

---

---

*Rapport SGC 165*

# **Utveckling av mikroturbin med extern förbränning - fas I**

©Svenskt Gastekniskt Center – Maj 2006

Anders Malmqvist  
Compower 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](http://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, Lunds Energi AB, Göteborg Energi AB, och Öresundskraft AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

Statens Energimyndighet  
Compower AB  
Innovationsbron AB

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Jörgen Held

Distribution	Dept.	Date	Reg.nr	Page
	2006-05-02			1(13)
Issued by, phone				
Johny Nordgren, Anders Malmquist				
Slutrapport från projekt SGC - Compower				

## MicroCHP - En värmepanna som också genererar el

### 1. Bakgrund

ComPower utvecklar system inom området småskalig kraftvärme, microCHP, avsedd för villor, små flerfamiljshus och näringsfastigheter, dvs en värmepanna som även genererar el. Produkterna kommer att baseras på en turbogenerator med extern förbränning. Att använda ett externt förbränningssystem gör att vid användande av gasformigt bränsle detta då inte behöver trycksättas vid förbränning. Andra fördelar med extern förbränning är att systemet kan anpassas för att även använda fasta bränslen såsom tex pellets.

### 2. Syfte och mål

Huvudmålet för detta projekt är att utveckla och demonstrera en ny lösning för extern förbränning för små gasturbiner. Fokus ligger på att verifiera funktionen hos det externa förbränningssystemet.

### 3. Beskrivning av provriggen

En viktig parameter vid definition och uppbyggnad av provriggen har varit att använda redan existerande system i så stor omfattning som möjligt. Den viktigaste och mest kritiska komponenten i systemet är värmeväxlaren som skall överföra energi från den externa förbränningen in till gastubinkretsen. I sin fulla konfiguration omfattar det microCHP-system som ComPower utvecklar ett system med totalt tre värmeväxlare.

#### Värmewäxlare

Med tidigare erfarenheter som grund har ett värmewäxlarkoncept valts baserat på en konstruktion framtagen av Rekuperator Svenska AB, RSAB. RSAB har ett samarbetsavtal med ett Belgiskt företag, Bosal, specialiserat på tillverkning av komponenter till fordonsindustrin och då främst avgassystem. En specifikation för den värmewäxlare som skulle användas vid provningen fastställdes i samarbete med Bosal.

## Brännare

Den brännare som används i den initiala provningen arbetar utan förvärmad luft in till förbränningen medan däremot förbränningsluften till det kompletta systemet är förvärmad genom återvinning av förbränningsgaserna. Därför har en industriell standardbrännare använts i provriggen. Brännaren är anpassad och levererad av Industri-Teknik Bengt Fridh AB.

## Turbogenerator

För produkten ET10 har en konceptstudie genomförts där ingående komponenter har definierats. Turbogeneratoren består av en microturbin med kompressor, turbin, lagersystem samt en integrerad höghastighetsgenerator. Detta är komponenter baserade på känd teknologi men anpassade för den specifikation som ligger till grund för produkten. Att färdigkonstruera och tillverka dessa komponenter för demonstratorriggen enligt denna specifikation är både kostsamt och medför långa ledtider. För provning i rigg har därför en turbogenerator baserad på en kommersiell turboladdare modifierats och integrerats med en lämplig kommersiell höghastighetsgenerator. En första konfiguration i provningen kommer att bestå av en turbo, utan integrerad höghastighetsgenerator, i syfte att verifiera det externa förbränningsystemet integrerat med en turbomaskin.

## 4. Provprogram

### Steg 1

Verifiering av brännare och temperaturprofil över värmeväxlararean.

Riggkonfiguration: Brännare plus ducter (ledning, rör) för värmeväxlare (vwx).

### Steg 2

Simulering av separata flöden.

Riggkonfiguration: Brännare, vwx med ducter, flödet på turbinsidan simuleras med fläkt.

### Steg 3

Verifiering av funktionalitet med extern förbränning.

Riggkonfiguration: Brännarmodul (brännare och vwx) och turboladdare (utan integrerad generator) på turbinsidan.

## 5. Genomförande av prov

### Steg 1

Steg 1 i SGC projektet är utfört i tillämpliga delar (bränsleflödesmätare ej installerad) enligt provprogram 2005-06-21 Anders Malmquist. Syftet med steg 1 var att fastställa brännarens reglerbarhet och temperaturfördelning vid recuperatorinlopp.

Den 2/12 gjordes första startförsöken av brännaren, problem med gasförsörjningen till riggplatsen gjorde att starten fick skjutas upp till 5/12. Brännaren startar snällt och vi kör ca 650°C, stor skillnad på temp i ducterna (recuperatorinlopp).

Körning med olika massflöde både på luft och gassidan ger vid handen att skillnaden i temperatur är stor, mer än 100°C mellan högsta och lägsta temperaturen i inlopp. Ett gasläckage, internt, detekterades och åtgärdades av Industri-Teknik. Termoelementen med högsta och lägsta temperatur skiftar plats för att konstatera att något fel på termoelementen ej uppstått, den stora skillnaden mellan termoelement placering 1 och 3 kvarstår.

En difftryckgivare monteras omedelbart före brännaren och mäter difftrycket mot atm tryck.

Ett antal olika strypningar provas i utloppet för att i görligaste mån simulera tryckfallet över vvx och därmed få en bättre temperaturfördelning i inloppet.

Efter prov med olika strypningar och olika massflöden åstadkoms en strypning som vid kallt luftflöde ger ca 12 mbar i tryckfall och med tänd brännare, temperatur ca 750°C och ca 70 g/sek luftflöde ger 35-40 mbar tryckfall vilket verkar vara ett realistiskt totalt tryckfall som är förväntat över värmeväxlaren.

Temperaturfördelningen är vid detta driftfall betydligt bättre max delta ca 35°C.

Gastillförseln till brännaren är manuellt reglerad med hjälp av en nålventil vilken är svår att finreglera. Byte från nålventil till kilslidsventil gav en bra reglerbarhet av temperaturen och ett mekaniskt stopp på avstängningsventilen skall förhindra oavsiktlig övertemp, stoppet inställt på ca 750°C.

### Steg 2

Steg 2 i SGC projektet utfört i tillämpliga delar (bränsleflödesmätare ej installerad) enligt provprogram 2005-06-21 Anders Malmquist.

Syftet med steg 2 var att fastställa värmeväxlingsgrad och temperaturfördelning vid recuperatorinlopp respektive utlopp samt temperatur och tryck in och ut sekundärsida.

Ett antal körningar med varierande parametrar för temperaturer och flöden på både primär och sekundärsida har genomförts, i provrapporten redovisas bara de signifikativa körningarna, skillnad på temp i ducterna (recuperatorinlopp) se bil , ritnr 29-0127 för termoelementplacering. Kilslidsventil vid naturgasinloppet ger en bra manuell reglerbarhet av temperaturen och ett mekaniskt stopp på avstängningsventilen skall förhindra oavsiktlig övertemp, stoppet inställt på ca 700° C.

Körning med olika massflöde både på luft och gassidan visar på att skillnaden i temperatur är - vid 600°C inloppstemp - ca 50°C mellan högsta och lägsta temperaturen i inloppsducten.

En difftryckgivare sitter monterad omedelbart före brännaren och mäter difftrycket mot atmosfärtryck. Tryckfallet över brännaren är i det närmaste försumbart och tryckfallet som redovisas är representativt för tryckfallet över vvx gassida.

Tryckfallet över sekundärsidan (luftsidan) mäts med difftryck mot atmosfär omedelbart före recuperatorinloppet.

Temperatur sekundärsida mäts före inlopp och efter utlopp. De första körningarna görs för att identifiera temperaturfördelning i inlopp och utlopp gassida. Som kan konstateras på scannarna har flödet på sekundärsidan en stor inverkan på de bägge översta termoelementen som visar en låg temp i förhållande till övriga termoelement på utloppsidan. En misstanke om läckage från sekundärsidan till utlopp gassidan väcktes, ducten på utloppsidan demonterades och cellpaketet läcksöktes med sekundärsidan trycksatt. Något läckage kunde ej konstateras, ducten återmonterades och vvx varmkördes varefter en ny läcksökning utfördes, ej heller vid varm vvx kunde något läckage konstateras.

Den låga temperaturen på de bägge termoelementen kan istället förklaras med att inloppet på sekundärsidan sitter i omedelbar närhet till termoelementen och när massflödet in (termoelementen visar lägre temp med ökat luftmassflöde) ökar så hinner inte gassidan värma (värmväxla) just vid inloppet, sannolikt har vi ett också lägre flöde på gassidan just vid övre delen av vvx.

Termoelement flyttades, se ritn 29-0128 för placering. Körning med termoelement placerade i inloppsrör före inloppsduct samt med fler termoelement i inloppsducten syftar till att konstatera om det finns någon hotspot med högre temperatur än i

inloppsröret Temperaturen i inloppsröret är vid samtliga körningar högre än de placerade i ducten vilket medför att vi kan styra temperaturen på termoelementet i inloppsröret utan att riskera att överhätta cellpaketet i vvx. Resultatet pekar på att ducterna bör isoleras för att minska det relativt stora värmeläckaget därifrån.

Avslutande prov gjordes med avsikt att försöka få fram en verifikation på vvx. Olika flöden, 12, 20 och 30g/sek, på seksidan kördes vid temperatur 400, 500, 600 och 700°C, dock nådde vi inte 30g/sek vid 700°C pga fläktens utan fick nöja oss med 20g/sek.

Vid körning med generatoraggregatet kommer andra tryck och flöden vara aktuella men provet antas ge en fingervisning om vad vi kan förvänta oss med kpl aggregat.

Jens Klingman har bistått med en snabbutvärdering som talar om för oss att vi måste vara noggrannare vid mätningarna framför allt med att få en representativ temp för massflödet både på primär och sekundärsidan. Isolering av vvx och framför allt inloppet på primärsidan känns nödvändig.

Se scannar 144151-152233.

### Steg 3

Steg 3 i Turbogenerator utfört i tillämpliga delar (bränsleflödesmätare ej installerad) enligt provprogram 2005-06-21 Anders Malmquist.

Syftet med steg 3 var att fastställa Turboaggregatets parametrar för uppnå en självgående turbomaskin. I realiteten blev det också verifiering av vvx verkningsgrad, utvärdering av anslutningar mot värmväxlaren och temperaturfördelning i och efter brännare.

Turboaggregatet, Garrett GT2560R, är ett komplett standard aggregat med wastegate ventil.

Som starthjälp för att driva upp turbon till startvarvtal användes en fläkt som "blower" som ansluts direkt i kompressorinloppet och matar turbon med luft tills den blir självgående.

Ett antal prov för att identifiera fläktens kapacitet och förmåga att "blåsa upp" turbon i tillräckligt varvtal har gjorts. Kallblåsning med denna fläkt ger turbon ett varvtal på ca 45 000 rpm.

En difftryckgivare monterad omedelbart före brännaren mäter difftrycket mot atmosfärstryck. Tryckfallet över brännaren är i det närmaste försumbart och tryckfallet som redovisas är representativt för tryckfallet över vvx gassida.

Tryckfallet över sekundärsidan, inklusive turbon (luftsidan), mäts med difftryck mot atmosfärstryck omedelbart före kompressorinloppet.

Temperatur sekundärsida mäts före och efter turbons kompressor samt före och efter turbons turbin (TIT och TOT).

Ett antal körningar med varierande parameterar för temperaturer och flöden har körts för både primär och sekundärsida, här redovisas bara de signifikativa körningarna. Körning med olika massflöde både på luft och gassidan visar på att värmeväxlingen inte stämmer med specifikationerna på värmeväxlaren.

- De första körningarna görs för att identifiera tempfördelning i inlopp och utlopp gassida samt värmeväxlingen till turbinen.
- Värmeväxlingen är i detta läge ej tillräcklig - mellan 80 -85 % - beroende på flöde in till kompressorn, för att vi med acceptabel temperatur in till vvx skall få turbon självgående.
- Överföringsrör mellan vvx och turbin inlopp isolerat, en viss förbättring kan konstateras dock ej tillräcklig för att visa en acceptabel värmeväxlings verkningsgrad.
- Inlet duct isolerad samt monterades fler termoelement för att tydligare konstatera temperaturfördelningen in till vvx gassida. Skillnader i temperatur i inloppsducten liksom utloppsducten tyder på ett ojämt fördelat flöde genom värmeväxlaren.
- Hela värmeväxlaren isolerad, påverkade inte verkningsgraden nämnbart.
- Ett koniskt rör monterat i inloppet till ducten, diametern går därmed ner från ca 90mm till ca 60 mm, vilket innebär att luftflödet in i ducten inte lika lätt följer väggarna utan lättare skall fylla hela utrymmet i ducten.
- Resultatet är en viss förbättring framförallt vid lägre temp, 550-600 °C, dock ej tillräcklig. Genom att tillfälligt sänka flödet på sekundärsidan och därefter öka det igen stiger temperaturen in till turbin under en kort period till ca 600 °C och kompressorn laddar ca 1 bar vilket tolkas som att vi ligger nära självgående nivå.
- Outlet duct demonterad, kallblåsning genom vvx med fullt varvtal på brännarfläkten visar att flödet genom vvx gassida är koncentrerat till övre tredjedelen av vvx och att



flödet genom den nedersta fjärdedelen är nästan obefintligt. Ett försök att mäta lufthastigheten med varmtrådsanemometer har gjorts men det som ger bäst uppfattning om flödesfördelningen är helt enkelt att känna med handen. Inlet duct demonteras och en provblåsning med tryckluft över en begränsad yta i taget visar på en jämn genomsläpplighet över hela vvx, en fläck på någon cm<sup>2</sup> visar sämre genomsläpplighet men bedöms inte påverka verkningsgraden.

- Inlet duct får byta plats med outlet duct och vise versa, provblåsning enligt ovan ger vid handen en bättre fördelning av flödet genom vvx.
- Ett adaptorrör mellan brännare och "nya" inlet duct fick tillverkas, ducten och rör isolerat med 1 lager isolering.
- Varmprov. För att få lägre temperatur på luften in till kompressor matas fläkten för kompressoriinloppet med uteluft, >10 °C. Resultatet var något bättre än tidigare men inte tillräckligt bra, dock var turbon nära självgående och laddade drygt 1 bar med ett flöde på ca 90g/s. När turbon börjar ladda ökar flödet och därmed faller temperaturen och laddningen minskar/upphör. Försök med att styra flödet med fläktens varvtalsreglering resulterade i att turbon blev i stort sett självgående i ca 45 sek. Verkningsgraden på värmeväxlaren fortfarande dålig.
- Diskussioner kring flöden och verkningsgrad värmeväxlare resulterade i förslag att prova med partiell blockering på gassidan där vi tror att flödena inte möts tillräckligt effektivt.
- Prov med blockering av gassida har körts med partiell blockering i 5 positioner på ca 20 % av inloppsarean, Motsvarande area på utloppsidan har också blockerats. Resultatet av dessa prov visade på en förbättring av vvx verkningsgraden, störst då övre 20% (pkt 5) blockerats.
- För att utreda snedfördelningen i temperatur in till vvx har en kontroll av temperaturfördelningen i brännarutloppet gjorts. En stor snedfördelning konstaterades med hjälp av traversering av termoelement i röret in till inloppsducten. Ett delta-T på ca 220 °C detekterades. Brännarleverantören kontaktades för diskussioner, deras rekommendation var en plåt med en blockering i centrum ca 100mm i diameter. Denna åtgärd gav ett liten påverkan på tempfördelningen ca 175 °C i delta-T. En fyrkantig plåt ca 200x200mm tillverkades och monterades i brännare, denna åtgärd gav ett delta på temperaturfördelningen på ca 150 °C . Ny plåt tillverkades, denna gången täcktes halva arean (övre) resultatet av denna åtgärd blev ett delta-T på ca 70 °C vilket i sin tur ledde till en mycket bättre temperaturfördelning in till vvx. Inga av de ovan nämnda proven påverkade tryckfallet nämnvärt, tryckfallet bestäms till största delen av värmeväxlaren.

- För att få ett underlag för samtal med vvx leverantören har prov körts med konstant inloppstemperatur och flöde på primärsidan och ett varierat flöde på sekundärsidan, provet visar en snedfördelning av temperaturen efter vvx, primärsidan, direkt kopplat till flödet på sekundärsidan, temp outlet duct upper sjunker från ca 640 °C (vid 0% luftflöde) till 160 °C (vid 30% luftflöde) medan outlet duct center och outlet duct lower påverkas marginellt innan flödet stigit till ca 25%.
- Ny turbo monterad, Garrett GT 2259 . En mindre Turbo, utan wastegate, som bättre motsvarar den kommande specifikationen för turbogeneratorns demo-utförande installerades i testriggen. Turbon upplevs som något mer känslig, framför allt vid manuell reglering som nu görs. Ett antal körningar där turbon blir självgående genomförs. Självgående data som följer, Tryckförhållande 2, turbine inlet temperatur (TIT) ca 570 °C, inlet duct temp ca 750 °C. Massflöde turbin ca 100 g/s och massflöde brännare ca 80 g/s. Scan 105456, 2006-04-03.

## 6. Resultat

Syftet med provprogrammet har varit att demonstera att det är möjligt att tillföra energi till en mikroturbogenerator genom extern tillföring av energi. Energin till turbogeneratoren tillförs genom ett värmeväxlaresystem med atmosfärisk förbränning. Provningsverksamheten som beskrivs i avsnittet ovan bekräftar konceptet med extern förbränning och drift av mikroturbogenerator genom värmeväxling av den alstrade energin. Som beskrivs i provprogrammet ovan genomfördes provningen med en förenklad turbogenerator, en standard-turbo utan el-generator, som kunde drivas av den externt alstrade värmeenergin och bli en självgående turbin. Ett annat viktigt resultat av provningen är kunskapen om inverkan av anslutningarnas konfiguration mot rekuperatorn. Noggrannhet krävs i analys och utformning av dessa gränssnitt för att optimera luft-gasflödet in och ut ur rekuperatorn. Anströmningen till rekuperatorns cellpaket, där värmeväxlingen sker, är av stor vikt för att uppnå maximal verkningsgrad i värmeväxlersystemet. Användandet av en kommersiell brännare var en snabb väg fram för demonstration av den externa förbränningen till en relativt låg kostnad. Erfarenheter från denna teknik ger vid handen att även för brännaren är det av största vikt att temperaturfördelningen över arean är kontrollerad.

## 7. Slutsatser, erfarenheter

- Utformning av gränssnitten mot värmeväxlaren är kritisk för att uppnå optimal flödesfördelning av gasströmmen så att högsta möjliga verkningsgrad kan uppnås.

- Matchningen av tryck och flöde på luftsidan kritisk vid optimering av värmeväxlare-arean.
- Uniform flödesprofil från brännaren, utan swirl, är väsentlig för optimal flödesfördelning i värmeväxlaren.
- Att det är möjligt att, utgående från på marknaden befintliga komponenter, kunna bygga produkter för nisch-marknader där pris/prestanda inte är kritiskt.
- Att turbogeneratorsystemet går att starta utan tillgång till el-backup, kan startas med hjälp av tryckluft eller fläkt.

## 8. Förslag på fortsatt arbete

Den ur teknisk synpunkt mest kritiska delen i projektet är utveckling av en kombination av brännare och högtemperaturvärmeväxlare som ger högsta möjliga arbetstemperatur på arbetsmediet. Det projekt som redovisas i denna rapport och som nyligen avslutats har demonstrerat funktionen av ett första möjligt system.

Det första systemet som Compower nu tar fram för fältprov kommer att utnyttja mycket av det som nu provats i demonstratorn och då framförallt just högtemperaturvärmeväxlaren.

Vi beräknar att då få en turbininloppstemperatur på 750 C. Det kommer att ge en elverkningsgrad på ca 20 % vilket är konkurrenskraftigt för elgenereringssystem i denna effektklass.

Det finns emellertid möjlighet att höja denna temperatur med utnyttjande av en integrerad strålningsbrännkammare/värmeväxlare. Denna har dessutom fördel av att kunna ha en enklare geometri på gassidan vilket gör det enklare att använda gaser som kan innehålla stoft etc, exempelvis pellets.

Utveckling av denna typ av koncept ryms inte i Compowers plan mot kommersialisering av en första produkt men kan var utomordentligt viktig för en uppgraderad produkt.

Ett annat kritiskt område som kräver mer fördjupade studier och arbete är hur systemet skall regleras och kopplas in på nätet.

Vi ansöker därför hos SGC om stöd för utökad verksamhet inom dessa båda områden. Arbetet kommer liksom i fas 1 att göras i samverkan med LTH. Och nu inte

bara tillsammans med Institutionen fr Värme-och Kraftteknik utan också Institutionen för Industriell Elektroteknik och Automation. Basen för arbetet är den provrigg som nu byggts upp och finns tillgänglig på LTH.

Förslagsvis innehåller ett fortsatt projekt följande delaktiviteter:

1. Definiera och analysera en integrerad strålningsbrännkammare/värmeväxlare som kan utnyttjas i en mikroturbin med exten förbränning.
2. Tillverkning och provning av denna.
3. Optimering av strömning kring den befintliga värmeväxlaren.
4. Provning med olika bibränslen
5. Integration av en högvarvig generator på turbinaxeln
6. Framtagning av lämplig frekvensomriktare och reglersystem för anslutning mot elnätet.

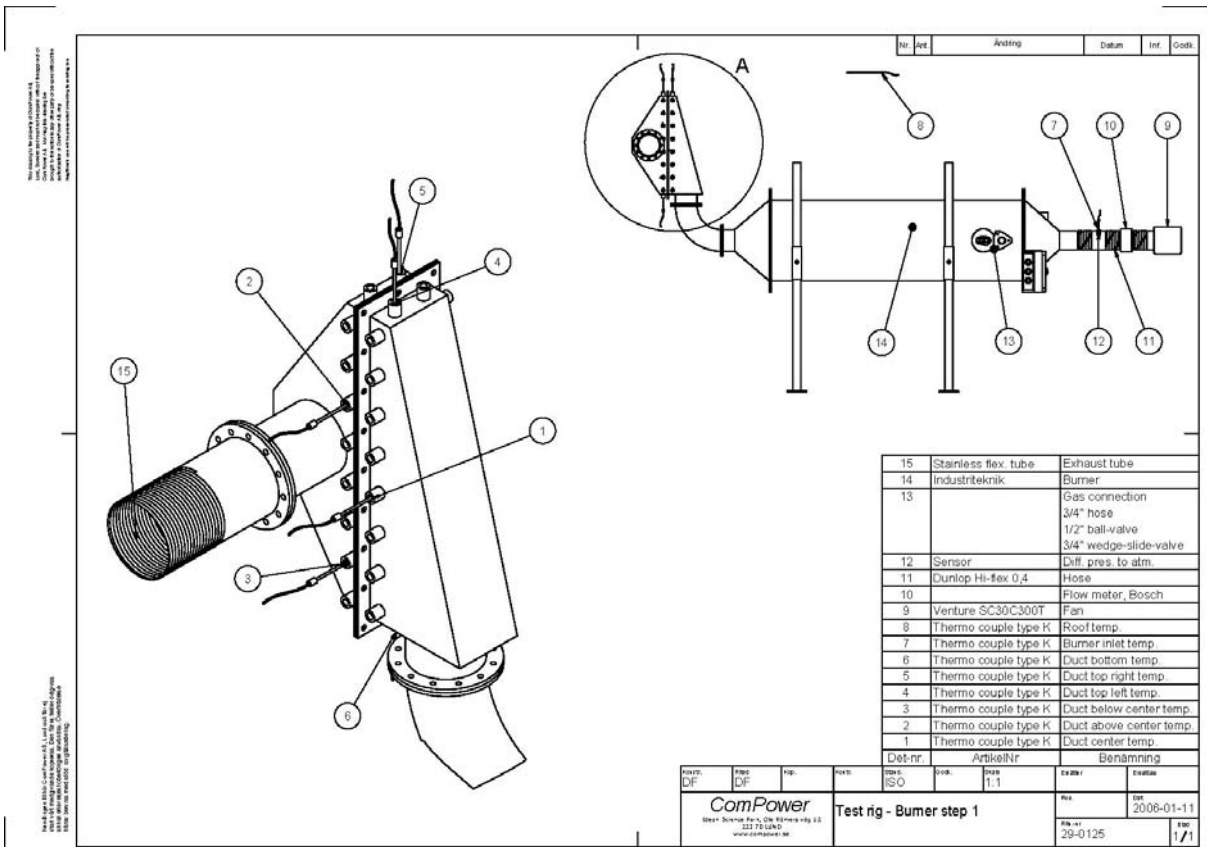
## 9. Referenser

- [1] Provprogram SGC-projektet, Anders Malmquist 2005-06-21
- [2] Compower på en sida – översiktlig beskrivning av applikationen och den första produkten.

10. Bilagor

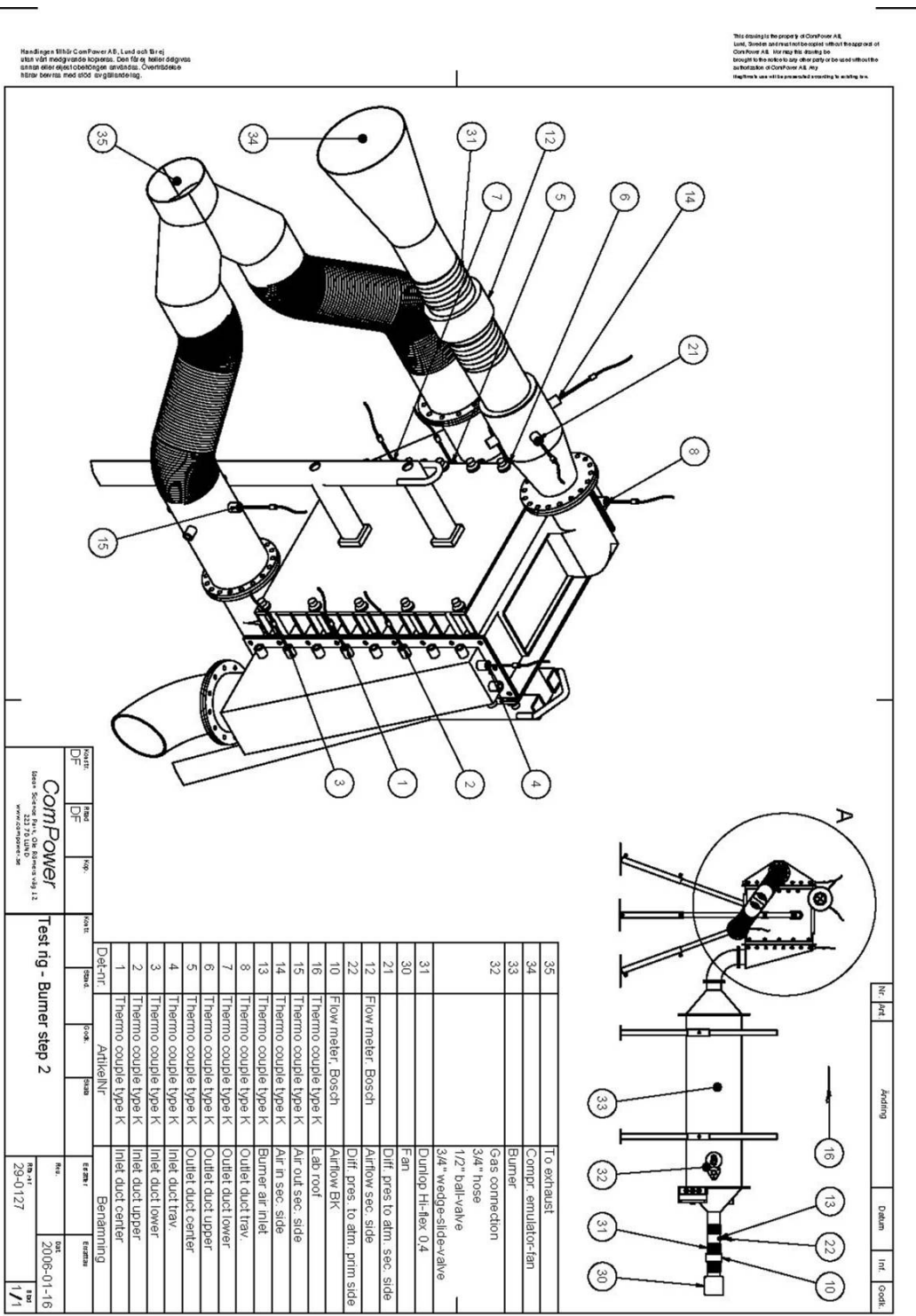
Bilaga 1

Riggkonfiguration steg 1



Bilaga 2

Riggkonfiguration steg 2



**Bilaga 3**

Riggkonfiguration steg 3



Outlet Duct

Rekuperator

Garrett Turbo GT2259

Inlet Duct

Brännare



Scheelegatan 3, 212 28 Malmö • Tel 040-680 07 60 • Fax 040-680 07 69  
[www.sgc.se](http://www.sgc.se) • [info@sgc.se](mailto:info@sgc.se)

---

---