

|  |   |
|--|---|
| Energimyndighetens titel på projektet – svenska<br>Ny teknologi för förbränning med låga utsläpp av lågvärdig gas från deponi eller förgasning |   |
| Energimyndighetens titel på projektet – engelska<br>[Klicka här och skriv]   |   |
| Universitet/högskola/företag<br>Cleanergy AB   | Avdelning/institution<br>Advanced Engineering |
| Adress<br>Regnbågsgatan 6, 417 55 GÖTEBORG   |   |
| Namn på projektledare<br>Lars Gustavsson   |   |
| Namn på ev övriga projektdeltagare<br>Abdallah Abou-Taouk, Martin Nilsson, Pontus Wettrell, Jan Holmström, Håkan Sandberg                      |   |
| Nyckelord: 5-7 st<br>Brännkammare till Stirlingmotorer, Kinetik, CFD, lågenergi gaser  |   |

## Förord

Projektet 38709-1 ” *Ny teknologi för förbränning med låga utsläpp av lågvärdig gas från deponi eller förgasning* ” startade i augusti 2014 och pågick under en tid av 2 år. Projektet utfördes av anställda på företaget Cleanergy AB och var finansierat av Energimyndigheten genom Energiforsk (tidigare Svenskt Gas Centrum).

Referensgruppen som följt projektet var följande personer:

Jenny Rissler (Energiforsk)

Lars-Erik Eriksson (Strömningslära - Tillämpad mekanik, Chalmers Högskola)

Ingemar Denbratt (Förbränningslära - Tillämpad mekanik, Chalmers Högskola)

Martin Nilsson och Lars Gustavsson (Cleanergy AB)

## Innehållsförteckning

|                          |    |
|--------------------------|----|
| Sammanfattning .....     | 2  |
| Summary .....            | 3  |
| Inledning/Bakgrund ..... | 4  |
| Genomförande .....       | 5  |
| Resultat .....           | 6  |
| Diskussion.....          | 12 |
| Publikationslista.....   | 13 |
| Referenser, källor.....  | 13 |
| Bilagor .....            | 13 |

## Sammanfattning

Förbränning i brännkammare är en viktig del av dagens elproduktion och med världens ökade energibehov samt en ökad mängd bioenergi i samhället genom användningen av förnyelsebara bränslen kommer energieffektivisering av förbränningsteknik fortsätta att vara viktigt. Cleanergy har utvecklat en Stirling motor som drivs av en brännkammare (GasBox). Denna kan bränna både naturgas, vars främsta beståndsdel är metan, samt deponigas som har en mycket varierande gassammansättning. Det har på senare år blivit tydligt för Cleanergy att sammansättningen av deponigasen kan variera avsevärt, beroende på olika faktorer, så som plats, temperatur, tryck, deponisammansättning, tid etc. Dessa faktorer leder till variationer i gasens värmevärde och därmed variation i driften av GasBox motorn. Detta ställer stora och extrema krav på flexibilitet i driften av brännkammaren.

Den varierande sammansättningen av deponigasen ger olika förbränningsegenskaper då gasämnens beståndsdelar (gasmolekyler) varierar. Molekylerna/ämnena i gasen ger olika flamhastigheter och vissa molekyler ger en högre diffusion jämfört med andra. Dessa egenskaper behöver undersökas mer i detalj och därmed är simuleringar av dessa deponigaser viktiga eftersom det ökar detaljförståelsen samt möjliggör undersökning av förhållanden som kan vara svårt, omöjligt och/eller kostsamma att utföra experimentellt.

Detta projekt handlar dels om att ta fram nya kinetikscheman för förbränning av metanbaserade låg-värdiga gaser. Den planerade metoden var utvecklad av bl. a Chalmers. I projektet togs det fram optimerade reducerade kinetik scheman som användes i förbränningssimuleringar av GasBox brännaren. Ett viktigt syfte med simuleringarna var att undersöka vilken av flera kemiska mekanismer av olika komplexitet som bäst och mest tidseffektivt matchar de teoretiska resultaten. För att nämna något så utvecklades en optimerad reducerad global reaktion mekanism, ett 4-steps schema för deponigasen med gassammansättningen 24.2% CH<sub>4</sub>, 21.6% CO<sub>2</sub>, 2.0% O<sub>2</sub> och 52.2% N<sub>2</sub> baserat på volymen. Denna gas var uppmätt i deponin placerad i Eslöv [1]. Den kemiska beräkningsmekanismen gav bra överensstämmelse med de teoretiska kemiska beräkningarna samt de uppmätta emissionerna ute på Eslövs deponi.

Den andra uppgiften i projektet var att CFD modellera Cleanergys befintliga brännkammare med olika gaser och de nya framtagna reaktions mekanismer för att förstå nuläget med avseende på strömning och förbränning. Här har både metangas, propangas samt deponigaser simulerats. Generellt kan man fastställa att CFD simuleringarna var kapabla att prediktera någorlunda rätt flödes- och förbrännings storheter jämfört med de experimentella resultaten, närmare bestämt emissioner, NO<sub>x</sub> och temperaturer.

Slutuppgiften var att föreslå modifieringar utifrån dagens brännkammare för att nå övergripande mål och ta fram konstruktionsunderlag samt bygga och testa en prototyp. Numerisk gjordes ett noga och gediget arbete där man konstruerade en ny typ av brännkammare baserat på en roterande luft och gas flöde. De numeriska resultaten gav en djup förståelse och visade en ny typ av teknik som möjliggör en

termisk effekt upp till 60 kW baserat på en 18 % metanhalt. Simuleringar på prototypen visar också att de är möjligt att nyttiggöra elproduktion ner till 15 % metanhalt baserat på en lägre effekt. Projektmålet var att tillverka och testa prototypen. Att producera en fungerande fysisk prototyp på ett helt nytt brännarkoncept visade sig vara betydligt mera omfattande och resurskrävande än det var budgeterat och planerat. Detta resulterade i att denna slutuppgift inte kunde slutföras i form av en fysisk prototyp.

Strategiskt så borde nästa steg vara att kunna bygga en fysisk prototyp och testa denna i en Stirling motor (GasBox) med olika deponigaser samt lågenergi gaser. Experimentell data i form av temperaturer, emissioner och hastigheter hade varit mycket värdefullt för att kunna validera beräkningsmetoden på Cleanergy samt verifiera de numeriska resultaten för den nya prototypen.

## Summary

Combustion is an important part of electricity production. The increasing energy need and an increased amount of bioenergy in society through the use of renewable fuels is likely to increase. Cleanergy has developed a combustion chamber located in a Stirling engine and is operated primarily on natural gas, whose main component is methane and landfill gas, which has a large varying gas composition. In recent years, it has been seen that the composition of the landfill gas has varied more, depending on various factors such as location, temperature, pressure, landfill composition and time of the landfill. These variations lead to variations in the heating value and thus variation in the operation of the Cleanergys GasBox engine. This requires flexibility in operation of the combustor.

The different composition of the landfill gas provide different combustion characteristics since the gas molecules varies between different species. The species gives different flame speeds and certain components gives a larger diffusion rate than others. These properties need to be investigated in more detail and thus are simulations of these landfill gases important because it increases understanding and enables detailed investigation of the circumstances that may be difficult or costly to perform experimentally. The project is about developing new kinetic mechanisms for the combustion of low energy based gases. The used method was developed by Chalmers University of Technology, among others. An important aim of the simulations was to examine which of several chemical mechanisms of various complexities that best and most time efficient match the theoretical results. For example, a 4-step reaction mechanism was developed for landfill gas 24.2% CH<sub>4</sub>, 21.6% CO<sub>2</sub>, 2.0% O<sub>2</sub> and 52.2% N<sub>2</sub> by volume, this gas was measured in the landfill located in Eslöv [1]. This chemical calculation mechanism gave fairly good agreement with the theoretical results and the measured emissions out of Eslöv landfill.

The second task was to model Cleanergy existing combustion chambers with different fuels and new kinetic mechanisms to understand the current situation with regard to flow and combustion properties. Here, methane gas, propane gas and

landfill gas were simulated. Generally, one can determine that the simulations were able to reasonably predict the correct flow and combustion properties compared to the experimental results, such as major emissions, NO<sub>x</sub> and temperatures.

The final task was to propose modifications based on today's combustion chamber to reach the overall goal and to develop design documentation and to test this prototype. Numerically a major work was performed where a prototype was constructed based on a rotating air and gas flow (swirling flow). The result has shown and given a deeper understanding of a new type of technology that allows a thermal power up to 60 kW based on an 18% methane content. Simulations of the prototype also shows that is possible to utilize electricity down to 15% methane content based on a lower power. The project goal was to manufacture and test the prototype. To produce a functioning physical prototype of a completely new concept proved to be considerably more extensive than initially budgeted and therefore could not be carried out.

Strategically, the next step would be to build a physical prototype and test it in a Stirling engine (GasBox) with landfill gas and low energy gas. Experimental data in terms of temperatures, emissions and velocities had been very useful to validate the calculation method used in Cleanergy and verify the numerical results of the new prototype.

## **Inledning/Bakgrund**

Stirlingmotorers brännkammare konstruerades i sitt ursprungliga utförande för naturgas som bränsle under tidigt 90-tal och motorer för gasdrift med naturgas var Cleanergys föregångares huvudmarknad under flera år. Sedan dess har brännkammaren kontinuerligt modifierats i flera steg, fortfarande med naturgas som huvudsakligt bränsle. Under 2010 påbörjades ett utvecklingsarbete med gas med lägre värmevärde än naturgas som bränsle såsom biogas framställt genom rötning. Vunna erfarenheter gav vid handen att deponigas var mer intressant än biogas från rötning då vissa föroreningar förekommer i lägre halt i deponigas.

En pilotanläggning bestående av två stycken Stirlingmotorbaserade genset har 2012 installerats på en deponi utanför Eslöv i ett projekt samfinansierat med Energimyndigheten. Projektet har demonstrerat att deponigas med en metanhalt under 40 % kan användas för att driva stirlingmotorer. Konventionella tekniker för att generera el har ofta har en nedre gräns på 40 % metan. Cleanergy har bedömt att marknaden har en betydande potential och byggde därför under 2013 ut befintlig kapacitet inom modellering och simulering, inklusive förbrännings-teknik. Brännkammaren har i nuvarande utförande av Stirlingmotor anpassats till mer lågvärdigt bränsle, och till dags dato är de största förändringarna gjorda i styrsystemet samt i systemet för bränsletillförsel. Brännkammaren har ytterligare förbättringspotential, framförallt i strömningshänseende. I dagsläget nås inte full effekt med metanbaserade bränslen under 30 % metanhalt och bränsle med mindre än 20 % kan inte brännas alls, eller endast på mycket låg effekt. Det är emellertid

önskvärt att nå full effekt även med endast 20 % metanhalt då metanhalten sakta klingar av i deponier och efter tid sjunkit under 20 %.

Integrationen av detaljerade kinetik i turbulenta flamsimuleringar är en av de svåraste tekniska utmaningarna som finns idag. Komplexiteten i förbränningskemi måste minskas för att minska både antalet frihetsgrader och styvheten av de partiella differentialekvationer som löses samtidigt med flödet och förbränningen. Detta är något man forskat om i ca 40 år och många olika metoder är föreslagna [2-3]. När det gäller industriella tillämpningar, t.ex. en Stirlingmotor samt gasturbin där brännaren ofta matas av flera strömmar av bränsle, kall och uppvärmd luft, cirkulerande brända gaser, och områden av förblandade och delvis förblandade blandningarna så är komplexiteten svår. I dessa komplexa flödessituationer, kan kemi bli besvärlig på grund av för stor ett antal styrparametrar (bränsle, luft, EGR, värmeförlust etc.). En metod för att lösa detta är att använda optimerade reducerade globala reaktionsmekanismer [3-5] i CFD simuleringar, i stället för tabellering av kemin av ett komplext system. Använda globala mekanismer i CFD simuleringar är fördelaktigt eftersom endast ett fåtal komponenter är av intresse i många industriella tillämpningar.

I allmänhet, för att kunna använda CFD som ett designverktyg i brännkammare simuleringar är det nödvändigt att korrekt prediktera reaktionshastigheter, temperaturer samt CO och NO<sub>x</sub> koncentrationer. Den reducerade mekanismen erbjuder också lösningar som är betydligt billigare i både CPU-tid och minnesallokeringar än tabellmetoder. Flera olika reducerade reaktionsmekanismer för kolväten är beskrivna i litteraturen [2]. Ett antal publicerade globala reaktionsmekanismer har visat att dessa mekanismer har kapacitet att matcha flera aspekter av lågorna trots den förenklade kemin. Nackdelen med de flesta av de publicerade globala scheman är att de inte är tillräckligt flexibla för att klara ett brett spektrum av driftförhållanden (t ex ekvivalensförhållande och lambda tal variationer) som förekommer i de flesta industriella gasturbiner.

## Genomförande

I det första arbetspaketet gjordes en grundlig litteraturstudie på utvecklade förenklade reaktionsmekanismer samt ett arbete att utveckla ett antal förenklade globala reaktionsmekanismer för olika gassammansättningar av deponigas. Metoden som användes var utvecklad tidigare i Chalmers Högskola [6]. Optimeringsstrategi för att optimera globala reaktionsmekanismer är baserade på modeFRONTIER som optimeringsprogram kopplad till den kommersiella programvaran CHEMKIN (kemiverktyg). Metoden bygger på en etablerad uppsättning, där Arrhenius parametrar för ett globalt schema bestäms från en uppsättning av referens detaljerade kemi lösningar. Optimeringen utförs så att balansekvationer för gasmolekylerna och temperatur inblandade i det reducerade systemet, matchar den detaljerade kemi lösningen. En 4-stegs optimerad global reaktionsmekanism togs fram för deponigas blandningen 24.2% CH<sub>4</sub>, 21.6% CO<sub>2</sub>, 2.0% O<sub>2</sub> och 52.2% N<sub>2</sub> baserat på volymen. Denna gas var uppmätt i deponi

placerad i Eslöv [1]. Den kemiska beräkningsmekanismen gav bra överensstämmelse med de teoretiska resultaten samt de uppmätta emissionerna ute på Eslövs deponi. I huvudsak så har Dr. Abdallah Abou-Taouk på Cleanergy arbetat med detta arbetspaket.

I det andra arbetspaketet har CFD programvaran Ansys CFX använts för alla simuleringar. Numeriska modeller av Cleanergys nuvarande brännkammare har byggts i CAD-program för att etablera ett nuläge samt för fortsatt arbete. Ett stort arbete har gjorts för att bygga ihop modellerna samt förenkla dem för att anpassa dem till CFD simuleringar. Både tidsberoende och icke-tidsberoende turbulence modeller användes för att erhålla representativa strömningsfält. Kemin representerades av den nya optimerade global reaktionsmekanismen. I huvudsak så har avdelningen "AE - Advanced Engineering" på Cleanergy arbetat med detta arbetspaket. Simuleringarna har utförts på Cleanergys nya beräkningskluster bestående av nästan 100 processorer.

I det tredje arbetspaketet har även här AE på Cleanergy arbetat med detta paket och tagit fram en ny prototyp av brännkammaren som skall möjliggöra en säkrare och stabilare drift med möjligheter att bränna deponigaser med en metanhalt ner mot 18 %.

## Resultat

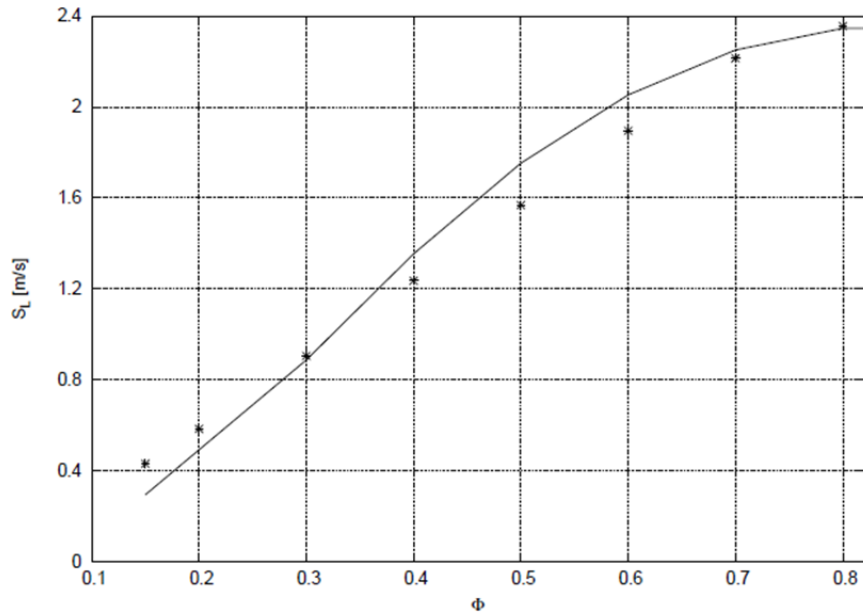
### Arbetspaket 1.

Optimeringen utfördes genom att välja en uppsättning av endimensionella och förblandade flammor som beräknades med den detaljerade GRI-Mech 3.0 mekanismen [7]. Detta utfördes för en varierad uppsättning av driftsförhållanden. Resultatet sparades för att ge referenslösningar. Samma uppsättning av lågor simuleras vidare genom den fyra-stegs mekanism som visas i tabell 1. Denna mekanism är framtagen för arbetstrycket en bar, inloppstemperaturer från 295 - 1000 K och ekvivalensförhållanden (luft/bränsle förhållande) från 0,15 till 1. En funktion definieras vidare för att mäta och minimera avvikelsen mellan de två lösningar. De valda punkterna löses interaktivt med optimeringsverktyget modeFRONTIER, tills funktionen når sitt minimum och den bästa uppsättningen av parametrar bestäms för det globala schemat, tabell 1.

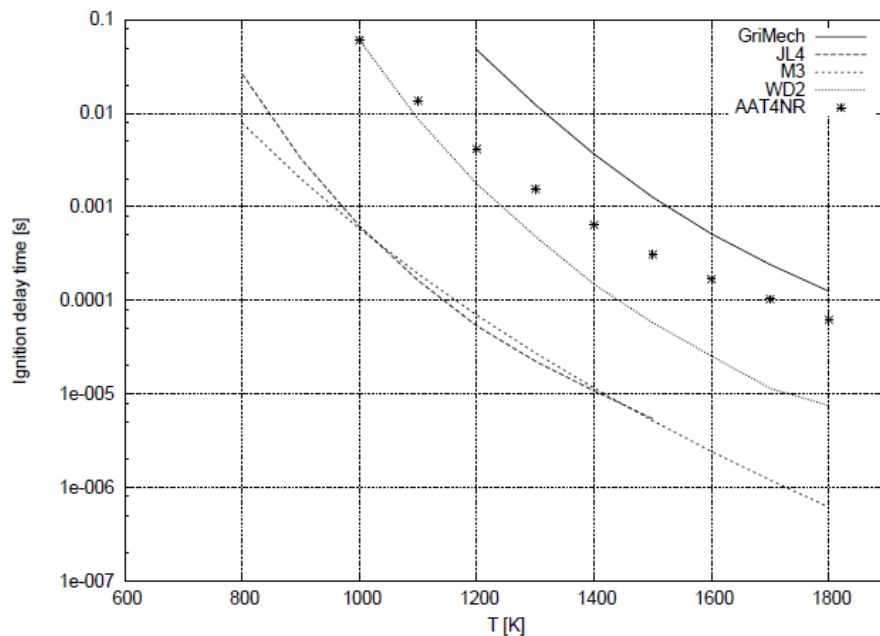
Tabell 1: Arrhenius koefficienter för det optimerade globala reaktionsmekanismen

| Reaction   | $A_i$    | $B_i$ | $E_{a_i}$ | Reaction order                                  |
|--|----------|-------|-----------|---|
| $\text{CH}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$ | 2.2E+15  | -0.1  | 40.5      | $[\text{CH}_4]^1, [\text{O}_2]^1$               |
| $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$       | 2.08E+18 | 0.5   | 42.0      | $[\text{H}_2]^{1.2}, [\text{O}_2]^{0.9}$        |
| $\text{CO}_2 \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{CO}$               | 1.0E+11  | -0.5  | 42.75     | $[\text{CO}_2]^1$                               |
| $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$      | 6.0E+14  | -0.4  | 40.0      | $[\text{CO}]^{0.6}, [\text{H}_2\text{O}]^{0.7}$ |

Figur 1 visar den laminära flamhastigheten och figur 2 tändningsfördröjningstiden vid atmosfärstryck. Det nya optimerade 4-steps mekanismen predikterar dessa egenskaper rimligen väl jämfört med den detaljerade mekanismen och betydligt bättre än andra globala reaktionsmekanismer.



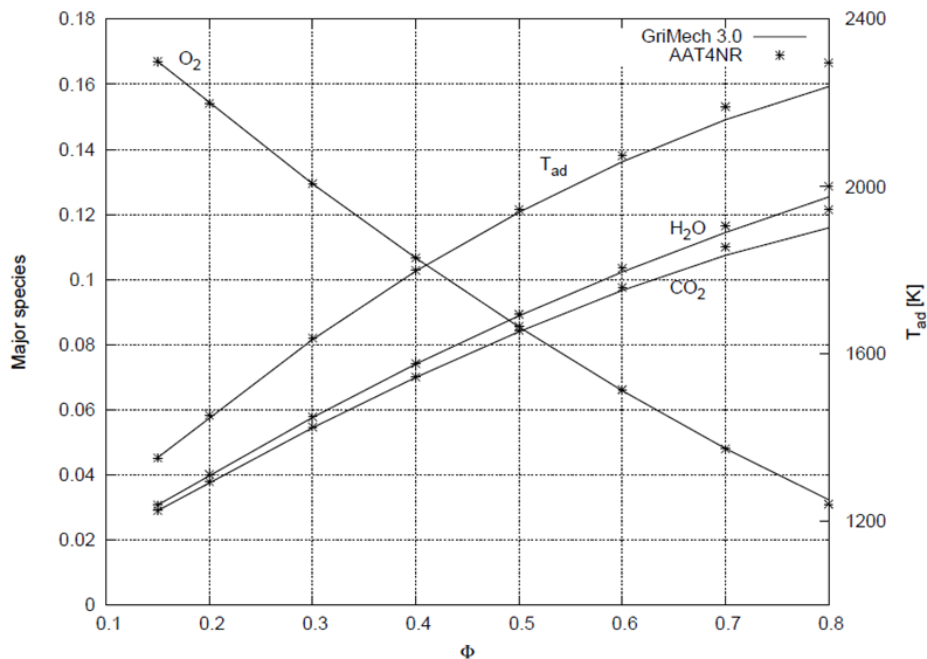
Figur 1: Laminära flamhastigheten vid olika driftfall.



Figur 2: Tändningsfördröjningstiden vid olika driftfall.



Figur 3 visar detaljerad kemi mekanismen GRI-Mech 3.0 jämviktskoncentrationer och den adiabatiska temperaturen vid olika ekvivalensförhållanden, tillsammans med det reducerade globala reaktion mekanismen framtagen i detta projekt, kallat AAT4NR. Det framgår att den optimerade globala mekanismen (AAT4NR) fångar jämviktsförhållandet och den adiabatiska temperaturen mycket bra för det aktuella intervallat. En mer utförlig och detaljerad beskrivning av optimeringen samt resultatet av kemi-optimeringen kan hittas i publikationen av A. Abou-Taouk 2015 [1].

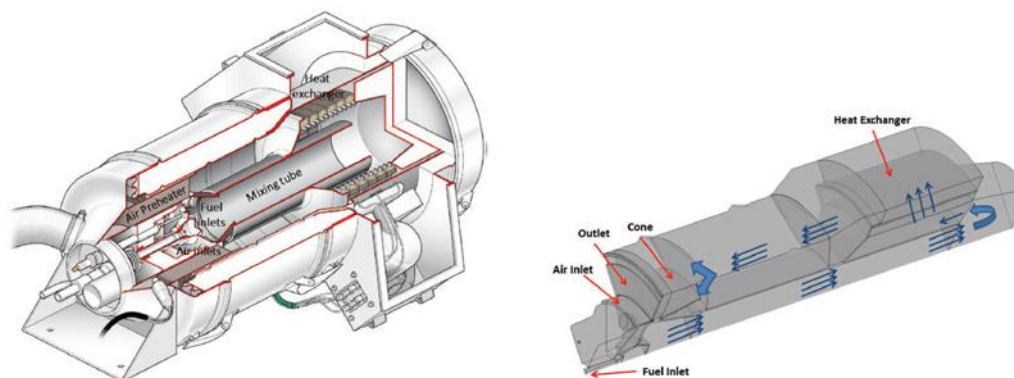


Figur 3: Jämvikts koncentrationer (molfraktioner) av olika ämnen och adiabatiska fläms temperaturer. Det optimerade schemat plottad mot den detaljerade GRI-Mech 3.0 mekanismen; deponiblandning.

## Arbetspaket 2.

Figur 4 visar en schematisk bild av GasBox brännaren samt CFD-domänen som användes i simuleringarna. Bränslet och luften blandas samman med EGR-blandningen i förkammaren uppströms om blandningsröret. Denna blandning antänds spontant. En tillräcklig blandning uppnås genom att rikta bränslestrålen mot luftstrålen. Gasblandningen gör sedan en 180 graders sväng nedströms blandningsröret och sedan passera värmväxlaren. Slutligen så fortsätter gasblandningen bakåt mot utloppet där en del riktas av med hjälp av en kona tillbaka till brännkammaren och en del lämnar domänen genom utloppet. CFD modellen innehåller de viktigaste komponenterna, in och utlopp, värmväxlaren, kona, luft och bränslekanaler. För att spara beräkningstid och minne så byggdes och modellerades en 60 graders sektor av brännkammaren istället för hela geometrin.





Figur 4: Till vänster: En genomskärning av GasBox brännaren och till höger syns CFD modellen.

Randvillkoren är mycket viktiga när det gäller CFD simuleringar och är oftast det som har störst osäkerhet. Specificerade massflödes hastigheter sattes vid inloppen för luftintaget och bränsleinloppet. Den förvärmade luftens temperatur sattes till 1000 K. Även strålning var inkluderade i CFD simuleringarna som tyvärr leder till ytterligare transportekvation att lösa. De global lambda talet i brännaren är runt 0.2 inklusive EGR blandning. Värmeväxlaren ingår i CFD simuleringar och en kylfläns har införts för att representera mängden av den värme som extraheras av värmeväxlaren i Stirling-motorn.

Tabell 2 visar en jämförelse mellan predikterade CFD-rultat (både k- $\omega$  SST som är tids oberoende modell samt SAS modell som är tidsupplöst) och mätningar. Det första att notera är att SAS modellen predikterar utsläppen och NO<sub>x</sub> bättre jämfört med k- $\omega$  SST. Detta överensstämmer med tidigare studier. Anledningen till detta beror på att de icke-tidsberoende modellerna under predikterar temperaturen i jämförelse med de mer transienta beräkningarna. En lägre temperatur ger en lägre NO<sub>x</sub> prediktering eftersom NO<sub>x</sub>-koncentrationen är starkt kopplad till temperaturen. Generellt så visar CFD simuleringarna tillsammans med den optimerade kemin en god överensstämmelse med mätdata. En mer detaljerad läsning av resultaten från detta arbetspaket kan hittas i referensen [1].

Tabell 2: Experimentell data i jämförelse med CFD resultat.

| Emissions                    | Experiment | CFD k- $\omega$ -SST | CFD SAS-SST |
|------------------------------|------------|----------------------|-------------|
| Landfill: CO <sub>2</sub>    | 17.4%      | 15.3%                | 16.1%       |
| Landfill: O <sub>2</sub>     | 7.3%       | 7.4%                 | 7.0%        |
| Landfill: NO <sub>x</sub>    | < 10ppm    | < 1ppm               | < 10ppm     |
| Natural gas: NO <sub>x</sub> | 150ppm     | —                    | 180ppm      |

### Arbetspaket 3.

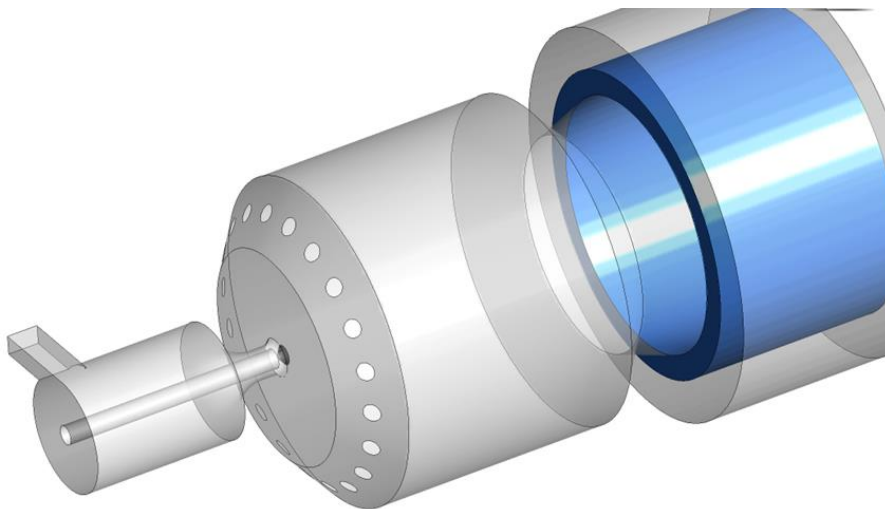
I detta arbetspaket var målet att föreslå modifieringar utifrån dagens brännkammare för att nå övergripande mål och ta fram konstruktionsunderlag samt bygga och testa en prototyp. Numerisk gjordes ett noggrant och gediget arbete där man konstruerade en ny typ av brännkammare baserat på en roterande luft och gas flöde.

AE avdelningen på Cleanergy hade följande filosofi när brännkammaren designades:

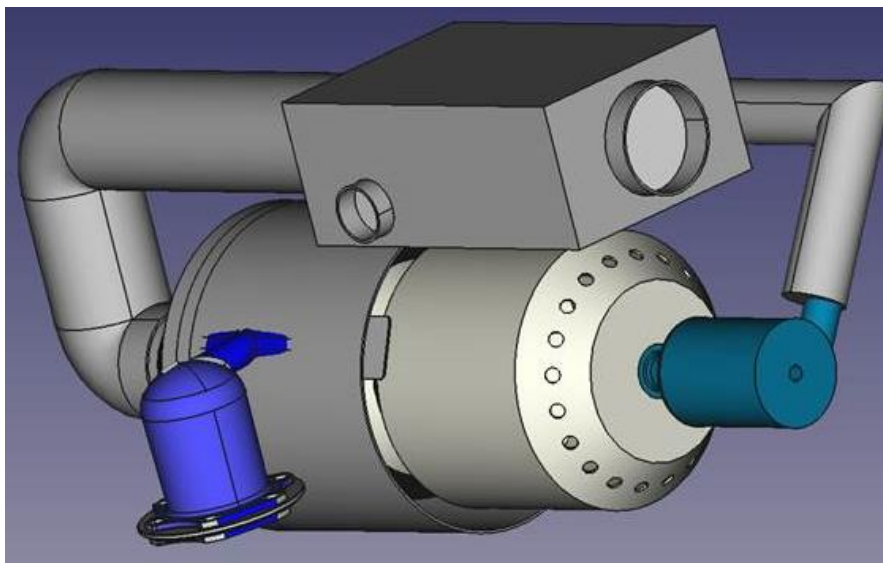
- Använda samma geometri för ”heater head” i Stirling motorn
- Skapa ett roterande luft/bränsle flöde uppströms brännaren
- Förbättra blandningen genom att förbättra placeringen av bränsleinblandning och på samma gång åstadkomma att bränslet och luftflödet skulle "samverka" med varandra.
- Hastighetsfältet i brännaren skulle inte vara beroende av massflödes variationer samt variationen på de olika gassammansättningarna i deponigaserna
- Skapa en intern recirkulation på flödesfältet innan värmeväxlaren (CGR) istället för en EGR.

De ovan punkterna togs med när olika design förslag gjordes. AE på Cleanergy lyckades designa och simulera en ny brännare (kallad till PAM brännare) som skapade en hög rotation och expandera detta i en stor volym som skapade en negativ axiell rörelse i centrum på brännaren. På så sätt fick man en mycket jämnare temperatur variation i brännaren, en mycket bra blandning av luft och gas samt en intern recirkulation med varma gaser. Fördelen med det sistnämnda är nämligen att man använde denna recirkulation tillbaka till förbränningszonen innan man har hunnit extrahera värmen från den. På så sätt fås en stabilare drift samt möjligheten att bränna gaser med lägre metan halt.

Figur 5 visar den simulerade CFD modellen av PAM brännaren. Uppströms i mitten så är det ett bränslerör som släpper gasen i ”tratten”. Den första kaviteten skapar ett rotationsflöde som ökar hastighet in i kontraktionen. Detta roterande flöde expanderas sedan kraftigt i ingången till brännkammaren. Figur 6 visar själva konstruktionsunderlagen till PAM brännaren tillsammans med värmeväxlare och en av Stirling motorns cylindrar.

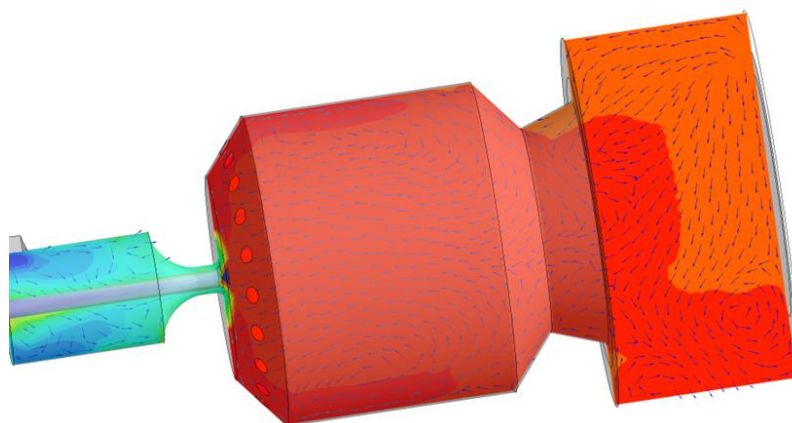


Figur 5: CFD modellen av den nya PAM brännaren.



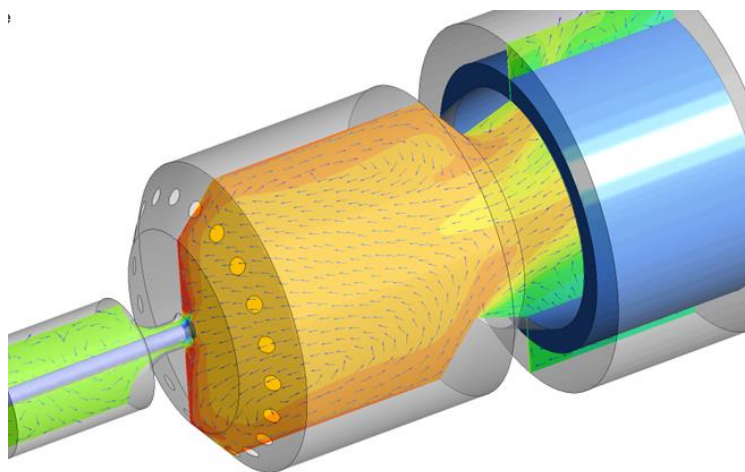
Figur 6: Konstruktionsunderlags ritningar för den nya PAM brännaren.

De numeriska resultaten gav en djup förståelse av och visade en ny typ av teknik som möjliggör en termisk effekt upp till 60 kW baserat på en 18 % metanhalt. Simuleringar på PAM brännaren visar också att det är möjligt att nyttiggöra elproduktion ner till 15 % metanhalt baserat på en lägre effekt. Många olika typer av simuleringar har körts som innehållit olika kemiska reducerade mekanismer, olika turbulensmodeller, olika gasblandningar, olika effekter, olika driftfall samt olika geometrier. För att nämna några resultat så visar Figur 7 temperatur och hastighets vektorer för den nya PAM brännaren simulerade med tidskrävande tidsupplöst turbulensmodell. Gasen här är propan och är till för att simulera uppstarten av brännaren. Generellt är resultaten mycket positiva och inger hopp.



Figur 7: PAM brännaren simulerade med propan gas och uppstarts driftfall. Temperatur och hastighetsvektorer synliga i bilden. Rött står för varm blandning och blått för kallt.

Figur 8 visar också temperatur och hastighets vektorer för den nya PAM brännaren simulerade med tidsupplöst turbulensmodell. Gasen här är "Eslöv" blandningen bestående av 24.2% CH<sub>4</sub>, 21.6% CO<sub>2</sub>, 2.0% O<sub>2</sub> och 52.2% N<sub>2</sub> baserat på volym. Den nya optimerade reaktions mekanism från arbetspaket 1 för denna blandning användes i simuleringen. Resultaten är mycket positiva med hänseende till utsläppsnivåer, flödesfält samt temperaturer.



Figur 8: PAM brännaren simulerade med "Eslöv" blandningen. Temperatur och hastighetsvektorer synliga i bilden. Rött står för varm blandning och blått för kallt.

## Diskussion

Resultaten av de olika arbetspaketen är mycket positiva. Metoden från arbetspaket 1 har visat sig fungera utmärkt och kan användas för olika gas-sammansättningar från både deponier men även biogas anläggningar. Detta innebär att man kan spara en hel del beräkningstid när man designar nya typer av brännkammare som skall vara mer robusta och flexibla i termer av bränsleblandningar.

Erfarenheten och lärdomarna från arbetspaket 1 och 2 användes i det sista arbetspaketet som hade syfte att utveckla och testa en mer robust brännare. En serieproduktion av den nya PAM brännaren kommer att ha ett mycket starkt positivt bidrag och effekt för ett hållbart samhälle. Dels så reducerar den utsläppen ytterligare (under 10ppm NO<sub>x</sub>) men det som är ännu viktigare är att många gaser från deponier och andra anläggningar som har en metanhalt mellan 15-30% skulle kunna tas tillvara för en el och värmeproduktion istället för att facklas bort i atmosfären. I linje med det så är byggandet av en fysisk prototyp av PAM brännaren oerhört viktigt och speciellt få testa den och få tillgång till experimentell data

## Publikationslista

A. Abou-Taouk, P. Wettrell, L. E. Eriksson. CFD investigation of a Stirling engine flexi fuel burner based on MILD combustion. In 8th Inter. Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer. (2015).

## Referenser, källor

- [1] A. Abou-Taouk, P. Wettrell, L. E. Eriksson. CFD investigation of a Stirling engine flexi fuel burner based on MILD combustion. In 8th Inter. Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer. (2015).
- [2] W.P. Jones, R.P. Lindstedt, *Combust. Flame*, 73:233–249, 1988.
- [3] B. Franzelli, E. Riber, M. Sanjose, T. Poinso, *Combust. Flame*, 157(7):1364–1373, 2010.
- [4] Abou-Taouk. A., Sigfrid. I., Ronald. W., Eriksson. L.-E. A fourstep global reaction mechanism for CFD simulations of flexi-fuel burner for gas turbines. In *Turbulence, Heat and Mass Transfer 7*, volume 7, pages 785–788, 2012.
- [5] O. A. Marzouk and E. D. Huckaby. A Comparative Study of Eight Finite-Rate Chemistry Kinetics for CO/H<sub>2</sub> Combustion. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 4, No. 3, pp 331-356, 2010.
- [6] A. Abou-Taouk, *Optimization of Chemical Kinetic Mechanisms and Numerical Simulations of Industrial Gas Turbine Burners*. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2014.
- [7] Smith. G. P., Golden. D. M., Frenklach. M., Moriarty. N. W., Eiteneer. B., Goldenberg. M., Bowman. C. T., Hanson. R. K., Song. S., Gardiner. W. C., Lissianski. V. V., Qin. Z. Technical report, 1999. <http://www.me.berkeley.edu/gri-mech/>.

## Bilagor

- Administrativ bilaga: “slutrapport\_administrativ-bilaga\_final”
- Vetenskapliga artiklar:

A. Abou-Taouk, P. Wettrell, L. E. Eriksson. CFD investigation of a Stirling engine flexi fuel burner based on MILD combustion. In 8th Inter. Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer. (2015).