
Rapport SGC 158

**Utveckling av katalytisk rörbrännare
för naturgasförbränning
för luftuppvärmning i matlagningsugn**

©Svenskt Gastekniskt Center – Oktober 2005

Anna-Karin Jannasch
CATATOR AB

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 e.dyl. 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 på SGC:s hemsida www.sgc.se.

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, E.ON Gas Sverige AB, E.ON Sverige AB, Göteborg Energi AB, Lunds Energi AB och Öresundskraft AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

Catator AB
Gaz de France
Statens Energimyndighet

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



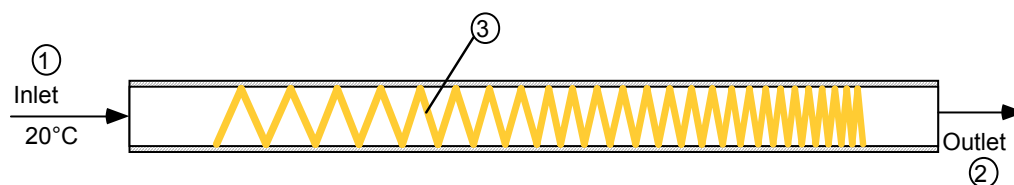
Jörgen Held

1. Bakgrund och målsättning

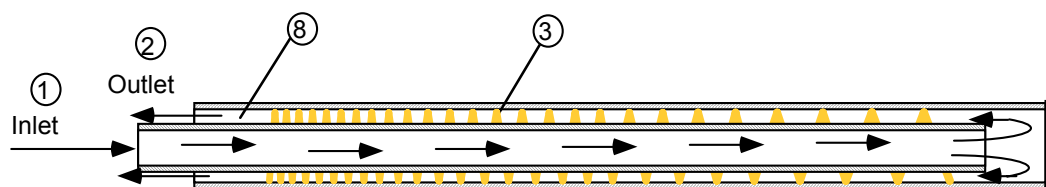
Under våren 2004 genomförde Catator AB en förstudie till att utveckla en katalytisk rörbrännare för naturgasförbränning. Studien var på uppdrag av Gaz de France (GdF), vars intresse var att kunna använda denna typ av brännare för luftuppvärmning i matlagingsugnar. I studien undersöktes möjligheten att använda Catators katalytiska rörbrännarkoncept som sin enklaste form består av en katalytisk spiral, tillverkad enligt Catators patenterade teknik, som placeras inne i ett högtemperaturtåligt metalliskt rör, se figur 1 och 2. I studien utvärderades, förutom den enklaste formen av katalytisk rörbrännare, ett flertal varianter av de designkonstruktioner som schematiskt visas i figur 3 respektive 4. Utvärderingen av de olika designkoncepten genomfördes med hjälp av teoretiska simuleringar samt verifierande praktiska experiment, vars resultat, observerat vid uppstart och kontinuerliga driftsbetingelser, sammanfattas i följande text.



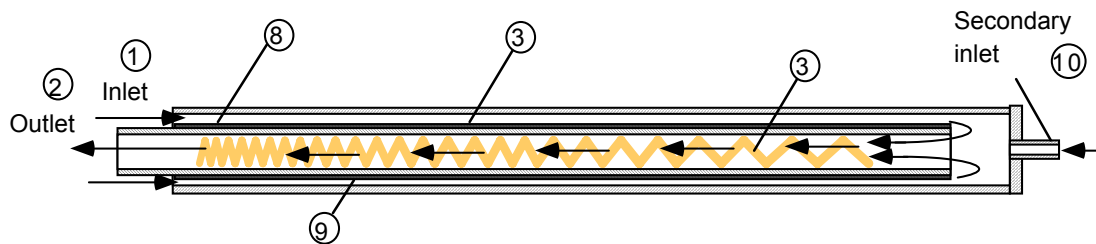
Figur 1. Foto av en katalytisk spiral tillverkad enligt Catators patenterade teknik.



Figur 2. Exempel på en enkel katalytisk rörbrännare. Katalysatorn (3) består i detta fall av en spiral vars densitet bestämmer förbränningsreaktionens hastighet inne i röret.



Figur 3. Exempel på katalytisk rörbrännare med värmeåtervinning. Katalysatorn (3) placeras i detta fall mellan två rör, varvid den inkommande bränsle-luft-blandningen på så sätt förvärms innan den förbränns på katalysatorn.



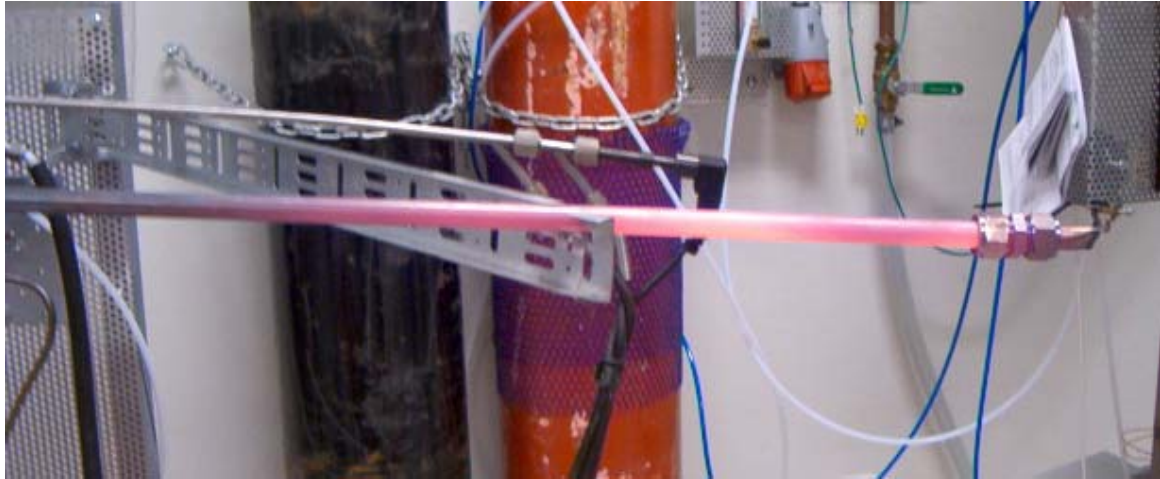
Figur 4. Exempel på en katalytisk rörbrännare med värmeåtervinning i kombination med en andra bränsleinmatning (10).

Uppstart:

Som förväntat krävs höga temperaturer för att initiera katalytisk förbränning av naturgas (500-600 °C), vilket i sin tur innebär att förvärmning av enheten i någon form måste ske. Det senare kan genomföras på ett flertal olika sätt: 1) via elektrisk uppvärmning (den katalytiska spiralen är elektriskt ledande), 2) via värmeväxling av heta avgaser utgående från en inkluderad uppstartsbrännare (flam- eller katalytisk) samt 3) via initial tillförsel av små mängder vätgas som i kontakt med katalysatorn tänds vid rumstemperatur och på så sätt värmer upp rörbrännaren till behövlig tändningstemperatur innan naturgastillförseln påbörjas.

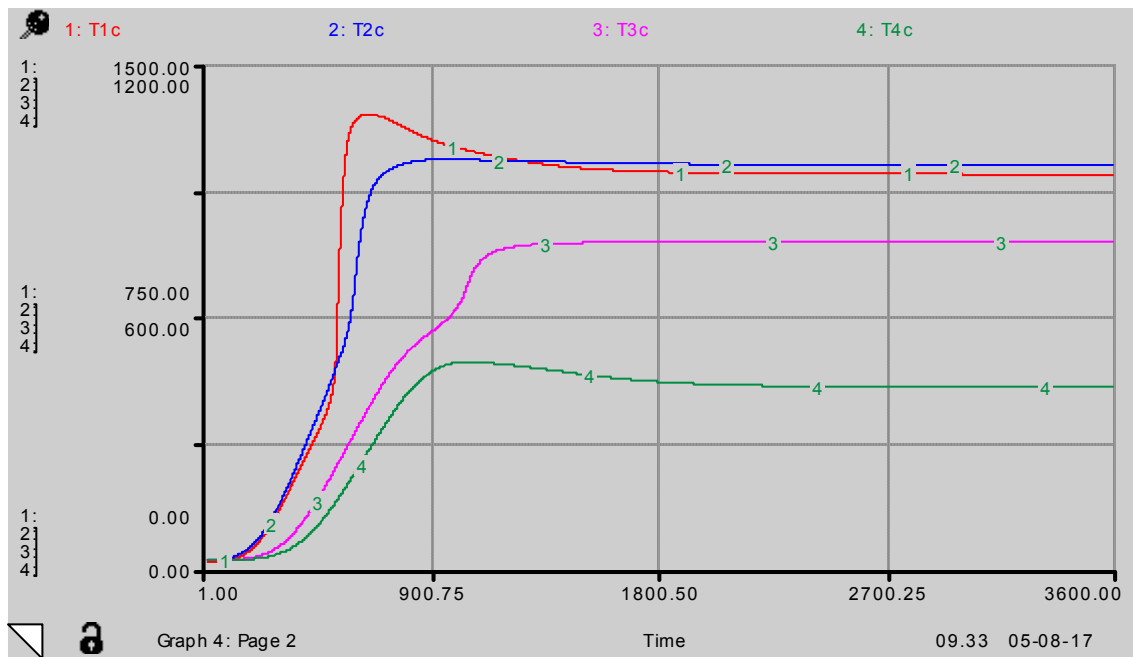
Stabil drift:

Någon form av värmeåtervinning (extern eller intern) krävs för att bibehålla en stabil katalytisk naturgasförbränning inne i rörbrännaren efter det att förbränningen initierats. Resultaten visade att omfattningen av tillförd värmeåtervinning är mycket kritisk i detta system. Då otillräcklig värmeåtervinning tillfördes observerades svårigheter att uppnå och bibehålla en jämn förbränning över hela rörets längd. Förbränningszonen observerades att förflytta sig kontinuerligt med tid och ökad last mot rörets utlopp, för att till sist i värsta fall helt slockna. Om däremot för mycket värmeåtervinning används riskerar man att uppnå mycket höga förbränningstemperaturer som i sin tur kan resultera i flamförbränning inne i röret och/eller katalysatordeaktivering ($T > 1000^{\circ}\text{C}$). Stabila driftbetingelser kunde i denna studie först observeras då rörbrännaren utformades med en förvärmningsenhet för bränsle-luftblandningen (såsom den illustrerad i figur 3) i kombination med en extern värmerekuperator placerad nedströms rörbrännaren, se figur 5. Vid dessa stabila betingelser kunde dock ett flertal viktiga tekniska prestandadata verifieras såsom en hög termisk effektivitet (98-99 %) i kombination med låga NO_x (0-1 mg/kWh) och CO-emissioner (10 mg/kWh), vilket i sin tur tydligt visar på brännarkonceptets goda tekniska potential. Ett identifierat kvarstående problem var att alltför höga kolväteemissioner kunde detekteras i utgående avgaser.

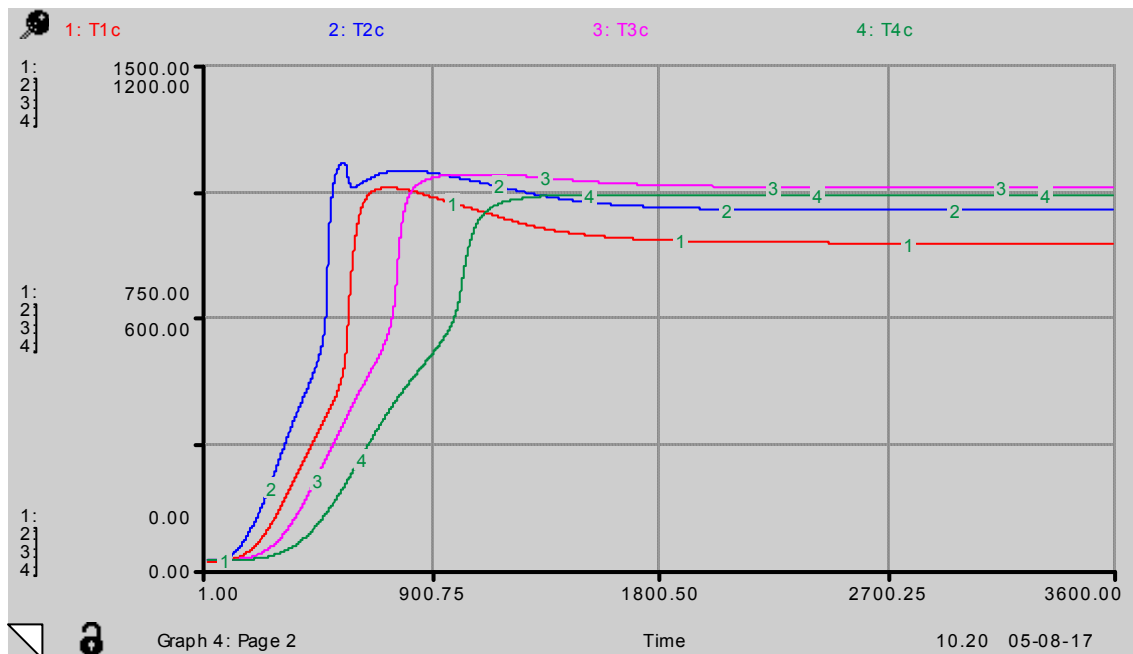


Figur 5. Rörbrännare under drift (ca. 3 kW) inkl. intern och extern värmeåtervinning.

Förutom att demonstrera vikten av optimerad värmerekupering, illustrerades även andra metoder för att uppnå och upprätthålla en god och jämn förbränningskvalité i rörbrännaren. En kritisk parameter är exempelvis densiteten hos den katalytiska spiralen (se figur 2), vars inverkan illustreras med hjälp av de simuleringsresultat som visas i figur 6a-b. För att undvika kritiskt höga temperaturer så är det tydligt att spiraldensiteten gradvis bör öka längs rörets längdriktning (sett från dess in- till utlopp). Detta för att kompensera för den kontinuerligt minskade bränslekonzentrationen längs reaktionsgasens flödesriktning.



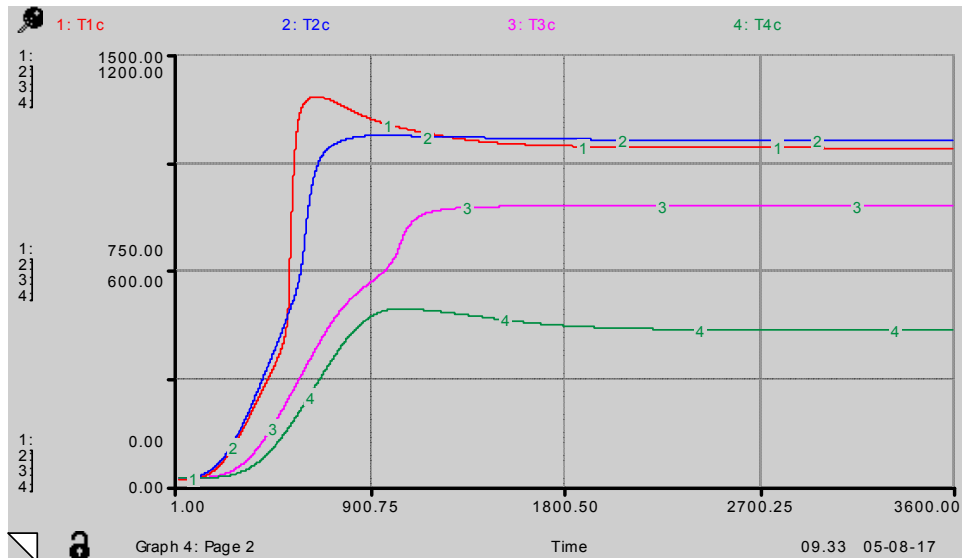
Figur 6a.



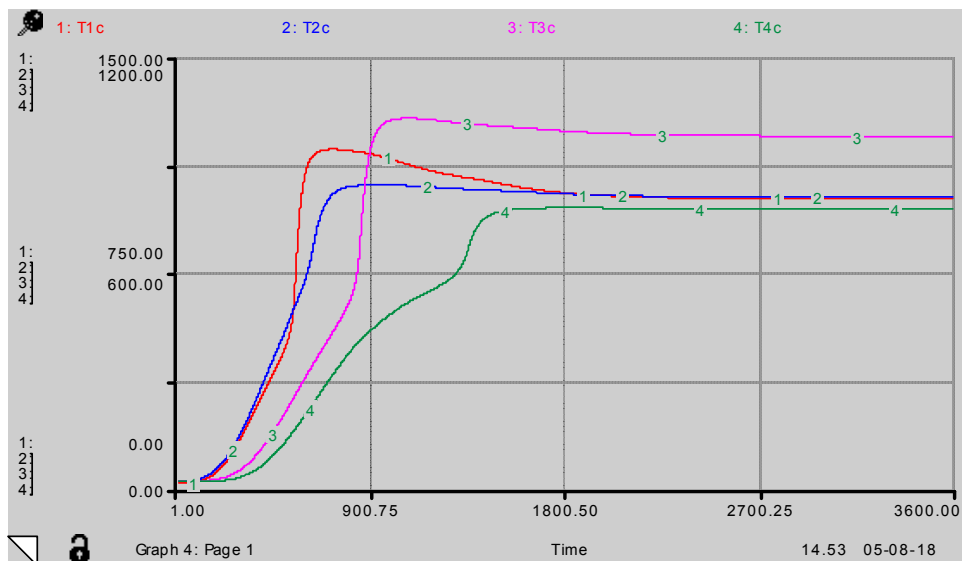
Figur 6b.

Figur 6. Simuleringar av temperaturprofilen i rörbrännarens längdriktning då a) katalytiska spiralen har konstant densitet längs rörlängden (1m) b) då den katalytiska spiralen har en gradvis ökande densitet längs rörlängden (1m). Simuleringarna genomfördes genom följande antagande: tillförd effekt=3 kW, antal rörbrännare=1. Rörret antas bestå av 4 sektioner, där T1=temperaturen närmast inlopp och T4=temperaturen närmast utlopp. Rörret antas ha ett bränsle-luft-inlopp placerat i början av sektion 1.

Ett annat eller kompletterade sätt för att uppnå en mer homogen temperaturfördelning längs röret är att tillföra det totala luft-bränsleflödet i delsteg genom att inkludera två eller flera bränsleinmatningar längs rörets längd, se figur 4 samt simuleringsresultat i figurer 7a-b. Förutom en jämnare temperaturprofil leder den senare modifieringen även till att tryckfallet över systemet blir något lägre.



Figur 7a.



Figur 7b.

Figur 7. Simuleringar av temperaturprofilen i rörbrännarens längdriktning (1m) då a) rörbrännaren har ett inlopp placerat i inloppsändan av sektion 1 b) rörbrännaren har två bränsle-luft-inlopp, där inlopp 1 är placerad i början av sektion 1, och inlopp 2 är placerad i början av sektion 3.). Simuleringarna genomfördes genom följande antagande: tillförd effekt=3 kW, antal rörbrännare=1. Röret antas bestå av 4 sektioner, där T1=temperaturen närmast inlopp och T4=temperaturen närmast utlopp. Katalytiska spiralen antas ha konstant densitet längs hela rörlängden. 60 % av tillförd effekt antas tillföras i inlopp1, 40% i inlopp 2.

Sammanfattningsvis visade förstudien att det alltså inte är möjligt, till skillnad då bränslena vätgas och gasol används, att få till stånd en stabil och högkvalitativ katalytisk förbränning av naturgas i en simpel rörbrännare såsom den illustrerad i figur 2. Resultaten visade dock att de uppkomna problemen, som här alltså härleds till de specifika egenskaperna som naturgas innehar, bör kunna lösas genom reaktormodifieringar i kombination med en del kompletterande optimeringsarbete. Till följd av dessa lovande resultat, föreslogs en fortsättningsstudie för vidare utveckling av den katalytisk rörbrännaren för naturgas (se ”Quotation: Adoption of Catator’s catalytic rod burner for air heating in cooking stoves, Part II, quotation no: CAT/GdF. 040206”), som under hösten 2005, efter det att muntlig order erhållits, även påbörjades. Målet med fortsättningsstudien var att utveckla, konstruera och till slut leverera en fungerande katalytisk rörbrännarprototyp till GdF som anpassats till just luftuppvärmning i matlagningsugn enligt GdF angivna tekniska specifikationer, se lista på följande sida. Projektet var planerat att genomföras i tre etapper; 1) Designfas 2) Konstruktion och utvärderingsfas samt 3) Sammanställande och leverans av rapport, och var planerat att samfinansieras av GdF, Catator AB och Svenskt Gastekniskt Center (SGC AB). Efter det att Catator AB slutfört projektets första hälft beslutade tyvärr GdF att dra sig ur arbetet. Detta avhopp var i sin tur en följd av centrala omorganisationer inom GdF där man bl a bestämde att de skulle dra ner på allt utvecklingsarbete inom området katalytisk förbränning. Detta är också orsaken till varför inte heller alla inplanerade faser i denna fortsättningsstudie genomfördes, och varför enbart resultat från design och beräkningsarbete, inkl. vissa verifikationsexperiment, redovisas i denna rapport.

Lista över GdFs tekniska specifikationer

Driftsvillkor:

Effektintervall: 10-2 kW

Bränsle: Naturgas

Lambda värde: ≈ 1.2

Ingående temperatur hos Bränsle-Luft-blandning: Rumstemperatur

Termisk effektivitet: Så hög som möjligt (dvs utgående avgasers temperatur skall vara så låg som möjligt, enligt samband:

Termisk effektivitet = $1 - F_g \cdot c_{p,air} \cdot (T_{ut} - T_{rum}) / \text{Effekt}$

F_g = utgående flöde från rörbrännarsystem ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

$C_{p,air}$ = luftens värmekapacitet (J (kg K)^{-1})

T_{ut} = temperatur hos utgående gas (avgaser) (K)

T_{rum} = temperatur hos ingående gasblandning (K)

Effekt = Ingående/tillförd effekt (W)

Uppstartstid: < 1 minut

Systemets ytterdimensioner:

Brännarsystemets storlek: omkring: 125*450 mm

Rörbrännarens form: föredragsvis spiralformat

Övriga önskemål:

För att underlätta vidare tester på GdF så bör rörens inlopp vara utrustade med standardkoppling(ar) för luft-bränsletillförsel.

2. Beskrivning av design- och simuleringsresultat

Enligt förstudiens resultat så är det inte möjligt att erhålla en stabil och hög kvalitativ katalytisk förbränning av naturgas i den enklaste formen av Catators rörbrännarkoncept (se figur 2). Resultaten visade nämligen att

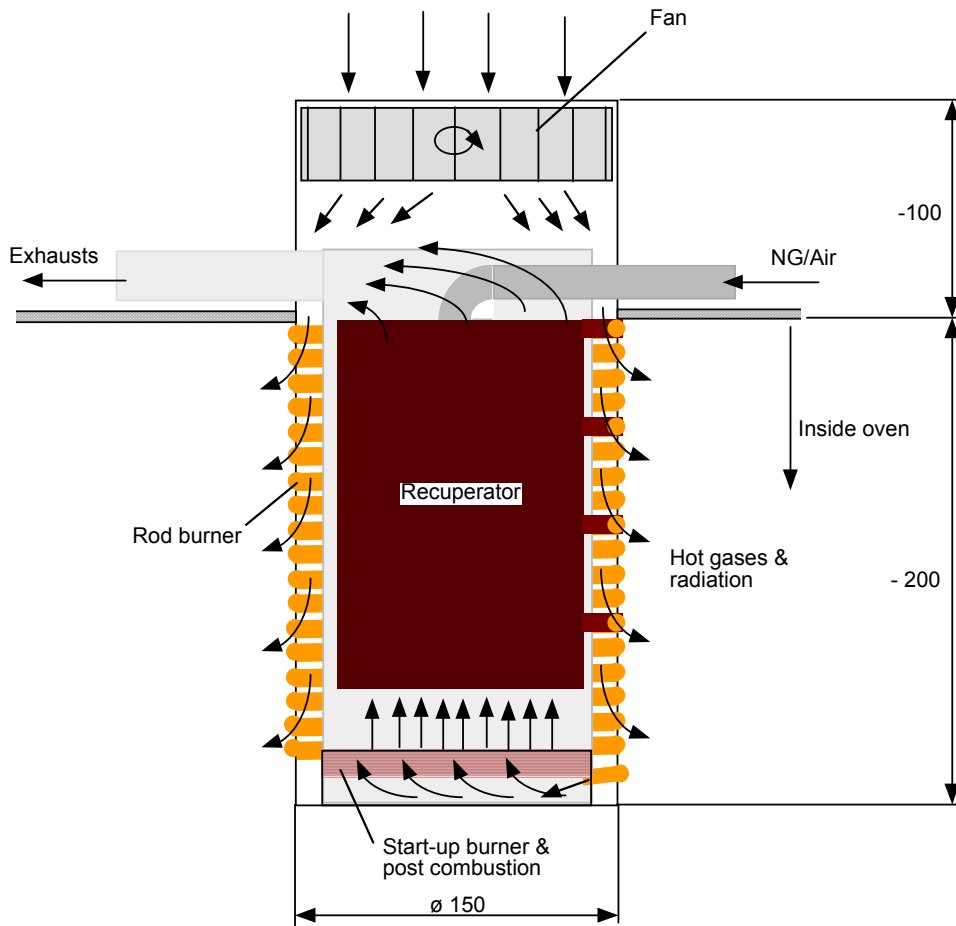
- någon form av uppstartsbrännare alternativt eluppvärmningsanordning krävs för att initiera förbränningen (500-600 °C).
- någon form av effektiv värmeåtervinning måste inkluderas för att möjliggöra en stabil och kontinuerlig drift, antingen intern och/eller extern.
- någon form av emissionskatalysator alternativt efterbrännare rekommenderas då kolväteemissionerna uppmättes vara höga.

Utifrån dessa resultat, med hänsyn till GdF angivna specifikationer, sattes nya designförslag upp som utvärderades med hjälp av beräknings- och simuleringsarbete. Bl a utvecklades och användes en matematisk modell i simuleringsverktyget Ithink®, där följande parametrar/processer är inkluderade:

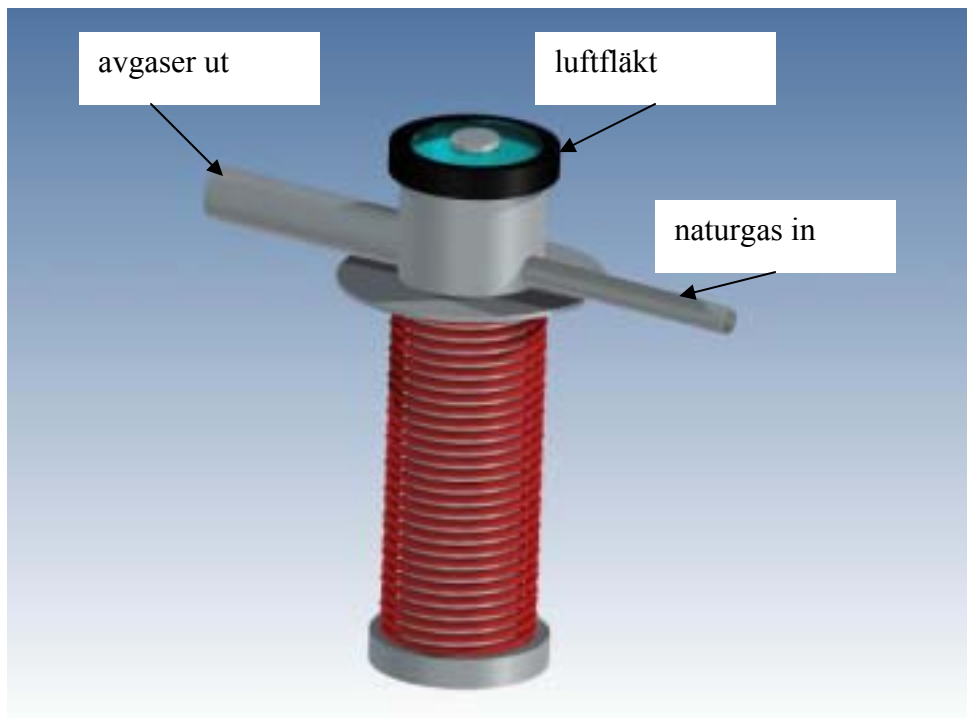
- den katalytiska reaktionen i rörbrännaren
- densiteten hos den katalytiska spiralen och dess fördelning längs rörbrännaren
- antal bränsleinlopp
- antal rörbrännare inkl. i brännarsystemet
- omfattning av intern värmeåtervinning
- överförd effekt via strålning, konvektion samt ledning
- termisk effektivitet
- tryckfall
- termisk respons (dvs vid uppstart, lastbyte)

Modellen tar även hänsyn till fysiska dimensioner såsom rörets inner- och ytterdiameter, rörlängd, tjocklek av katalytiskt skikt, etc.

Det ovan beskrivna designarbetet resulterade i ett nytt förslag till ett kundanpassat rörbrännarkoncept som bör, enligt våra resultat, kunna bemästra de problem som tidigare identifierats i förstudien. Den nya rörbrännardesignen illustreras schematiskt i 2D samt även i 3D i figur 8a respektive 8b.



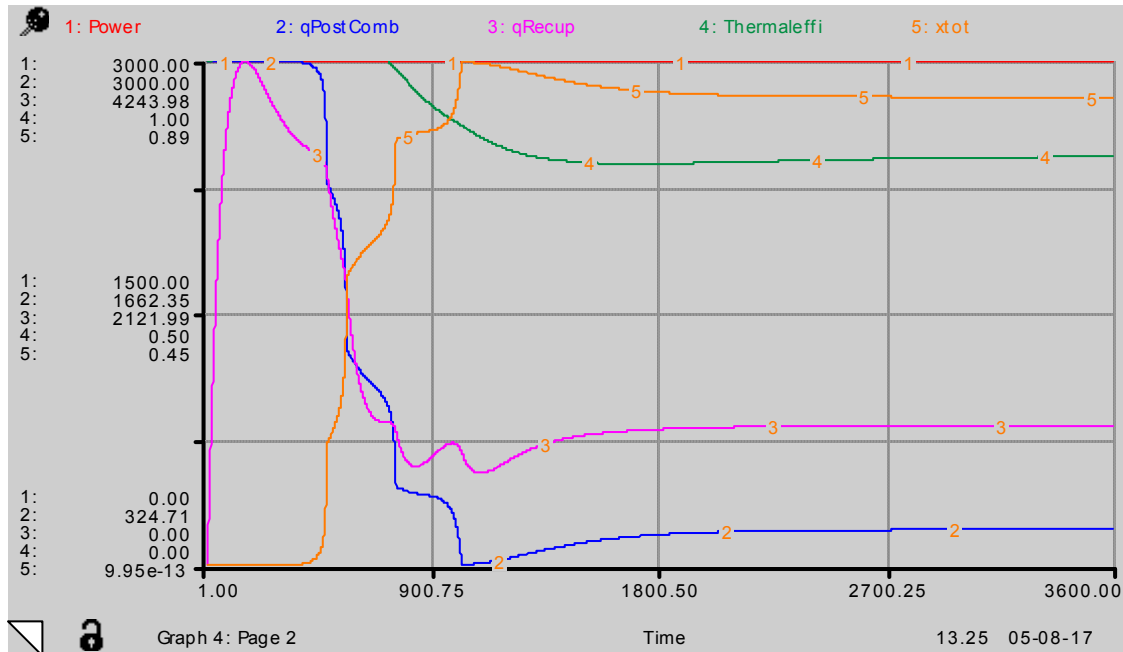
Figur 8a.



Figur 8b.

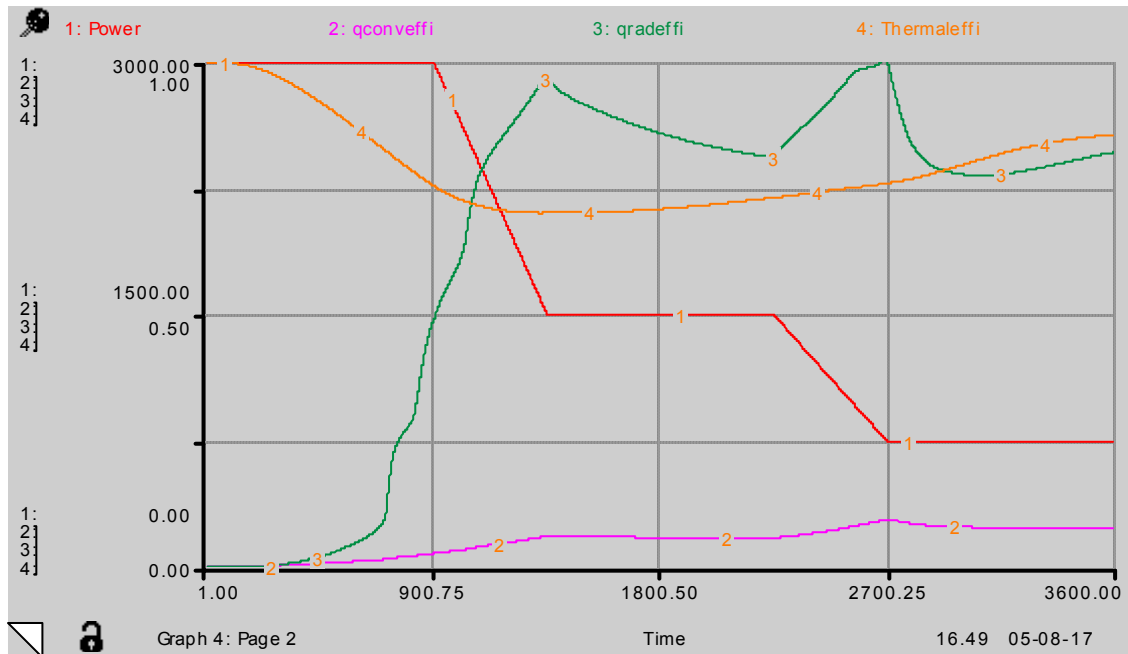
Figur 8. Schematisk illustration av en ny design av rörbrännarsystem, anpassat till GdF tekniska specifikation a) 2D, b) 3D.

Den katalytiska rörbrännaren, alternativt flera parallellt placerade rörbrännare, är spiralformad(e) och kan designas med en eller flera bränsleinlopp (endast ett bränsleinlopp är dock synligt i figur 8a). Uppvärmning till 500-600 °C sker i detta koncept via en flambrännare som i sin tur startar via ett elektriskt tändstift. Flamförbränningen sker väl separerad från den katalytiska förbränningen, vilket förhindrar att katalysatorn i rörbrännaren termiskt deaktiveras. Den behövliga värmeåtervinningen är som synes i detta fall integrerad i systemet. Oförbränt bränsle som finns i utgående avgaser från rörbrännaren förbränns i uppstartsbrännaren, och de resulterande heta avgaserna värmeväxlas därefter med utsidan av den katalytiska rörbrännaren. Ju mer oförbränt bränsle som finns i de utgående avgaserna från rörbrännaren, ju mer värme tillförs rörbrännaren via värmeåtervinning. Systemet blir på så sätt självreglerande, se simuleringsresultat redovisade i figur 9. Förutom problemet med reglering av värmeåtervinning så löser man med denna konstruktion även problemet med höga kolväteemissioner, eftersom de sistnämnda brinner upp i flambrännaren. För att ytterligare minimera emissionerna ut till omgivningen så kan man även enkelt inkludera emissionskatalysatorer nedströms flambrännaren, vilka framförallt avsevärt reducerar eventuellt förhöjda halter (till följd av flamförbränningen) av NO_x och CO.

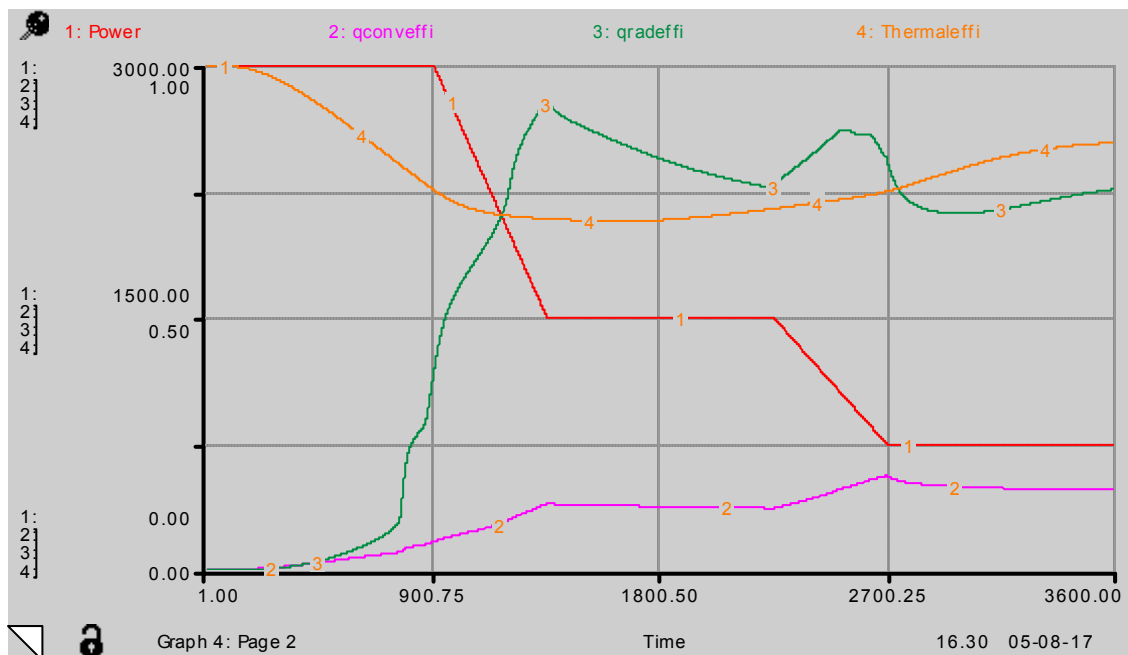


Figur 9. Simuleringsresultat som visar på ett rörbrännarsystem med en självreglerande värmeåtervinning. Power (tillförd effekt)=3 kW, $q_{PostComb}$ =utvecklad förbränningsvärme i inkluderad flam(efter)brännare (W), q_{Recup} =mängd rekupererad värme (W), $Termieffi$ =total termisk effektivitet beräknad enligt ekvation 1, $xtot$ =omsättning av bränsle i rörbrännaren, dvs $1-xtot$ =den mängd bränsle som förbränns i flam(efter)brännaren. Q_{start} =Power tills $xtot > 0.4$, därefter $Q_{start}=0$. antal rörbrännare=1, katalytiska spiralens densitet=konstant längs hela rörlängden (1m), antal bränsle-luft inlopp=1.

Rörbrännaren överför värme till luften via konvektion och strålning, där den sistnämnda transportprocessen står för det största bidraget, se figurer 10a-b. Simuleringarna visar också att ju högre tillförd effekt, ju lägre total värmeöverföringseffektivitet (dvs ju större förlust) kan förväntas. Luften som skall värmas upp tillförs via en fläkt som placeras i anslutning till de heta ytorna, förslagsvis enligt principskissen i figur 11 (fläkten är även inritad i figurer 8a-b).

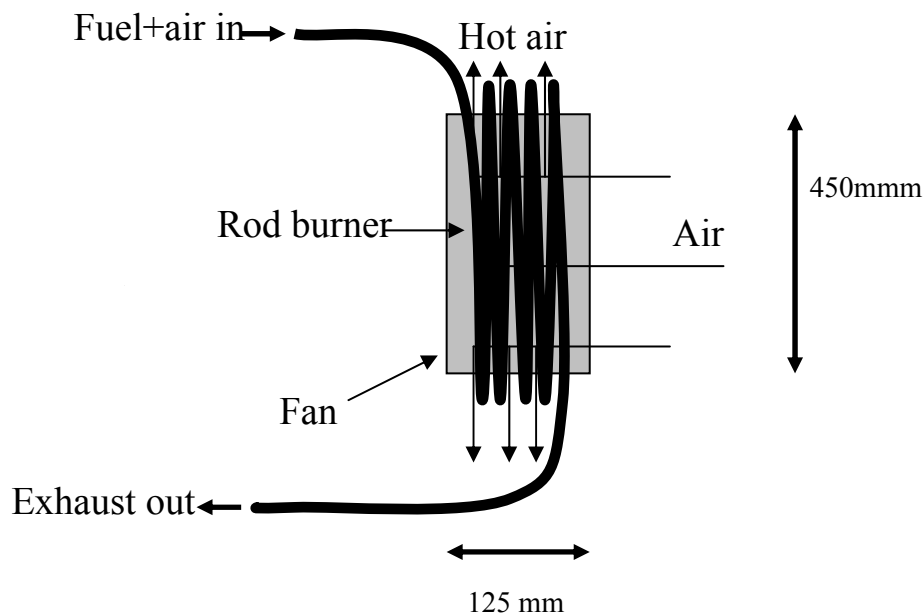


Figur 10a.



Figur 10b.

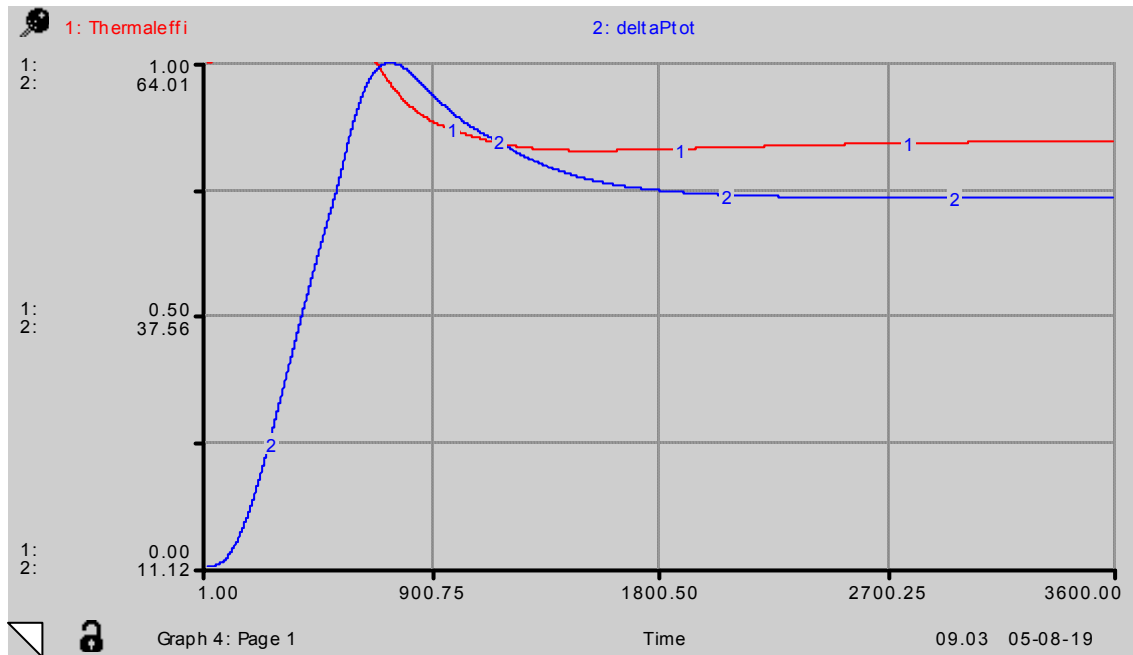
Figur 10. Simuleringar som visar hur termiska effektiviteten (Thermaleffi) varierar med tillförd effekt (Power). Grafen visar även andel värme som tillförs till omgivningsluften via strålning (qradeffi) respektive konvektion (qconveffi). a) Fläktflöde=10 m³/h, b) Fläktflöde=50 m³/h.



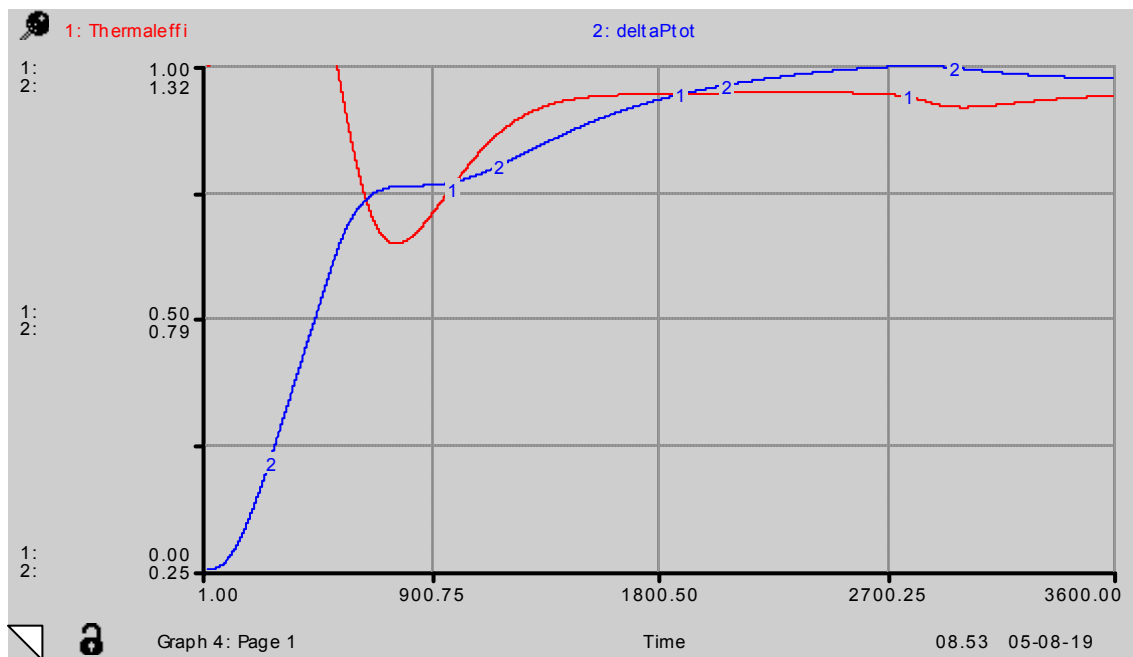
Figur 11. Schemastik principskiss av ett tänkbart rörbrännarsystem för luftuppvärmning i matlagingsugn.

Inverkan av olika fläktflöden illustreras vid jämförelse av figurer 10a-b, där man tydligt ser att ett ökat fläktflöde resulterar, som önskat, i ett högre konvektionsbidrag på bekostnad av ett lägre strålningsbidrag som i sin tur är en följd av att rörgodsets temperatur kyls ned utav fläktluften.

En generell nackdel med katalytiska rörbrännare jämfört med katalytiska brännare av andra geometrier är att tryckfallet över systemet tenderar att bli högt. Ett sätt att reducera tryckfallet i en rörbrännare är att, istället för att ha en enda rörbrännare i systemet, koppla flera rörbrännare parallellt utan det att den totala rörlängden förändras, se simuleringsresultat i figurer 12a-b. Notera att resultaten i figur 12b visar det beräknade tryckfallet/rörbrännare, dvs tryckfallet måste i detta fall multipliceras med antal satta rörbrännare för att kunna jämföras med resultaten i figur 12a. I detta simuleringsexempel, då antal rörbrännare=4, så blir alltså det uppskattade totala tryckfallet ca. 5 mbar istället för 50 mbar, dvs endast en tiondel. Förutom att det totala tryckfallet drastiskt minskar så utvinns med denna konstruktion också en högre termisk effektivitet (i detta exempel 94 jfr. m. 84 %), som i sin tur är en konsekvens av att den tillförda brännareffekten till varje enskild rörbrännare minskar (se simuleringsresultat i figur 10). Andra metoder för att minska tryckfallet är naturligtvis att använda sig av rör av större diameter samt optimering av driftsvillkor såsom förbränningstemperatur och mängden luftöverskott (dvs lambda-värdet). Oavsett dessa möjligheter till tryckfallsreducering så bör man om möjligt, och särskilt i de fall då tryckfallet är av kritisk betydelse, även beakta andra typer av katalytiska brännarkonstruktioner utav en annan, mindre tryckfallsgivande, geometri, tex en cirkulär sådan, som i likhet med rörbrännaren då är luftkyld. För att ytterligare öka den termiska effektiviteten så bör man dessutom inkludera värmeväxling mellan brännarens avgaser och luftflödet från fläkten.



Figur 12a.



Figur 12b

Figur 12. . Simuleringar som visar hur termiska effektiviteten (*Thermaleffi*) och tryckfallet varierar med antal rörbrännare inkluderad i ett rörbrännarsystem. a) antal rörbrännare=1, längd/rör=1, tillförd bränsleeffekt/rör=3 kW. b) antal rörbrännare=4, längd/rör=0.25, tillförd bränsleeffekt/rör=0.75 W. I båda fallen har ett bränsle-luft-inlopp samt konstant densitet hos den katalytiska spiralen antagits.

Till slut, vad beträffar rörbrännarsystemets uppstartstid så önskas givetvis en så snabb som möjligt, enligt GdFs specifikation < 1 minut. Enligt de simuleringsresultat som tidigare visats i denna rapport verkar uppstartstiden vara betydligt längre. Uppstartstiden är dock starkt beroende av uppstartsbrännarens och värmerekuperatorns kapacitet, vilket i sin tur naturligtvis kan anpassas och optimeras till en given specifikation. Vid de tidigare visade simuleringarna sattes uppstartsbrännarens och värmeåtervinningens kapacitet till ett fixt godtyckligt värde för att möjliggöra illustration av olika parametrars betydelse, tex spiraldensiteten, dvs ingen optimering med avseende på uppstartsbrännarens och värmerekuperatorns effektivitet har genomförts i detta projektstadium, utan det planerades att senare utföras i samband med konstruktion och inköp av material (dvs under projektfas 2). Förutom uppstartsbrännarens och värmerekuperatorns kapacitet så måste även ett flertal andra faktorer beaktas och optimeras för att möjliggöra en snabb uppstartstid. Viktiga parametrar i detta avseende är katalysatormängd, som i rörbrännarens fall regleras via spiraldensitet och katalysatorskiktets tjocklek, katalysatorns aktivitet (val av aktiv fas) samt driftbetingelser under själva uppstarten som te x tillförd bränseleffekt och luftöverskott.

3. Sammanfattning

Under hösten 2004 initierade Catator AB utveckling och anpassning av en katalytisk rörbrännarprototyp för naturgasförbränning. Projektet var på uppdrag av Gaz de France (GdF) som avsåg att använda rörbrännaren för luftuppvärmning i matlagningsugnar. Arbetet var planerat att omfatta en designfas, en konstruktion- och utvärderingsfas och till sist en slutfas inkluderande avrapportering samt leverans av brännarprototypen till GdF. Projektet skulle samfinansieras av GdF, Catator AB och SGC AB. Tyvärr blev det tvunget att, på grund av centrala omorganisationer inom GdF verksamhetsområden, avbryta arbetet efter det att Catator AB genomfört projektets första hälft. Resultaten av det arbete som slutfördes innan detta avbrott redovisas i denna rapport.

Detta projekt föregicks av en förstudie, finansierad av GdF, där möjligheten till att katalytisk förbränna naturgas i Catators rörbrännarkoncept undersöktes. Problem, relaterade till naturgasens egenskaper, identifierades och möjliga lösningar föreslogs. Man konstaterade att en katalytisk rörbrännare för naturgas måste inkludera någon form av uppvärmningsanordning för att initiera förbränningen samt en välanpassad värmerekuperator för att bibehålla stabila, kontinuerliga driftbetingelser efter det att förbränningen startats. Vidare demonstrerades vikten av att optimera för en homogen temperaturprofil längs hela rörlängden (gradering av katalystordensitet, antal bränseinlopp, mm) för att säkerhetsställa att hög termisk effektivitet i kombination med lång livslängd uppnås. Dessa resultat låg som grund till det i den här rapporten redovisade arbete.

Med hjälp av olika beräknings- och simuleringsverktyg utvecklades ett nytt rörbrännarkoncept, väl anpassat till GdFs tekniska specifikationer, som designats på så sätt att de problem som tidigare identifierats i förstudien kunnat lösas. Resultaten visar att brännarkonceptet har stor potential att resultera i hög termisk verkningsgrad samtidigt som emissionerna kan hållas låga. Metoder för optimering av rörbrännarens prestanda med avseende på parametrar såsom termisk effektivitet, emissioner och tryckfall beskrivs och diskuteras, bl a med hjälp av en i det här arbetet utvecklad matematisk modell som tar hänsyn till aktuella värme- och masstransporter samt de fysiska inner- och ytterdimensionerna som det nya föreslagna brännarkonceptet innehar.



www.sgc.se ● [epost info@sgc.se](mailto:info@sgc.se)
