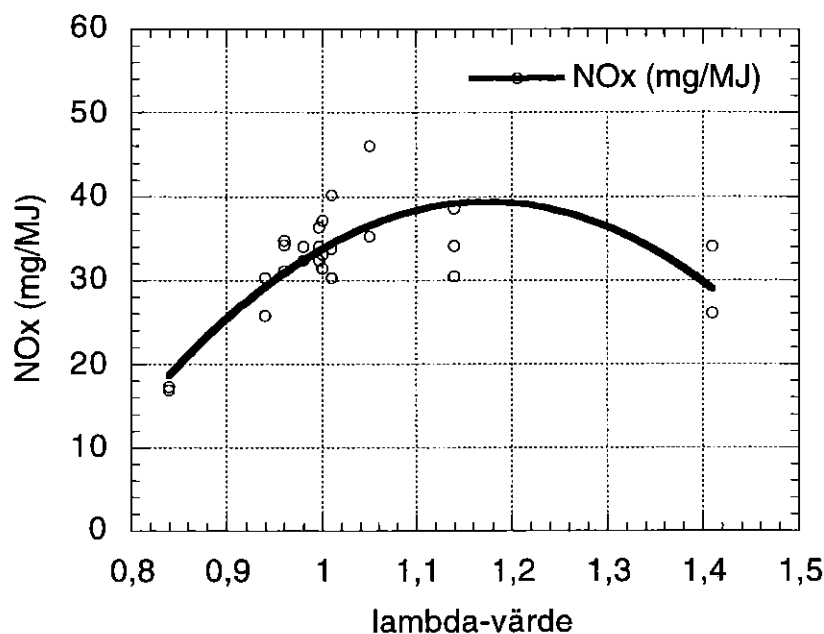
Etapp E innefattar en utvärdering av metoden samt författande av slutrapport.

6. Resultat från försök i minireaktor

6.1 Grundemissioner av NO_x i minireaktorn

För att undersöka hur stora grundemissionerna av NO_x är i minireaktorn utfördes förbränningsförsök utan trevägskatalysator. Som framgår ur figur 7 passerar NO_x -bildningen som funktion av λ -värdet genom ett maximum vid $\lambda=1.1 - 1.2$, vilket är typiskt vid förbränning. Vid understökiometrisk förbränning ($\lambda < 1$) minskar NO_x -bildningen tydligt, vilket orsakas av sänkt flamtemperatur och homogenfasreaktioner mellan NO_x och olika reducerande komponenter (t.ex. CO och H_2). Effektnivån har en viss inverkan på NO_x -bildningen. Vid höga

effektnivåer ökar effekttätheten vilket vid konstant kylning leder till en ökad flamtemperatur och högre NO_x -bildning. Vid effektnivåer på mellan 1.2 och 2.5 kW erhöles dock ingen signifikant inverkan av effektnivån i minireaktorn, varför de experimentella värdena har anpassats till en gemensam graf.



Figur 7 NO_x -emissioner från minireaktorn som funktion av λ -värde (brännareeffekt: 1.2 - 2.5 kW)
 NO_x -emission vs. the excess air factor, λ (burner effect: 1.2 - 2.5 kW), obtained in the experimental set-up

NO_x -bildningen i minireaktorn är tämligen representativ för gaseldade installationer av denna typ. Flammans kvalitet kunde studeras via synglasets och några problem med sotning eller flaminstabilitet kunde inte observeras inom intervallet $\lambda = [0.8, 1.6]$. CO-emissionen ökade kraftigt vid $\lambda < 1.05$ och uppgick till ca 5000 ppm vid stökiometrisk förbränning. Vid $\lambda = 0.85$ uppgick CO-emissionen till flera vol.%, d.v.s. partialförbränning skedde (dock utan sotning).

Rökgastemperaturen (uppmätt vid utloppet från minireaktorn) låg på drygt 300°C i samtliga mätpunkter.

6.2 Studie av olika katalysatoralternativ

Tre olika typer av trevägskatalysator undersöktes i studien:

- a) Pd/Rh på keramiskt belagd nätstruktur
- b) Pt/Rh på keramiskt belagd nätstruktur
- c) Pd/Rh + synergistiskt metalloxidsystem för O₂/NO_x-lagring på keramiskt belagd nätstruktur

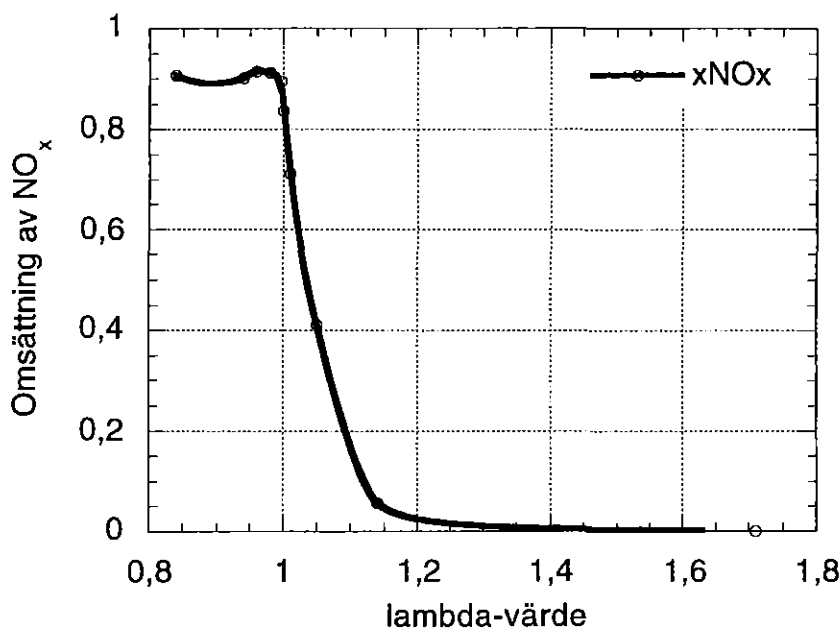
Som bärarematris användes i samtliga fall cirkulära nät (ø 40) av Kanthal (16 maskor per tum, 0.5 mm tråd), vilka belagts med 0.1 mm poröst keramiskt skikt genom en modifierad termisk sprutning. Det keramiska skiktet hade ytförstorats genom sol/gel-teknik samt stabiliserats mot termisk sintring genom silanisering.

Den totala ädelmetallhalten motsvarade 50% av monolagerkapaciteten hos det keramiska skiktet och förhållandet mellan Pd/Pt och Rh uppgick till 4:1. Ädelmetallen påfördes bärarestrukturen genom ett konventionellt torrimpregneringsförfarande.

Vid försöken placerades 4 nät i serie i reaktorn, varvid flödesbelastningen uppgick till ca 170 000 katalysatorvolym per h vid ett totalflöde på 1.2 nm³/h. I dessa försök utnyttjas således en flödesbelastning som är ca 10 ggr. högre än den som användes i tidigare refererad studie, utförd av Gasunie.

NO_x-emissionen uppmättes som funktion av λ-värdet och omsättningen kunde beräknas eftersom grundemissionerna var kända (försök utan katalysator). I figur 8 redovisas omsättningsdata för katalysatoralternativ a) enligt ovan. Som framgår ur figuren erhålls en viss NO_x-reduktion redan vid λ-värden i intervallet 1.05 - 1.15. Detta effekt beror på rökgasinhomogeniteter, vilket tidigare berörts. NO_x-reduktionen når sitt maximum (drygt 90%) vid ett λ-värde på strax under 1.000.

Katalysatortemperaturen låg vid försöken i intervallet 730 - 820°C, d.v.s. katalysatorn var placerad tämligen nära flamman.



Figur 8 Reduktionsgrad av NO_x som funktion av λ -värdet
(flödesbelastning: 167 000/h)

NO_x-conversion vs. the excess air factor, λ (SV= 167 000/h)

Breddningen av λ -fönstret till följd av rökgasinhomogeniteter kan utnyttjas för att åstadkomma en viss NO_x-reduktion vid $\lambda \approx 1.1$. I många anläggningar kan en NO_x-reduktion på 40% eller mindre vara tillräcklig för att NO_x-avgifterna skall kunna begränsas kraftigt.

CO-emissionen var lägre än 20 ppm (<7 mg/MJ) vid $\lambda = 1.1$ men ökade drastiskt vid $\lambda < 1.05$. Utsläpp av metan (eller andra kolväten) förekom endast vid $\lambda < 0.95$. Flamförbränningen säkerställer en effektiv oxidation/partialoxidation av bränslet varför andelen restkolväten i rökgaserna generellt är försumbar.

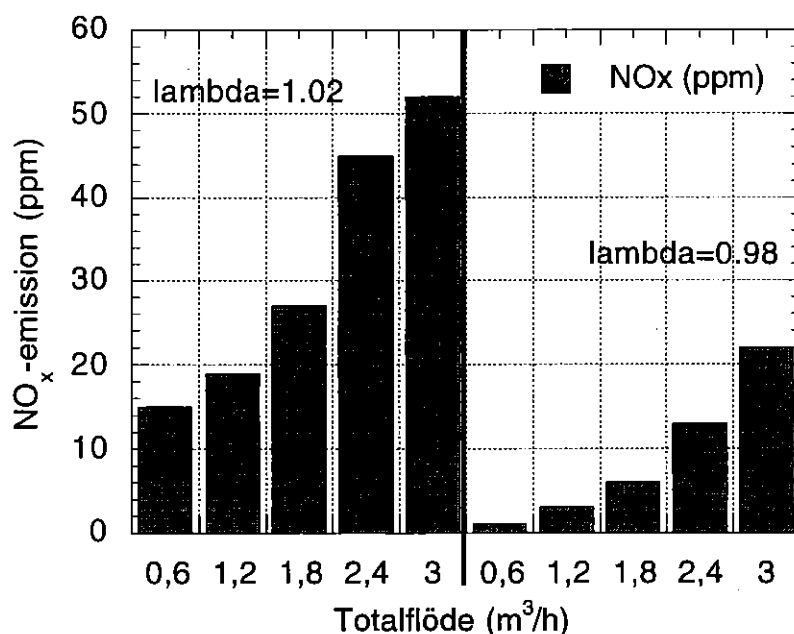
Försöken påvisade inga statistiskt signifikanta skillnader mellan de tre studerade katalysatoralternativen. Tillsats av metalloxider föreföll ge en svag (dock ej statistiskt säkerställd) aktivitetsminskning. Det fortsatta arbetet inriktades på katalysatoralternativ a) av tre anledningar.

- Billigaste katalysatoralternativet (Pd billigare än Pt)
- Pd har en väsentligt bättre temperaturtålighet än Pt
- Pd är effektivare på att förbränna eventuella rester av metan än Pt

6.3 Flödets inverkan

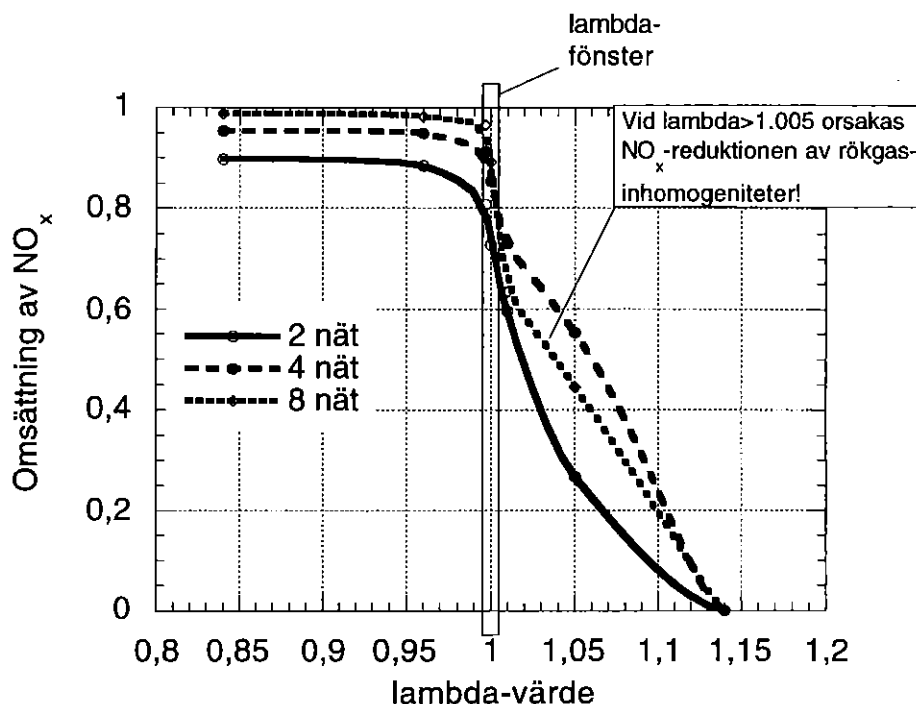
För att erhålla ett förbättrat dimensioneringsunderlag genomfördes försök vid olika värden på flödesbelastningen. Vid försöket användes katalysatoralternativ a) enligt ovan och katalysatorvolymen uppgick till 14.4 ml. I figur 9 redovisas NO_x -emissionen vid svagt under- respektive överstökiometrisk förbränning. Som framgår ur figuren erhålls en tydlig inverkan av flödesbelastningen vid såväl $\lambda=0.98$ som vid $\lambda=1.02$. En detaljerad studie ger vid handen att NO_x -reduktionen är fullständigt masstransportkontrollerad under de aktuella försöksbetingelserna.

Katalysatortemperaturen ökade som funktion av flödesbelastningen, från 650°C vid det lägsta flödet till ca 1100°C vid det högsta flödet.



Figur 9 Flödets inverkan på NO_x -reduktionsgraden
(katalysatorvolym=14.4 ml)
 NO_x -conversion vs. flow rate (catalyst volume=14.4 ml)

I figur 10 har katalysatormängden varierats vid konstant totalflöde, varvid flödesbelastningen har uppgått till 83 000 - 333 000 katalysatorvolym per h. Som framgår ur figuren är inverkan av flödesbelastningen tydligast vid understökiometrisk förhållanden. I detta område ökar omsättningen från knappt 90% till drygt 99% då flödesbelastningen sänks från 333 000/h till 83 000/h.



Figur 10 Katalysatormängdens inverkan på NO_x-reduktionsgraden
(flödesbelastning: 83 000/h, 167 000/h och 333 000/h)
NO_x-conversion vs. excess air factor at different amounts of
catalyst (SV: 83 000/h, 167 000/h and 333 000/h)

Vid överstökiometrisk förbränning är omsättningsnivåerna (med hänsyn till experimentell osäkerhet) likvärdiga. I detta område orsakas NO_x-reduktionen, som tidigare nämnts, av rökgasinhomogeniteter.

Resultaten i denna delstudie kan utnyttjas för dimensionering av katalysatorn i fullskaleförsöket.

6.4 Effekter av katalysatortemperatur och inhomogeniteter

Reduktionsgraden av NO_x ökar endast svagt med temperaturen då denna ligger över ca 300°C. Vid dessa temperaturnivåer är NO_x-reduktionen fullständigt mass-transportbegränsad, varvid främst faktorer som påverkar kontaktytan mellan katalysator och gas respektive massöverföringstalet inverkar på omsättningsnivån.

För att studera effekterna av rökgasinhomogeniteter placerades trevägskatalysatorn på olika höjd över flamman (5 cm, 10 cm, 20 cm respektive 40 cm). Det kunde

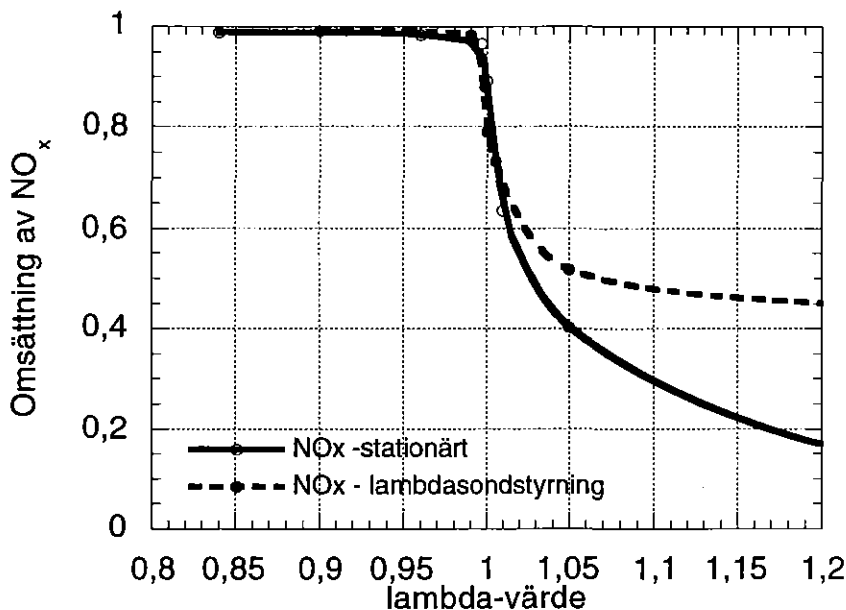
härvid konstateras att en ökad blandningssträcka ger ett snävare λ -fönster samt att katalysatorns förmåga att reducera CO-emissionerna samtidigt förbättras.

Dessa resultat överensstämmer med tidigare resonemang.

6.5 Dynamiska försök

Hittills utförda försök har skett vid stationära förhållanden m.a.p. bränsle-och luftflöde. För att studera effekterna av λ -sondstyrning fick utsignalen från sensorn styra bränsletillförseln via en PLC och ett ventilarrangemang. Beroende på den branta karakteristiken vid $\lambda=1$ för sensorn, är det förenat med svårigheter att erhålla en exakt styrning av bränsletillförseln. Detta resulterar i oscillationer kring $\lambda=1$, varvid svängningarnas amplitud och frekvens beror på styparametrarna i regulatorn. Med de parametrar som utnyttjades vid försöken erhöles en styrkarakteristik enligt: $f=0.2$ Hz och $\lambda \pm 0.01$.

Figur 11 redovisar en jämförelse mellan omsättningen av NO_x vid stationär drift och vid λ -sondstyrning. Som framgår ur figuren erhålls en identisk karakteristisk vid $\lambda < 1.02$. Vid högre λ -värden förefaller den oscillerande förbränningen gynna NO_x -reduktionen i trevägskatalysatorn något, vilket sannolikt beror på ökade rökgasinhomogeniteter i aktuell försöksutrustning.



Figur 11 NO_x-reduktion under ett dynamiskt försök
(flödesbelastning = 83 000/h)
NO_x-conversion during dynamic operation (SV = 83 000/h)

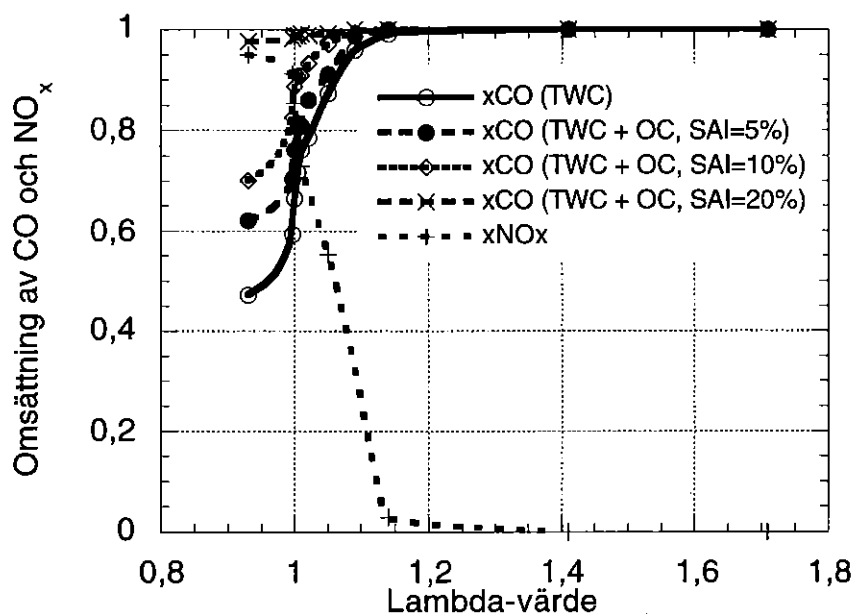
Försöken med λ -sondstyrning visar att tekniken är enkel att implementera i gasinstallationer samt att en noggrann och precis styrning av luftöverskottet vid förbränningen kan erhållas. Nackdelen består i att sensorn åldras och måste bytas efter ca 10 000 drifttimmar, vilket medför en kostnad på ca 1000 SEK. Denna kostnad är marginell i större installationer men kan vara ett problem i små anläggningar.

6.6 Försök med sekundärluftstillsats + oxidationskatalysator

Som tidigare berörts föreligger problem med ökade emissioner av CO och H₂ vid stökiometrisk förbränning. Visserligen reduceras CO-emissionerna med ca 50% vid passagen genom trevägskatalysatorn, jfr. fig. 12, men denna reduktionsgrad är otillräcklig för att uppnå en acceptabel utsläppsnivå m.a.p. CO från stationära gaseldade installationer.

Genom att installera en oxidationskatalysator i serie med trevägskatalysatorn samt tillföra sekundärluft före oxidationskatalysatorn kan CO-emissionerna minskas drastiskt. Om en tillräcklig blandningssträcka föreligger efter sekundärluftstillför-

seln krävs endast att syre tillsätts i en volym som motsvarar volymflödet av brännbara komponenter (såväl CO som H₂ förbrukar vardera en halv volymandel O₂). Eftersom blandningssträckan efter sekundärlufttillförseln var otillräcklig i mini-reaktorn krävdes kraftig överdosering av luft för att åstadkomma en signifikant reduktion av CO. I figuren redovisas omsättningen av CO vid olika nivåer på sekundärlufttillförseln. I detta fall krävs en sekundärlufttillsats motsvarande ca 20% av totalflödet för att helt eliminera CO-emissionerna vid $\lambda=1.000$



Figur 12 CO-reduktionen vid olika nivåer på sekundärlufttillförseln (flödesbelastning = 167 000/h i båda katalysatorerna)

CO-conversion at different levels of SAI (SV = 167 000/h in both TWC and OC)

Vid försöken uppmättes vidare temperaturökningen över oxidationskatalysatorn som funktion av λ -värdet. Det kunde härvid konstateras att temperaturdifferensen ökade markant då förbränningen ändrades från över- till understökiometrisk. Genom att mäta temperaturdifferensen över oxidationskatalysatorn kan man härvid säkerställa en effektiv reduktion av NO_x. Temperaturdifferensmätning över oxidationskatalysatorn utgör ett billigare och tillförlitligare alternativ till λ -sondstyrning av förbränningen.

6.7 Slutsatser

Försöken i minireaktorn har resulterat i ett dimensioneringsunderlag inför försöken i fullskala (kommersiell panna/brännare). Försöken har visat att det är möjligt att förbänna naturgas understökiometriskt utan att problem uppstår med sotning och bristfällig flamstabilitet. Understökiometrisk förbränning resulterar dock i kraftigt förhöjda emissioner av CO och H₂, vilket kan medföra ett kompletterande behov av sekundärluftsinjektion och oxidationskatalysator.

Som trevägskatalysator utnyttjas lämpligen en stabiliserad Pd/Rh-Al₂O₃-katalysator som applicerats på nät varvid reduktionsgrader på över 90% m.a.p. NO_x kan uppnås vid flödesbelastningar överstigande 200 000/h, förutsatt att förbränningen sker svagt understökiometriskt ($\lambda \approx 0.99$).

Om trevägskatalysatorn placeras nära flamman breddas λ -fönstret varvid en viss NO_x-reduktion (20 - 40%) kan erhållas även vid överstökiometrisk förbränning. Katalysatorn bör placeras så att katalysatorns arbetstemperatur ligger inom intervallet 300 - 800°C. Vid lägre temperaturer erhålls en tydlig prestandaförsämring medan termisk deaktivering utgör ett problem vid temperaturnivåer över detta intervall.

λ -sondstyrning är enkel att implementera samt möjliggör en noggrann och precis kontroll av förbränningen.

Genom insats av oxidationskatalysator och sekundärluftsinjektion kan restemissioner av oförbrända komponenter effektivt förbrännas. Genom att mäta temperaturdifferensen över oxidationskatalysatorn erhålls ett alternativt sätt att indikera understökiometrisk förbränning samt att styra förbränningsprocessen. Oxidationskatalysatorn dimensioneras så att flödesbelastningen ligger kring 300 000/h.

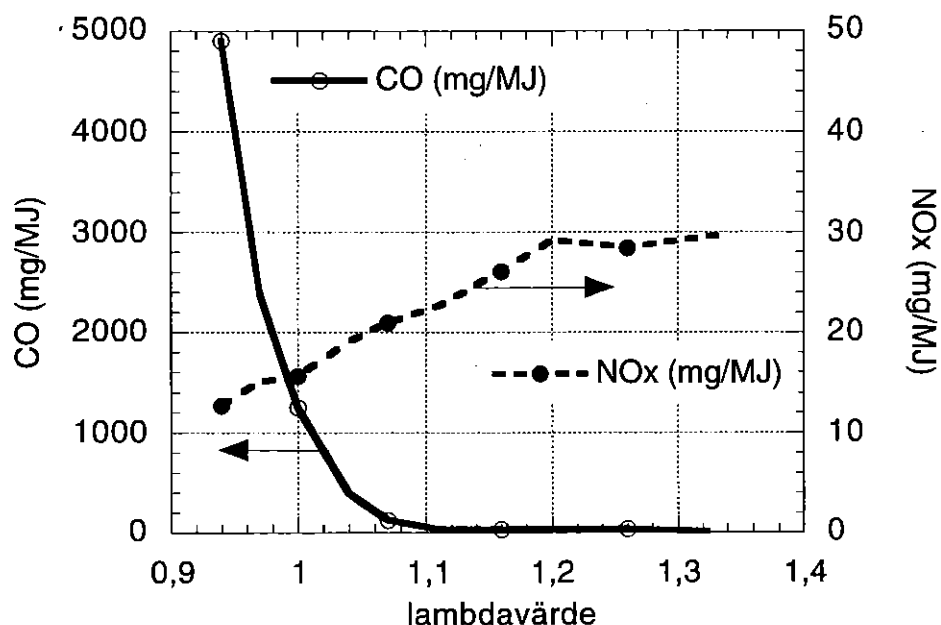
Tryckfallet över de katalytiska näten uppgick maximalt till ca 10 Pa, varför förbränningsprocessen inte påverkades.

7. Resultat från försök i kommersiell panna

7.1 Grundemissioner

Innan försök utfördes med trevägskatalys genomfördes en kartläggning av grundemissionerna från pannan. Brännaren (Bentone BG 100) är dimensionerad för en maximal effekt på 40 kW men arbetar i detta fall vid pannans designeffekt (17 kW). Eftersom brännaren arbetar i sitt nedre effektområde kan man förvänta sig relativt låga NO_x -emissioner, vilket också bekräftades av försöken, jfr. fig. 13. Brännaren är konstruerad för att arbeta vid $\lambda=1.25$, vilket innebär att NO_x -emissionen ligger kring 30 mg/MJ medan CO-emissionen är försumbar (<10 mg/MJ). Efterhand som λ -värdet vid förbränningen sänks minskar NO_x -emissionen och ligger vid stökiometrisk förbränning kring 15 mg/MJ. CO-emissionerna ökar kraftigt då $\lambda < 1.1$ och når vid stökiometrisk förbränning nivån 1200 mg/MJ.

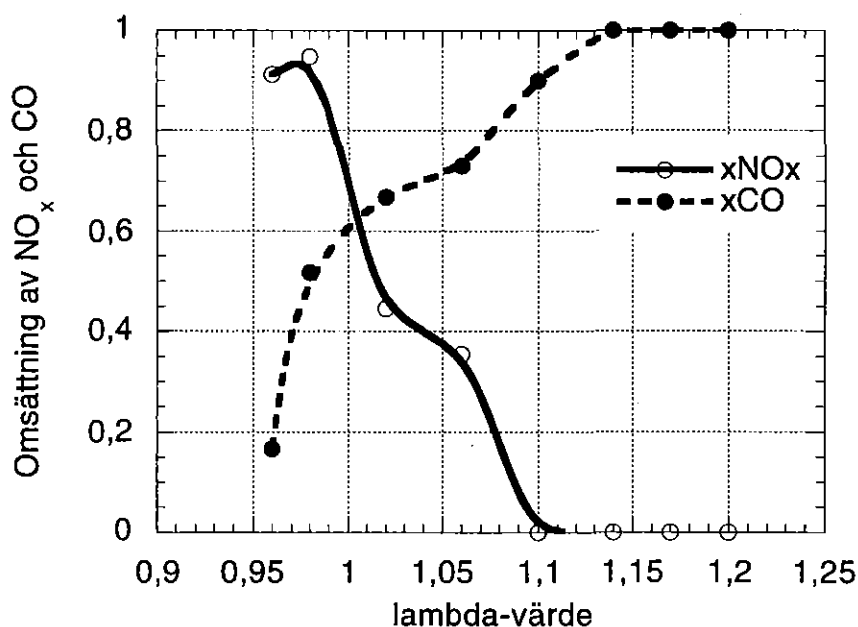
Rökgastemperaturen uppgick till ca 200°C i hela det undersökta området. Temperaturnivån där katalysatorns avses placeras låg kring 600°C, vilket enligt tidigare genomgång är optimalt.



Figur 13 Grundemissioner; Remeha OG 9/Bentone BG 100
(brännareeffekt: 17 kW)
Emissions without three-way catalyst; Remeha OG 9/Bentone
BG 100 (burner effect: 17 kW)

7.2 Reduktionsgrad med trevägskatalys

I detta försök utnyttjades 2 varv trevägskatalysator. Som framgår ur figuren nedan erhöles en reduktionsgrad m.a.p. NO_x på ca 95% vid svagt understökiometrisk förhållanden. Reduktionsgraden m.a.p. CO uppgick samtidigt till ca 60%, vilket dock är för lågt för att ge acceptabla rökashalter m.a.p. CO. På samma sätt som i minireaktor-försöken uppträder en region med viss NO_x -reduktion i det överstökiometrisk området till följd av rökgasinhomogeniteter. Vid $\lambda=1.15$ erhålls en fullständig omsättning av CO (>99.9%) medan omsättningen m.a.p. NO_x är försumbar (< 0.1%). Vid $\lambda > 1.15$ föreligger således inte längre några zoner med syreunderskott.

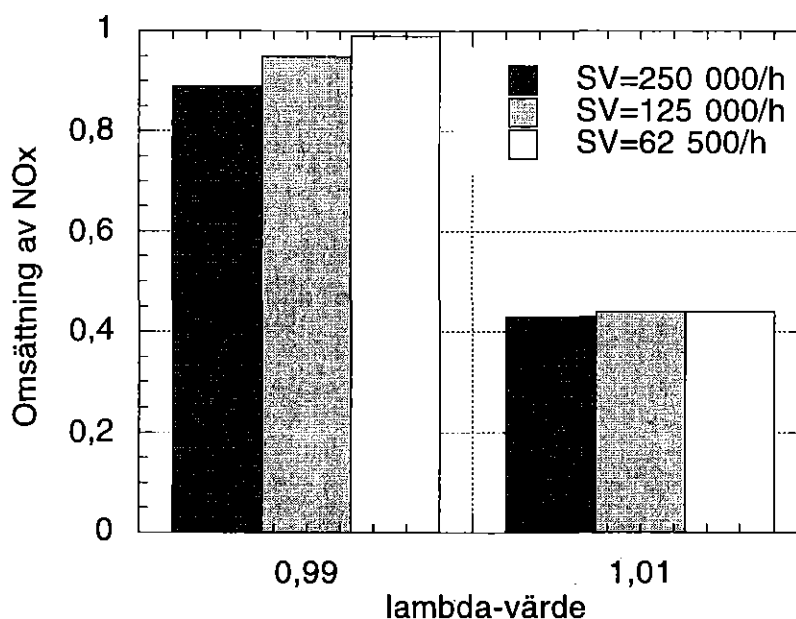


Figur 14 Omsättningen av NO_x och CO som funktion av λ -värdet (flödesbelastning = 125 000/h)
 NO_x - and CO- conversion vs. the excess air factor, λ
 (SV = 125 000/h)

Förbränningsprocessen var stabil i hela intervallet och inga problem med sotning kunde observeras.

7.3 Inverkan av katalysatormängd

För att verifiera laboratorieresultaten avseende flödesbelastning, varierades katalysatormängden i pannan. I figur 15 redovisas omsättningsnivåer, dels vid $\lambda=0.99$ och dels vid $\lambda=1.01$. Som framgår ur figuren är det möjligt att uppnå en reduktionsgrad på över 90% m.a.p. NO_x om flödesbelastningen uppgår till 200 000/h. Dessa resultat är överensstämelse med resultaten från minireaktorförsöken. I det överstökiometriskta området erhålls ingen signifikant inverkan av katalysatormängden, vilket också är i överensstämelse med tidigare resultat.



Figur 15 Omsättningen av NO_x vid $\lambda=0.99$ respektive 1.01 för olika antal nät installerade

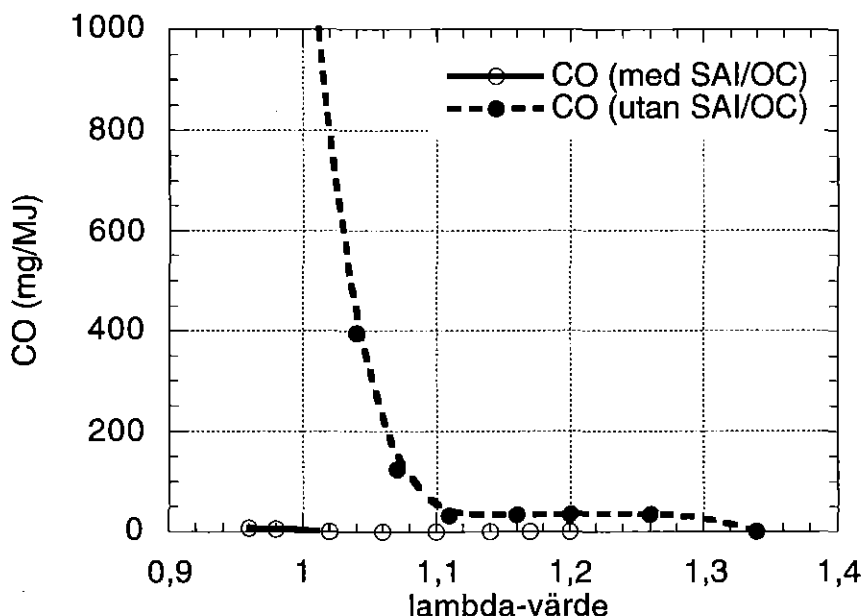
NO_x -conversion at $\lambda=0.99$ and 1.01, different number of wire meshes in series

För att uppnå en 90%-ig reduktion m.a.p. NO_x i aktuell panna krävs således ca 8 dm^2 trevägskatalysator (1 varv), vilket ger en flödesbelastning på ca 250 000/h. Högre reduktionsgrader är knappast av intresse då man väger miljömässiga och ekonomiska faktorer mot varandra.

7.4 Effekter av sekundärluftsinjektion och oxidationskatalysator

Även om trevägskatalysatorn ungefär halverar CO-emissionen krävs att en oxidationskatalysator med separat sekundärluftsinjektion installeras för att nå acceptabla

värden avseende CO-emissionerna. I figur 16 redovisas hur CO-emissionen sänks då sekundärluftsinjektion/oxidationskatalysator installeras. Sekundärluftsinjektionen motsvarade i detta fall till 10% av totalflödet men skulle kunna minskas till några procent utan att reduktionsgraden hade försämrats.



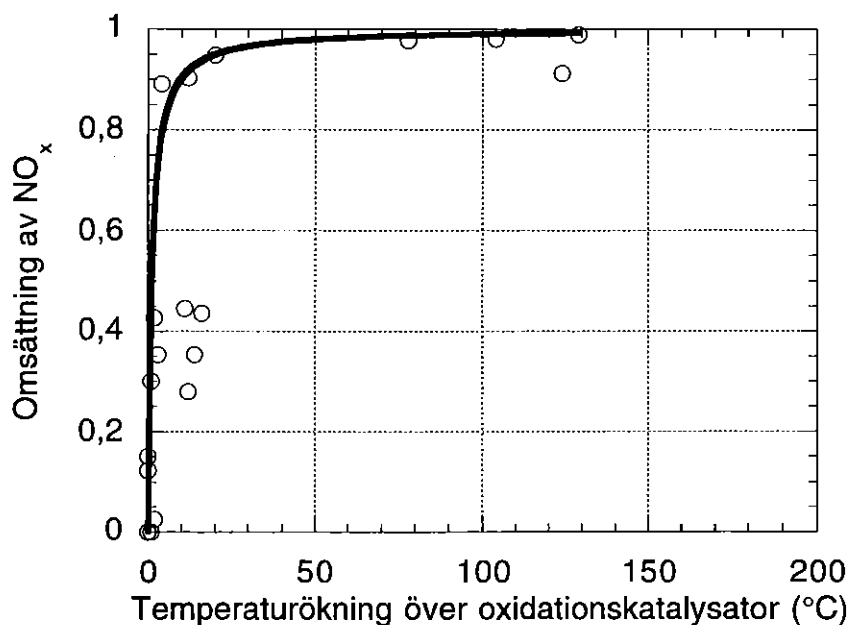
Figur 16 CO-emission som funktion av λ -värdet med sekundärluftsinjektion + oxidationskatalysator (flödesbelastning i oxidationskatalysator: 320 000/h)
CO-emission vs. excess air factor, λ , with SAI +OC
(SV = 320 000/h in the OC)

Som framgår ur figuren uppfyller installationen alla tänkbara krav på CO-utsläpp efter denna kompletterande installation

7.5 Förenklad metod för styrning av bränsletillförseln

Genom att mäta temperaturdifferensen över oxidationskatalysatorn kan man, enligt tidigare resonemang, indikera understökiometrisk förbränning. Vid understökiometrisk förbränning säkerställs en effektiv NO_x -reduktion i trevägskatalysatorn medan CO/ H_2 förbränns i oxidationskatalysatorn (efter sekundärlufttillsats). Oxidationen åtföljs av en temperaturökning och genom att relatera denna temperaturökning till reduktionsgraden av NO_x erhålls en graf enligt figur 17. Ur figu-

ren framgår att man vid en temperaturdifferens över oxidationskatalysatorn på ca 20°C uppnår en ca 95%-ig NO_x-reduktion i detta fall.



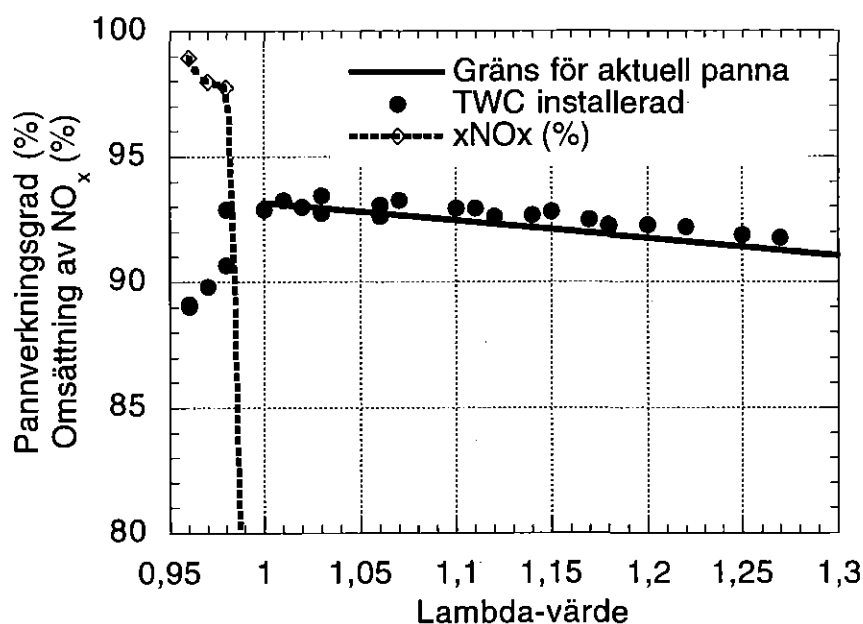
Figur 17 Temperaturdifferensen över oxidationskatalysatorn
som funktion av reduktionsgraden av NO_x i trevägs-
katalysatorn
Temperature difference over the OC vs. the NO_x-reduction
level of the TWC

Genom att styra förbränningen med temperaturdifferensen över oxidationskatalysatorn kan man således säkerställa en mycket stabil och god reningsgrad m.a.p. NO_x samtidigt som temperaturökningen hos rökgaserna inte medför några signifikanta verkningsgradsförluster.

7.6 Verkningsgradsberäkningar

Det minskade luftöverskottet vid förbränningen leder till ett minskat rökgasflöde och härigenom till en potential för reducerade rökgasförluster. I figur 18 har pannverkningsgraden avsatts mot λ -värdet (endast rökgasförluster beaktas). Som framgår ur figuren ökar pannverkningsgraden från ca 91% vid $\lambda=1.25$ till 93% vid $\lambda=1.000$ i den aktuella pannan om ingen hänsyn tas till ökade halter av CO/H₂ vid minskat luftöverskott. Denna graf utgör därför en teoretisk gräns för aktuell panna.

Då trevägskatalysator installeras i pannan ökar pannverkningsgraden med 0.5 procentenheter, vilket sannolikt förklaras av förbättrad värmeöverföring till följd av ökad turbulens kring näten. Mätpunkterna som åskådliggör pannverkningsgraden då trevägskatalysator installerats följer den teoretiska grafen för aktuell panna i det överstökiometriska området. I det understökiometriska området faller pannverkningsgraden i trevägskatalysatorfallet till följd av ökade halter CO/H₂ i rök-gaserna. Vid $\lambda=0.99$ ligger pannverkningsgraden på ca. 92% med en samtidig NO_x-reduktion på över 95%. Detta exempel visar att det är möjligt att förena en verkningsgradsvinst på någon procent med en samtidig hög NO_x-reduktion. Förutsättningen för detta är att temperaturökningen över oxidationskatalysatorn begränsas till 20°C eller mindre alternativt att förbränningsvärmets i oxidationskatalysatorn kan återvinnas i processen.



Figur 18 Total pannverkningsgrad som funktion av λ -värdet
Boiler efficiency vs. the air excess factor, λ

7.7 Slutsatser

Försöken i fullskala har verifierat tidigare resultat framtagna i minireaktor. Det är möjligt att erhålla en stabil och svagt understökiometrisk förbränning i kommersiella brännare utan att problem uppstår med sotbildning.

NO_x-reduktionsgrader på över 90% kan uppnås vid en flödesbelastning motsvarande 200 000/h eller mer. Den aktuella brännaren ger relativt höga CO-emissioner varför det är svårt att komma till rätta med CO-emissionerna genom utnyttjande av enbart trevägskatalysatorn. Precis som i minireaktorförsöken erhöles en viss NO_x-reduktion i det överstökiometriska området (40% vid $\lambda=1.05$) till följd av rök-gasinhomogeniteter.

Genom installation av sekundärluftsinjektion + oxidationskatalysator kunde ett system för effektiv NO_x-reduktion med försumbara emissioner av CO designas. Genom att ställa brännaren så att temperaturdifferensen över oxidationskatalysatorn uppgick till 20°C erhöles en NO_x-reduktion på 90 á 95% samtidigt som CO-emissionen var mindre än 10 mg/MJ. Verkningsgradsberäkningar visar att pannverkningsgraden i denna driftpunkt förbättrats med ca 1% jämfört med standardinställningen utan katalytisk rening.

8. Diskussion och ekonomisk analys

Den genomförda studien visar att det är möjligt att utnyttja trevägskatalys vid NO_x-rening av rökgaser från gaseldade installationer med vidmakthållen eller något ökad pannverkningsgrad.

Det dominerande problemet består i att rökgasinhomogeniteter förekommer i positioner där trevägskatalysatorn bör placeras för att fungera optimalt med hänsyn till temperaturnivån. Rökgasinhomogeniteterna medför att λ -fönstret breddas varvid en samtidig och effektiv NO_x-och CO/H₂-reduktion blir omöjlig att genomföra. För att eliminera detta problem föreslås en systemdesign där reduktions- och oxidationsstegen i trevägskatalysatorn frikopplas från varandra. Förbränningen får härvid ske svagt understökiometriskt ($\lambda= 0.99 - 1.000$), varvid NO_x-reduktionsgrader på 90% eller mer kan säkerställas. Trevägskatalysatorn placeras i en position så att rök Gastemperaturen ligger kring 600°C vid full last. Utrustningen för sekundärluftsinjektion respektive oxidationskatalysatorn placeras omedelbart före skorstenen där rök Gastemperaturen ligger kring 200°C. En temperaturnivå på 150 - 200°C är tillräcklig för en effektiv rening av rökgaserna m.a.p. CO och H₂.

Temperaturökningen över oxidationskatalysatorn kan utnyttjas för att styra förbränningen så att en effektiv rening av NO_x kan åstadkommas. Optimalt bör tem-

peraturdifferensen över oxidationskatalysatorn ligga kring 20°C. Totalt sätt får anläggningen följande prestanda:

- NO_x-reduktion: 70 - 99% (beroende på installerad katalysatormängd)
- CO-emission: < 10 mg/MJ
- Sekundärluftsmängd: 1-2% av totalflödet
- Verkningsgradsvinst: 1 - 2% (total pannverkningsgrad)
- Styrning av förbränning: λ -sond alternativt temperaturdifferensstyrning

För att åskådliggöra den ekonomiska potentialen vid installation trevägskatalys har investeringskostnaden vägts mot verkningsgradsvinsten och de minskade NO_x-avgifterna.

Antaganden:

Före katalysatorinstallation:

- λ -värde: 1.2
- pannverkningsgrad: 90%
- NO_x-emission: 100 mg/MJ

Efter katalysatorinstallation:

- λ -värde: 1.000
- pannverkningsgrad: ca. 91 % (temperaturökning över oxidationssteg: 20°C)
- NO_x-emission: 10 mg/MJ (90% reduktion)

Energipris:

- 200 SEK/MWh

NO_x-avgifter:

- Omfattning: Pannor med en energiproduktion på > 25 GWh/år
- Avgiftsgräns: 280 g/MWh nyttig energi (75 mg/MJ)
- Genomsnittlig pannverkningsgrad: 87%
- NO_x-avgift: 40 SEK/kg räknat som NO₂
- Avgiftsrestitution: 11.26 SEK/MWh nyttig energi

Investeringskostnad:

- Trevägs-katalysator: 30 kSEK/MW vid 90% reduktion
- Oxidationskatalysator: 20 kSEK/MW vid 99 % reduktion
- Utrustning för sekundärluftsinjektion: $10 \cdot (P/MW)^{0.67}$ kSEK
- Övervakning: 10 kSEK
- Design/installation: Påläggfaktör på 30%

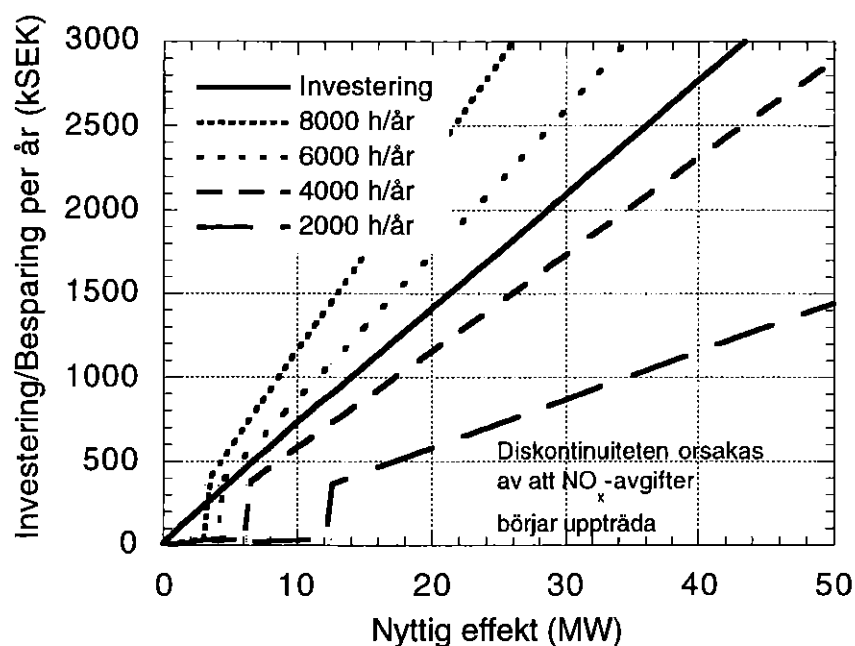
Figur 19 visar hur investeringskostnaden varierar som funktion av installerad effekt. Som framgår ur figuren erhålls ett i det närmaste linjärt samband mellan investeringskostnaden och effekten. Investeringskostnaden domineras fullständigt av katalysatorkostnaden som ju ökar linjärt med effekten.

Genom att beräkna energibesparingen till följd av verkningsgradsökningen samt reduktionen i NO_x -avgifter till följd av installationen har den årliga besparingen räknats fram som funktion av effekten vid olika nyttjandetider (2000 - 8000 h/år). Som framgår ur figuren erhålls diskontinuiteter i graferna vid de effektnivåer där anläggningarna blir NO_x -avgiftspliktiga.

En rimlig pay-off tid avseende installationen (< 2år) kan inte nås enbart genom verkningsgradsökningen, vilket med tydlighet framgår ur diagrammet. Så fort anläggningen blir avgiftspliktig förändras situationen dramatiskt och investeringen blir lönsam även för små anläggningar respektive vid korta nyttjandetider. Vid en effekt på 20 MW erhålls följande pay-off tider:

Nyttjandetid (h)	Pay-off tid (år)
8000	0.6
6000	0.9
4000	1.2
2000	2.5

Liknande pay-off tider gäller även för andra effektnivåer (linjära grafer), förutsatt att anläggningarna omfattas av NO_x -avgifter.



Figur 19 Investeringskostnad (kSEK) samt årlig besparing (kSEK) till följd av installationen

Investment cost (kSEK) and annual saving (kSEK) following the installation

Beroende på de miljömässiga och ekonomiska incitamenten bör den föreslagna tekniken få stor genomslagskraft i framtiden. Ytterligare verifikationer och prestandatester återstår dock innan tekniken kan marknadsintroduceras på större anläggningar.

9. Fortsatta studier

Föreliggande studie har inriktats på en utvärdering av potentialen med trevägskatalys i gaseldade pannor. Baserat på erfarenheterna i studien bör fortsatta insatser riktas mot tre skilda områden:

- 1) Långtidsförsök och studie av deaktiveringsfenomen
- 2) Installation av trevägskatalysator i en större gasinstallation
- 3) Katalytisk reburning i bibränsleeldade anläggningar med naturgas/gasol/biogas som reburningbränsle

De resultat som redovisas i denna studie hänför sig till försök utförda med nytillverkade katalysatorer. Under den tid försöken pågick (några dagar) kunde

dock inga tendenser till deaktiveringsfenomen observeras. Erfarenheterna från automotiva tillämpningar indikerar att katalysatorns livslängd är starkt beroende av eventuella överhettningssfenomen samt av bränslets kvalitet. Eftersom katalysatorn kan placeras i en position där temperaturen aldrig antar extremvärden ($>1000^{\circ}\text{C}$), bör problemen med termisk deaktivering kunna begränsas i stationära gaseldade anläggningar. Samtidigt gäller att gasformiga bränslen är rena jämfört med vätskeformiga och fasta bränslen, vilket medför minskad risk för katalysatorförgiftning. Erfarenheterna från automotiv trevägskatalys visar att deaktiveringen ger sig till känna genom att det blir allt svårare att samtidigt erhålla en effektiv NO_x -reduktion och en effektiv CO/HC-reduktion. Beroende på de speciella problem som föreligger i pannstillämpningar (rökgasinhomogeniteter) har vi valt att frikoppla reduktionssteg och oxidationssteg. Därför kommer effekterna av deaktivering att bli svagare än i automotiva tillämpningar.

För att tekniken skall bli kommersiellt intressant bedöms det som väsentligt att katalysatorn klarar en drifttid på åtminstone 16 000 h med en prestandaförsämring som är mindre än 50%. Detta innebär att reduktionsgraden m.a.p. NO_x kan förväntas sjunka från en initialomsättning på 90% till ca 70% under driftperioden. Om initialomsättningen väljs till 99% blir motsvarande slutomsättning ca 90%.

Långtidsförsöket bör utföras som en del i utvärderingen av trevägskatalys i en större gasinstallation. För att erhålla en rimlig uppskalningsfaktor i förhållande till genomförda studier bör pannans effekt ligga i intervallet 2 - 5 MW. Det är dock tveksamt om man kan finna någon panna i detta segment som f.n. omfattas av NO_x -avgifter. Enligt kostnadsbedömningen i föregående avsnitt kommer investeringen att uppgå till 160 kSEK (2 MW) - 380 kSEK (5 MW). Installationen omfattar härvid trevägskatalysator, utrustning för sekundärluftsinjektion, oxidationskatalysator samt styr-och reglerutrustning.

Ett flertal olika delstudier bör genomföras i installationen:

- Kapacitetstest
- Inverkan av uftöverskott
- Intrimning av styr-och reglerutrustning (λ -sondstyrning)
- Optimering av sekundärlufttillförseln och oxidationskatalysatorns funktion
- Försök med temperaturdifferensstyrning
- Fastläggande av optimal driftprofil + långtidsutvärdering

Katator AB önskar genomföra en studie av detta slag varför en dialog med anläggningsägare och finansiärer kommer att initieras.

Katator AB önskar också genomföra ett projekt avseende katalytisk reurning och kommer därför att formulera en projektbeskrivning avseende en sådan studie. Målsättningen härvid är att utnyttja naturgas alternativt gasol som reurningbränsle i biobränsleeldade anläggningar, vilka beroende på bränslets kväveinnehåll ger relativt höga NO_x-emissioner (ca 100 mg/MJ eller mer). En sådan studie skulle kunna manifesteras möjligheterna med samtidigt utnyttjande av inhemska biobränslen och energigas (naturgas, gasol, biogas etc).

10. Litteratur

1. J. J. Mooney, Kirk-Othmer Encyklopedia of Chemical Technology, 4 ed., vol. 9, John Wiley & Sons Inc., New York, 1994, sid. 1003.
2. J. C. Summers, A. C. Frost, W. B. Williamson och I. M. Freidel, Control of NO_x/CO/HC-emissions from natural gas fueled stationary engines with three-way catalysts, proc. 84th annual meeting, air & waste management association, Vancouver, British Colombia, June 16 - 21, 1991, sid. 1.
3. J. J. Steringa, J. Klimstra och F.J. Overmars, NO_x-reduction of radiant tube burners using an automotive catalyst, Proc. Int. Gas. Research Conf., Cannes, Nov. 6 - 9, 1995, sid 111.
4. M. Orjala, Archivum combustionis, vol 13 (1993), no. 1 - 2, sid 101.
5. Yun-feng Chang och J. G. McCarty, Catalysis Today 30 (1996), sid 163.
6. J. C. Summers och W. B. Williamson, Environmental Catalysis, chap. 9, sid 94, American Chemical Society, 1994.
7. T. Yamada, K. Kayano och M. Funabiki, Soc. of. Automotive Eng., N.Y., SP - 968, 1993. sid 89.
8. L. Joos, Gesundheits-Ingenieur - Haustechnik - Bauphysik - Umwelttechnik, 109 (1988) Heft 6, sid 309.
9. M. Näslund, Låg-NO_x-teknik för gasdrivna processer - dagsläge, Rapport SGC 076, 1996.
10. B. S. Haynes och H. GG. Wagner, Prog in Energy and Comustion Sci., vol. 7 (1981), sid 229.

1998-01-14

RAPPORTFÖRTECKNING

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

1998-01-14

RAPPORTFÖRTECKNING

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

1998-01-14

RAPPORTFÖRTECKNING

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

1998-01-14

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
051	Nordiska Degelugnsprojektet. Pilot- och fältförsök med gasanvändning.	Nov 93	Eva-Maria Svensson Glafo	150
052	Nordic Gas Technology R&D Workshop. April 20, 1994. Proceedings.(På engelska)	Jun 94	Jörgen Thunell, Editor Swedish Gas Center	150
053	Tryckhöjande utrustning för gas vid metallbearbetning -- En förstudie av GT-PAK	Apr 94	Mårten Wärnö MGT Teknik AB	150
054	NOx-reduktion genom injicering av naturgas i kombination med ureainsprutning	Sep 94	Bent Karll, DGC P Å Gustafsson, Miljökons.	100
055	Trevägs-katalysatorer för stationära gasmotorer.	Okt 94	Torbjörn Karlelid m fl Sydkraft Konsult AB	150
056	Utvärdering av en industriell gaseldad IR-strålar	Nov 94	Johansson, M m fl Lunds Tekniska Högskola	150
057	Läckagedetekteringssystem i storskaliga gasinstallationer	Dec 94	Fredrik A Silversand	150
058	Demonstration av låg-NOx-brännare i växthus	Feb 95	B Karll, B T Nielsen Dansk Gasteknisk Center	150
059	Marknadspotential naturgaseldade industriella IR-strålar	Apr 95	Rolf Christensen Enerkon RC	150
060	Rekommendationer vid val av flexibla insatsrör av rostfritt i villaskorstenar	Maj 95	L Hedeén, G Björklund Sydgas AB	50
061	Polyamidrör för distribution av gasol i gasfas. Kunskapssammanställning	Jul 95	Tomas Tränkner Studsvik Material AB	150
062	PE-rörs tålighet mot yttre påverkan. Sammanställning av utförda praktiska försök	Aug 95	Tomas Tränkner Studsvik Material AB	150
063	Naturgas på hjul. Förutsättningar för en storskalig satsning på NGV i Sverige	Aug 95	Naturgasbolagens NGV- grupp	150
064	Energieffektivisering av större gaseldade pannanläggningar. Handbok	Aug 95	Lars Frederiksen Dansk Gasteknisk Center	200
065	Förbättra miljön med gasdrivna fordon	Aug 95	Göteborg Energi m fl	150
066	Konvertering av oljeeldade panncentraler till naturgas. Handbok.	Nov 95	Bo Cederholm Sydkraft Konsult AB	150

1998-01-14

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
067	Naturgasmodellen. Manual för SMHI:s program för beräkn av skorstenshöjder	Dec 95	Tingnert B, SKKB Thunell J, SGC	150
068	Energigas och oxyfuelteknik	Dec 95	Ingemar Gunnarsson Energi-Analys AB	150
069	CO2-gödsling med avgaser från gasmotor med katalysator	Dec 95	Bent Karll Dansk Gasteknisk Center	150
070	Utvärdering av naturgasförbränning i porösa bäddar	Mar 96	Henric Larsson Lunds Tekniska Högskola	150
071	Utvärdering av naturgasdrivna IR-boostar i ugn för pulverlackering	Nov 95	Ole H Madsen Asger N Myken	150
072	Sammanställning av emissionsdata från naturgas-, biogas- o motorgasdrivna fordon	Jun 96	Hans-Åke Malteesson Svenskt Gastekniskt Center AB	150
073	Livslängdsbestämning för PE-rör för gasdistribution (EVOPE-projektet)	Jul 96	Tomas Tränkner Studsvik Material AB	100
074	Gasblandningar för fordonsdrift. Idéstudie.	Aug 96	Ola Hall Sydkraft Konsult AB	150
075	Gasbranschens miljöhandbok	Sep 96	Jörgen Thunell Svenskt Gastekniskt Center	500
076	Låg-NOx-teknik för gasdrivna processer - dagsläge	Okt 96	Mikael Näslund, LTH	150
077	Karakterisering av emissioner från naturgasdrivna lastbilar inom LB 50-projektet	Dec 96	K-E Egeback Roger Westerholm	150
078	Uppvärmning med gas i svenska småhus - erfarenheter och framtida teknikval	Nov 96	Mikael Näslund, LTH	150
079	Handledn. för inst av gaseldade IR-värmare. Rådgivning, analys och genomförande	Apr 97	Pär Dalin, DITAB	150
080	Mikrokraftvärmeverk med Stirlingmotor	Jan 97	Tomas Nilsson Lunds Tekniska Högskola	150
081	Naturgasbaserad småskalig kraftvärme inom uppvärmningssektorn	Feb 97	Mats Nilsson LTH/MALMO	150
082	Kylning och klimatisering av byggnader och lokaler med hjälp av naturgas	Apr 97	Anders Lindkvist Vattenfall Energisystem	150

1998-01-14

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
083	Naturgassystemet i Sverige - en teknisk beskrivning	Jun 97	Ronny Nilsson, KM	150
084	Livscykelanalyser - Är det något för gasbranschen	Sep 97	Jörgen Thunell	150
085	Konvertering av direktelvärmda småhus till naturgasuppvärmning		Mikael Näslund	150
086	Uppgradering av biogas . Fas 2, Praktiska försök med kondenseringsmetoder.	Jun 97	Ola Lloyd / BioMil AB Johan Nilsson / LTH	150
087	Utveckling av kataltalytisk rening av avgaser från befintlig panna	Dec 97		150
A01	Fordonstankstation Naturgas. Parallellkoppling av 4 st Fuel Makers	Feb 95	Per Carlsson Göteborg Energi	50
A02	Uppföljning av gaseldade luftvärmare vid Arlövs Sockerraffinaderi	Jul 95	Rolf Christensen Enercon RC	50
A03	Gasanvändning för färjedrift. Förstudie (Endast för internt bruk)	Jul 95	Gunnar Sandström Sydkraft Konsult	0
A04	Bussbiller. Förslag till mätprogram	Jun 95	Ingemar Carlsson Ecotrans Teknik AB	50
A05	Värmning av vätskor med naturgas - Bakgrund till faktablad	Okt 95	Rolf Christensen Enerkon RC	50
A06	Isbildning i naturgasbussar och CNG-system (Endast för internt bruk)	Nov 95	Volvo Aero Turbines Sydgas, SGC	0
A07	Större keramisk fiberbrännare. Förstudie	Jan 96	Per Carlsson Sydkraft Konsult	50
A08	Reduktion av dioxin, furan- och klorfenoler vid avfallsförbränning	Maj 96	H Palmén, M Lampinen et al Helsingfors Tekniska Högskola	50
A09	Naturgas/mikrovågsteknik för sintring av keramer	Maj 96	Anders Röstin, KTH	50
A10	NOx-reduktion genom naturgasinjektion o reburning. Demoprojekt på Knudmoseverket	Apr 96	Jan Flensted Poulsen Völund R & D Center	50
A11	Direkttorkning av socker med naturgas (Endast för internt bruk)	Jul 96	Rolf Christensen Enerkon RC	0

1998-01-14

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
A12	Uppföljning, installation av gaspanna med avgaskondensor, kv Hornblåsaren 6, Råå	Sep 96	Bo Cederholm Sydkraft Konsult AB	50
A13	Klassningsplaner för gasinstallationer	Jun 97	Carl-Axel Stenberg Greger Arnesson	50
A14	Uppf av drift med natugaseldad kondenserande gaspanna i Rinnebäcksskolan	971015	Bo Cederholm	50



Svenskt Gastekniskt Center AB

S-205 09 MALMÖ
Telefon: 040-24 43 10
Telefax: 040-24 43 14

KFS AB, LUND