

## Förgasning av träråvara för biometanproduktion

Produktion av biobränsle till Chalmers EcoMarathon

Kandidatarbete inom Tillämpad mekanik i samarbete med Energi och miljö samt Kemi och kemiteknik

MARTIN ANDERSSON  
JULIA HANSSON BJÖRCK  
LEON HERMANSSON LARSSON  
IVAR PETERSSON  
EMIL THUREBORN  
LINNÉA ÖSTLUND



KANDIDATARBETE 2017:10

# Förgasning av träråvara för biometanproduktion

Produktion av biobränsle till Chalmers EcoMarathon

Kandidatarbete inom Tillämpad mekanik i samarbete med Energi och miljö  
samt Kemi och kemiteknik

MARTIN ANDERSSON  
JULIA HANSSON BJÖRCK  
LEON HERMANSSON LARSSON  
IVAR PETERSSON  
EMIL THUREBORN  
LINNÉA ÖSTLUND



**CHALMERS**

Institutionen för Tillämpad mekanik  
*Avdelningen för förbränning*  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2017

Förgasning av träråvara för biometanproduktion  
Produktion av bibränsle till Chalmers EcoMarathon  
Kandidatarbete i Tillämpad mekanik  
MARTIN ANDERSSON, JULIA HANSSON BJÖRCK, LEON HERMANSSON  
LARSSON, IVAR PETERSSON, EMIL THUREBORN, LINNÉA ÖSTLUND

© MARTIN ANDERSSON, JULIA HANSSON BJÖRCK, LEON HERMANSSON  
LARSSON, IVAR PETERSSON, EMIL THUREBORN, LINNÉA ÖSTLUND, 2017.

Handledare: Jonas Sjöblom, Institutionen för tillämpad mekanik, Martin Seemann, Institutionen för energi och miljö  
Examinator: Sven B. Andersson, Institutionen för tillämpad mekanik

Kandidatarbete 2017:10  
ISSN 1654-4676  
Institutionen för Tillämpad mekanik  
Avdelningen för förbränning  
Chalmers tekniska högskola  
SE-412 96 Göteborg  
Sverige  
Telefon +46 (0)31 772 1000

Omslag:  
Visualisering av flöden genom förgasaren samt en bild på den framtagna förgasaren.

Tryck av Chalmers Reproservice AB  
Göteborg, Sverige 2017

## Förord

Kandidatgruppen vill inleda med att tacka våra handledare Jonas Sjöblom och Martin Seemann, som med ett stort intresse och engagemang har väglett gruppen och sett till att vi kommit fram till våra mål och bidragit med både idéer samt sina kunskaper inom förgasningsteknik. Ett stort tack riktas även till Sebastien Pissot för utlålandet av en förgasare som kunde experimenteras på, samt för all hjälp under själva experimenten. Ytterligare tack till Jessica Bohwalli för hjälp vid TGA-experimentet. Tack riktas även till Esa Väänänen och Torbjörn Jönsson från kemiverkstaden för hjälp med inköp av rörkopplingar samt konstruktionen av kväveluss, bränslematningssystem, gasuttag, gasinflöde samt genomföringsport för termoelement. Ytterligare ett stort tack till Reine Nohlberg och Jan Bragee från prototypplabbet för all vägledning i konstruktionen samt för all hjälp vid användandet av utrustning i prototypplabbet. Gruppen skulle även vilja tacka Johan Augustsson från Askims rostfria, för hjälp vid beställning och val av material. Avslutningsvis vill gruppen tacka examinatoren Sven B Andersson för all feedback och önska läsaren en trevlig läsning!



# Sammanfattning

Det omfattande användandet av fossila bränslen har lett till stora miljöpåverkningar. Flera av världens länder är överens om att alternativa energikällor som inte bidrar till ökad växthuseffekt behöver undersökas. Biogas produceras från kolkällor som befinner sig i kretsloppet. Detta innebär att det anses som koldioxidneutralt, till skillnad från fossila bränslen, som befinner sig utanför kretsloppet. I detta projekt står produktion av syntesgas från termisk förgasning av barkpellets i fokus, som är det första steget i produktionen av metan som biogas.

Förgasning sker då kolvätebaserat bränsle bryts ner och reagerar med vattenånga i en syrefri miljö under höga temperaturer. De önskade produkterna är kolmonoxid och vätegas, som i flera delsteg vidare i processen reagerar och bildar metan.

Förgasningsförloppet har studerats, modellerats och experimenterats på för att kunna avgöra design- och driftparametrar för en förgasare i liten skala. Detta inkluderar bland annat modellering av bränslematningsfrekvens, energiförbrukning, uppehållstid samt experiment på befintlig förgasare och TGA-experiment på biobränslet som ska användas. En stor del av arbetet har dessutom bestått av materialval och konstruktion av själva förgasaren.

Slutsatsen är att förgasning av biobränsle är genomförbart i liten skala, men att den termiska verkningsgraden blir betydligt lägre än för en anläggning i industriell skala. Därmed förväntas ett högt utbyte av syntesgas, ca 70-80 %.





# Abstract

Environmental impacts and climate change caused by our society's large-scale use of fossil fuel has forced many countries of the world to agree that alternative, carbon emission free, energy sources are needed. A strong candidate for this is biogas, which is fuel produced from carbon sources that are currently within the cycle of carbon, which means it is considered as carbon dioxide neutral. In this thesis, the first step in the production of bio-methane is in focus, namely gasification of biofuel. In addition, a gasifier designed for this purpose will be built.

Gasification occurs when carbon based fuel reacts with water vapour in an oxygen free, high temperature environment. The products of this reaction is carbon monoxide and hydrogen gas, which several steps further down the process reacts with one another to form methane.

The gasification process has been both practically and theoretically studied on in this thesis in order to determine design parameters and operating conditions for a small-scale gasifier. This include modelling of fuel feed, heat loss and residence time. In addition, experiments were made on another gasifier, and a TGA experiment on the fuel was done. Furthermore, a substantial part of this project has been analysis of material and construction of a gasifier designed for a methane production process.

In conclusion, gasification of biofuel is possible in this small scale. The thermal efficiency will be significantly lower than that of an industrial scale gasifier, but a high yield of synthesis gas, ca 70-80 %, is expected.



# Innehåll

<b>Nomenklatur</b>	<b>1</b>
<b>1 Inledning</b>	<b>5</b>
1.1 Bakgrund . . . . .	5
1.2 Syfte . . . . .	6
1.3 Avgränsningar . . . . .	7
1.4 Rapportstruktur . . . . .	7
<b>2 Teori</b>	<b>9</b>
2.1 Termisk förgasning . . . . .	9
2.1.1 Uppehållstid för bränslepartikel i förgasaren . . . . .	9
2.1.2 Förgasarens energiförbrukning . . . . .	11
2.2 Fluidisering . . . . .	13
2.2.1 Minsta fluidiseringshastighet och terminalhastighet . . . . .	14
2.2.2 Tryckfall över bädd och gasfördelare . . . . .	15
<b>3 Metod och delresultat</b>	<b>17</b>
3.1 Bränsletillförsel utifrån metanprocessen . . . . .	17
3.1.1 Resultat . . . . .	18
3.2 Driftförhållanden utifrån förgasningsexperiment . . . . .	18
3.2.1 Resultat . . . . .	19
3.3 Bränsleanalys – TGA . . . . .	19
3.3.1 Resultat . . . . .	20
3.4 Förväntade utflöden från förgasaren . . . . .	20
3.4.1 Resultat . . . . .	21
3.5 Förgasarens energiförbrukning . . . . .	22
3.5.1 Resultat . . . . .	23
3.6 Uppehållstid för bränslepartikel i förgasaren . . . . .	23
3.6.1 Resultat . . . . .	24
3.7 Minsta fluidiseringshastighet och terminalhastighet . . . . .	24
3.7.1 Resultat . . . . .	24
3.8 Materialval . . . . .	25
3.9 Förgasardesign . . . . .	25
3.9.1 Dimensionering . . . . .	26
3.9.2 Förslutning . . . . .	26
3.9.3 Fluidisering . . . . .	27
3.9.4 Rörsystem för bränslematning, gasflöden och temperaturmätning . . . . .	29
3.9.5 Slutgiltig design . . . . .	31
<b>4 Övergripande resultat och diskussion</b>	<b>33</b>
4.1 Driftparametrar . . . . .	33
4.1.1 Matningsfrekvens . . . . .	33
4.1.2 Driftförhållanden . . . . .	34
4.1.3 Uppehållstid . . . . .	35
4.1.4 Energiförbrukning . . . . .	36
4.2 Förgasardesign . . . . .	37
4.2.1 Praktiska avgränsningar . . . . .	38

4.3 Övergripande diskussion och fortsatt arbete . . . . .	38
<b>5 Slutsats</b>	<b>41</b>
<b>Referenser</b>	<b>43</b>
<b>Bilagor</b>	<b>47</b>
<b>A Uppehållstid i förgasaren</b>	<b>47</b>
A.1 Känslighetsanalys av bränsleparametrar . . . . .	47
A.2 Tid för torkning . . . . .	49
A.3 Tid för avgasning . . . . .	50
A.4 Tid för koksförgasning . . . . .	51
<b>B Förgasningsexperiment</b>	<b>53</b>
B.1 Metod förgasningsexperiment . . . . .	53
B.2 Resultat och analys av förgasningsexperiment . . . . .	55
B.2.1 Förgasningstemperatur . . . . .	56
B.2.2 Gastillflöde . . . . .	57
B.2.3 Bränslestorlek . . . . .	57
B.2.4 Bränslematning . . . . .	58
B.2.5 Utbyte av kol . . . . .	60
B.2.6 Sammanställning förgasningsexperiment . . . . .	60
<b>C Bränsleanalys – TGA</b>	<b>61</b>
C.1 Metod . . . . .	61
C.2 Resultat . . . . .	61
<b>D Designförslag</b>	<b>63</b>
<b>E Ritningar över förgasaren</b>	<b>67</b>
<b>F Tillverkningsprocess</b>	<b>75</b>
F.1 Detaljtillverkning . . . . .	75
F.1.1 Bottenplatta . . . . .	75
F.1.2 Insats . . . . .	75
F.1.3 Flänsförband . . . . .	77
F.1.4 Kopparpackning . . . . .	80
F.1.5 Rörssystem . . . . .	80
F.2 Slutmontering . . . . .	80
<b>G Planscher till Shell Eco-marathon</b>	<b>83</b>
<b>H Bränsleanalys av barkpellets</b>	<b>85</b>

# Nomenklatur

## Kemiska formler

$C$	Kol
$CH_4$	Metan
$CH_{1.28}O_{0.55}$	Barkpellets sammansättning
$CO$	Kolmonoxid
$CO_2$	Koldioxid
$H_2$	Vätgas
$H_2O$	Vatten
$N_2$	Kvävgas
$O_2$	Syrgas

## Variabler och konstanter

$\Delta P_{bädd}$	Tryckfall över bädd	Pa
$\dot{m}$	Massflöde	kg/s
$\dot{n}$	Molflöde	mol/s
$\mu$	Dynamisk viskositet	Pa · s
$\nu$	Kinematisk viskositet	m <sup>2</sup> /s
$\Omega$	Antal mol kol per mol syre	
$\Phi$	Formfaktor	
$\rho$	Densitet	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_C$	Densitet för koks	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Stefan-Boltzmanns konstant	$5.7604 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
$\varepsilon$	Emissivitet	
$A$	Area	m <sup>2</sup>
$A_{or}$	Hålarea hos varje förträngning	m <sup>2</sup>
$C_{d,or}$	Motståndskoefficient hos förträngningar	
$C_{O_2,\infty}$	Koncentration syre i omgivning	mol/m <sup>3</sup>
$C_{pm}$	Värmekapacitet för fukt	J/(kg · K)
$C_p$	Specifik värmekapacitet	J/(kg · K)
$d_i$	Initial diameter	m
$d_t$	Reaktordiameter	m
$D_{AB,eff}$	Effektiva diffusionskonstanten	m <sup>2</sup> /s
$D_{AB}$	Diffusionskonstant	m <sup>2</sup> /s
$E$	Aktiveringsenergi	J/mol
$F$	Kraft	N
$H$	Entalpi	J alternativt J/mol

$h_c$	Konvektivt värmeöverföringstal	$W/(m^2 \cdot K)$
$H_m$	Entalpi för fukt	J/kg
$h_{c_{eff}}$	Effektivt värmeöverföringstal för konvektion	$W/(m^2 \cdot K)$
$h_{rad}$	Värmeöverföringstal för strålning	$W/(m^2 \cdot K)$
$k$	Konduktivt värmeöverföringstal	$W/(m \cdot K)$
$L$	Längd	m
$m_a$	Massa för aska	kg
$M_C$	Molmassa för kol	g/mol
$m_c$	Massa för koks	kg
$m_m$	Massa fukt	kg
$m_v$	Massa för flykt	kg
$m_{df}$	Massa torrt bränsle	kg
$n$	Substansmängd	mol
$n_{or}$	Antal förträngningar	
$P$	Tryck	Pa
$Q$	Volymflöde	$m^3/s$
$q$	Värmeflöde	W
$R$	Allmänna gaskonstanten	$8.3145 J/(mol \cdot K)$
$r_0$	Initial diameter	m
$R_v$	Reaktionshastighet	$s^{-1}$
$R_{c,O_2}$	Inneboende reaktionshastighet	$s^{-1}$
$T$	Temperatur	K alternativt $^{\circ}C$
$t$	Tid	s
$T_0$	Initial temperatur	K alternativt $^{\circ}C$
$T_{\infty}$	Omgivningen temperatur	K alternativt $^{\circ}C$
$U_{max}$	Maximala fluidiseringshastighet (Terminalhastighet)	m/s
$U_{mf}$	Minsta fluidiseringshastighet	m/s
$U_{or}$	Gashastighet genom förträngningar	m/s
$U_o$	Gashastighet genom reaktor	m/s
$V$	Volym	$m^3$
$v$	Hastighet	m/s
$W$	Värmefflux	$W/m^2$
$Z$	Kompressibilitetsfaktor	

### Dimensionslösa tal

Da	Damköhlers tal
Nu	Nusselts tal

Pe	Peclets tal
Pr	Prandtls tal
Ra	Rayleighs tal
Re	Reynolds tal

### **Övrigt**

Flykt	Gas som lämnar bränslet vid höga temperaturer. Består till största del av kolmonoxid, koldioxid, vätgas samt övriga kolväten.
Koks	Återstående del av bränslet, tillsammans med aska, då flykt och fukt avgetts. Består huvudsakligen av grundämnet kol.
TGA	Termogravimetrisk analys





# 1 Inledning

Denna rapport presenterar framtagandet av en förgasare, där restprodukter från skogsindustrin kan användas för att bilda syntesgas som kan omvandlas till drivmedlet metangas. Bakgrund samt rapportens syfte presenteras nedan. Vidare presenteras även arbetets avgränsningar samt struktur och upplägg.

## 1.1 Bakgrund

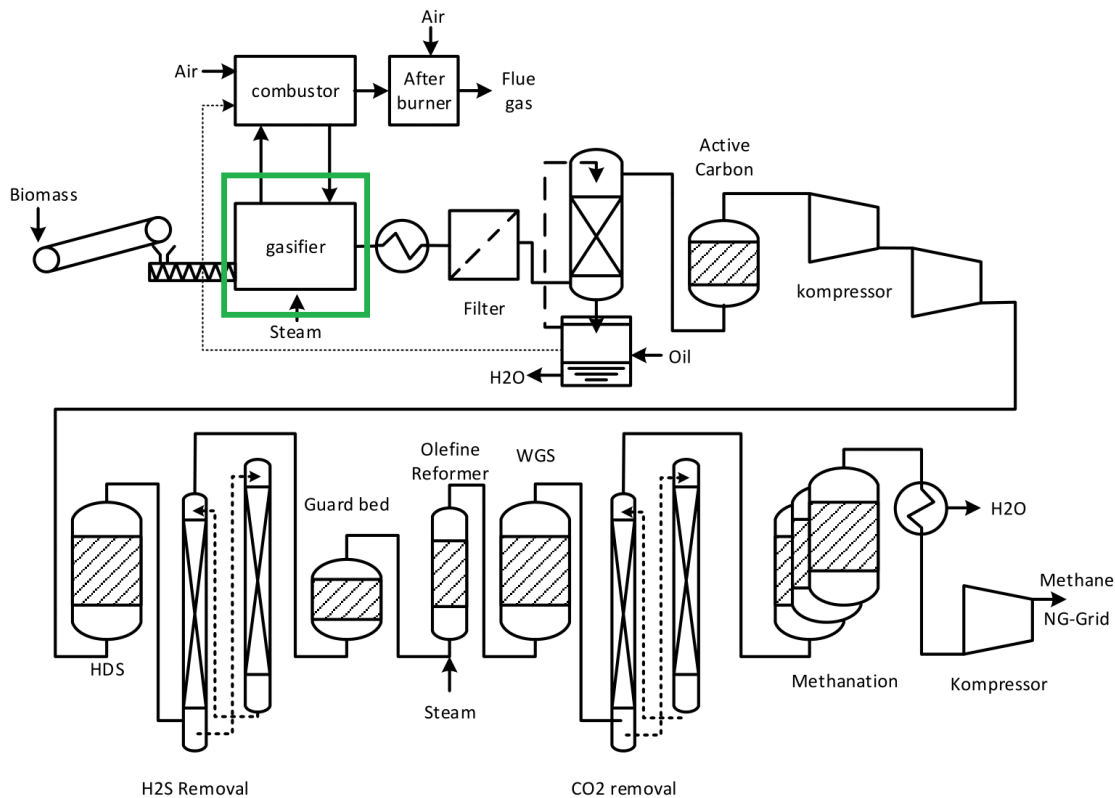
Världen befinner sig mitt i en grundläggande teknisk omvandling. De fossila bränslen som under det senaste århundradet utgjort stommen i det globala energisystemet är förenade med en allt mer drastisk klimatförändring. Världens ledare har kommit fram till att klimatförändringen ska begränsas till väl under 2 °C, vilket innebär att förbränningen av fossila bränslen måste fasas ut nästan helt innan århundradet är slut [1, 2].

En sektor som står för en stor del av Sveriges klimatpåverkan, och som hittills uppvisat en relativt långsam utveckling mot ökad andel förnybar energitillförsel, är transportsektorn. Naturvårdsverkets statistik visar att de svenska vägtransporternas utsläpp år 2015 hade minskat med endast 4 % sedan 1990 [3]. I propositionen “En sammanhållen klimat- och energipolitik” från 2009 slog regeringen fast att “Sverige 2030 bör ha en fordonsflotta som är oberoende av fossila bränslen”, som en del i arbetet att minska Sveriges klimatpåverkan [4].

Det finns många förnybara drivmedel samt processer för att framställa dessa, som undersökts och tillämpats i varierande grad. En process som vunnit stort intresse är produktion av metan genom förgasning av biomassa till syntesgas som sedan renas, uppgraderas och därefter metaniseras, se Figur 1. Denna produktionsprocess är fördelaktig då den möjliggör metanproduktion från träråvara, vilket innebär nyttiggörande av restprodukter från skogsindustrin. Metan har också fördelar som bränsle då utsläppen av partiklar, kväveoxider och kolväten är lägre än för bensin och många andra bränslen, och gasen kan distribueras i redan existerande naturgasnät [5, s.8][6].

Ur ett livscykelperspektiv har biodrivmedel från skogsråvara även betydligt lägre utsläpp av växthusgaser än biodrivmedel från diverse grödor.[5, s. 10-11] Metangas från träråvara är således mycket fördelaktig ur miljösynpunkt till skillnad från andra biobränslen som RME, rapsmetylester, från raps och etanol från sockerrör eller vete. Biodrivmedel från raps, sockerrör och vete kan även vara problematiskt ur etiska perspektiv då odlingsmark och basföda för svältande befolkningar används till drivmedelsproduktion. Det finns således goda förutsättningar för att metangas kan ersätta de biodrivmedel som i dagsläget produceras från grödor.[8, Kap.2]

För att metangas ska bli ett väletablerat och växande drivmedel krävs politiskt engagemang och styrmedel, till exempel certifikat för produktion av biogas och ekonomiskt stöd.[8, Kap. 5] Den bransch som i nuläget tjänar på att välja ett biogasdrivet fordon är taxibranschen. Detta då de taxibilar som drivs med biogas bland annat erhåller en förtursförmån vid stora flygplatser som i sin tur leder till fler kunder. För att stimulera en ökad biogasanvändning och produktion krävs dock ytterligare styrmedel för att göra det lönsamt för både privatpersoner och företag inom transportsektorn. [5, s.9]



Figur 1: Övergripande processbild över metanproduktionsprocessen, förgasaren markerad med grönt. Återgiven med tillstånd. [7]

Tidigare kandidatprojekt på institutionerna för tillämpad mekanik, energi och miljö samt kemi och kemiteknik på Chalmers har studerat och designat olika delar av en process för metanproduktion från biomassa i liten skala [9–12]. Det gemensamma målet för dessa projekt har varit att ta fram en process som kan producera bränsle till Chalmers EcoMarathon, Chalmers bidrag i Shell Eco-marathon. Detta kandidatprojekt bygger vidare på denna process, och syftar till att ta fram en förgasare. Förgasningen är det första processteget, där råvara i form av träflis, barkpellets eller liknande material omvandlas till syntesgas.

Just avseende förgasaren skiljer sig den aktuella processen från schemat i Figur 1, som beskriver hur en industriell anläggning för biometanproduktion generellt sett ser ut. Där värms förgasaren av en brännare, där koksen från förgasaren förbränns. Förgasaren som konstruerats i detta projekt är avsedd att värmas med en elektrisk ugn.

## 1.2 Syfte

Syftet med detta projekt är att utveckla en förgasare som genom termisk förgasning av skogsavfall kan producera syntesgas, som i senare produktionssteg omvandlas till metangas. Projektet sker i liten skala, där slutmålet är att producera en tillräcklig mängd metangas för att fylla en tvåliterstank trycksatt till 70 bar på några timmar. Vid beräkningar kommer två timmar att användas som önskad produktionstid.

Det är tänkt att i framtiden använda den metangas som produceras för att driva ett

av de studentbyggda fordon som är Chalmers bidrag i tävlingen Shell Eco-marathon, där målet är att utveckla ett så bränslesnålt fordon som möjligt. Egentillverkat bränsle är inte tillåtet att använda i tävlingen, men kan användas för att driva fordonet vid testkörning utanför tävlingssammanhang. Projektet ska även presenteras för utomstående vid nämnda tävling i form av två planscher.

För projektet har ett par effektmål formulerats, det vill säga mål för vad projektet ska ha för effekt på omvärlden. Ett mål är att sprida kunskap om biogasproduktion, då den process som tas fram främst kommer kunna tjäna som demonstrationsanläggning. Det andra effektmålet är att detta ur ett större perspektiv ska leda till att användning av biogas får större spridning och därigenom bidra till en snabbare utfasning av fossila bränslen och minskad klimatpåverkan.

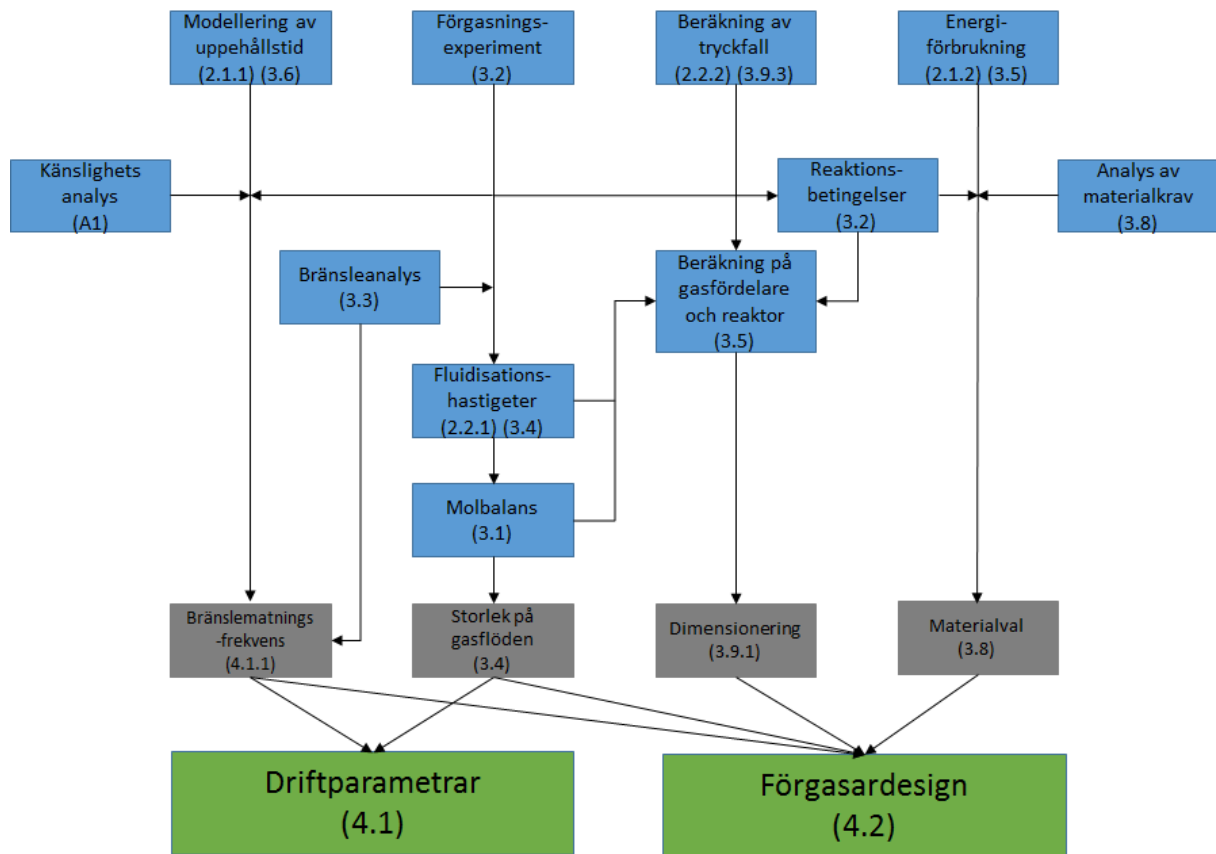
### 1.3 Avgränsningar

Projektet avgränsades till att endast behandla förgasaren och de flöden som är direkt kopplade till denna, det vill säga bränsleflöde och gasflöde genom förgasaren. Övriga steg i produktionsprocessen från biomassa till metan behandlades inte i detta projekt, liksom uppskalning av processen är utanför projektets ram. Beräkningar och tester relaterat till förgasningsprocessen utfördes på en typ av bränsle, barkpellets, och praktiska tester på den framtagna förgasaren utfördes inte då detta inte fick plats inom projektets tidsram.

Inga ekonomiska aspekter, för vare sig storskalig användning av biogas som drivmedel, kostnadsoptimering vid framtagande av förgasardesign eller ekonomisk lönsamhet för drift av den framtagna förgasaren, berördes i detta projekt.

### 1.4 Rapportstruktur

Vid förgasning sker omvandling av solida bränslen, en process som är väldigt komplex. Detta leder till att framtagningen av en förgasare, där denna omvandling ska ske, blir komplex där flera olika parametrar behöver studeras. Framtagandet av en förgasare består av många delsteg, både teoretiska beräkningar samt experimentella undersökningar. Samtliga delar påverkar förgasardesign, driftparametrar och de påverkar även varandra. Framtagandet av förgasaren i detta projekt är en iterativ process, där de teoretiska och experimentella resultaten vävs samman och påverkar varandra i olika led. Strukturen för framtagandet av förgasardesign och dess driftparametrar presenteras i Figur 2.



Figur 2: Arbetsgången för framtagande av en förgasares design och driftparametrar. Avsnittsnummer för varje del inom parentes

På grund av denna iterativa arbetsgång är rapporten ej uppdelad enligt den klassiska IMRaD-strukturen. Rapporten inleds med ett teoriavsnitt. Varje delsteg i framtagandet av förgasaren presenteras i kapitlet Metod och delresultat.

Vidare presenteras och diskuteras projektets slutresultat under avsnittet Övergripande resultat och diskussion, följt av rapportens slutsats.

## 2 Teori

För att designa en välfungerande förgasare är det ett flertal aspekter som behöver undersökas. Nedan presenteras de teoretiska grunder som förgasardesignen bygger på.

### 2.1 Termisk förgasning

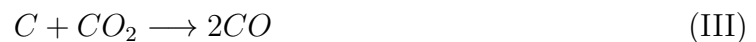
Förgasning är en process där ett bränsle, till exempel biomassa i form av barkpellets, värms upp och bränslets kolväten termiskt bryts ned. Skillnaden mellan förgasning och förbränning är att förgasning sker vid ett underskott av syre, förgasning är alltså understökiometrisk förbränning.[13]

Vid nedbrytningen av kolväten finns vattenånga närvarande för att kunna reagera med bränslets komponenter för att erhålla önskade produkter.[14] Målet vid förgasning är att bilda en syntesgas bestående av kolmonoxid, vätgas och metangas. Vid nedbrytningen av kolväten bildas även koldioxid, vatten och till viss del andra kolväten. [15] Den energirika gas som erhålls kan i senare steg nyttjas som energikälla.[13]

Då ett kolvätebaserat bränsle värms till en hög temperatur är det fyra huvudsakliga reaktioner som sker; förbränningsreaktionerna I och II



samt förgasningsreaktionerna III och IV [16, Kap 9.4].



Då nedbrytningen sker vid ett underskott av syre är det främst reaktioner III - IV som sker.

Vidare kan metan bildas via reaktion V [17].



För att erhålla ett högt utbyte av de önskade produkterna krävs det att förgasningen sker under gynnsamma förhållanden då det gäller bland annat temperatur, tryck, val av oxideringsmedel och uppehållstiden i förgasaren [13]. För att konstruera en välfungerande förgasare måste alltså dessa parametrar modelleras och testas för att den tillverkade förgasaren ska klara av dessa förhållanden.

#### 2.1.1 Uppehållstid för bränslepartikel i förgasaren

Ett kolvätebaserat bränsle kan delas upp i fyra delar: fukt, flykt, koks och aska. Fukten är det vatten som finns bundet i bränslet, och flykt avser flyktiga ämnen såsom kolmonoxid, koldioxid, vätgas samt diverse kolväten. Koksen består till största del av grundämnet kol

som, tillsammans med aska, är de komponenter som finns kvar i bränslet efter att fukt och flykt har avgetts.[16, s. 16]

Vid förgasning sker tre huvudsakliga delsteg; förångning, avgasning och koks förgasning [16]. För att kunna beräkna den tid som bränslepartikeln behöver befinna sig i förgasaren för att dessa processer ska ske behöver tiderna för de tre delstegen bestämmas.

Det första steget i en förgasningsprocess är förångning av fukten som finns bundet inuti bränslepartikeln. När en bränslepartikel förs in i en reaktor där dels varm fluid strömmar och dels en värmekälla finns installerad sker olika värmetransportfenomen. Det sker värmetransport från den strömmande fluiden till partikelns yta via konvektion samt värmetransport via strålning från värmekällan till bränslets yta. Väl på ytan sker även en konduktiv värmetransport genom bränslepartikeln. [16, Kap. 9]

När värmetransportkoefficienter för strålning och konvektion är kända kan torktiden för bränslet bestämmas enligt Ekvation 1, se Bilaga A för härledning,

$$t_{torkning} = -\frac{(m_m C_{p,m} + m_{df} C_{p,df})}{Ah_{c,eff}} \ln\left(\frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_0}\right) + \frac{m_m H_m}{Ah_{c,eff}(T_\infty - T)} \quad (1)$$

där  $m_m$  och  $m_{df}$  representerar massa fukt respektive torr substans i bränslet,  $C_{p,m}$  och  $C_{p,df}$  värmekapaciteten för fukt respektive torr substans i bränslet,  $H_m$  entalpi för vattenånga,  $A$  arean på bränslepartikeln,  $h_{c,eff}$  summan av värmetransportkoefficienten för strålning respektive konvektion,  $T_\infty$  omgivningens temperatur,  $T$  är temperaturen på bränslets yta och  $T_0$  den initiala temperaturen hos bränslet.[16, Kap. 9]

Det andra steget som sker under ett förgasningsförlopp är avgasning. I denna fas volatiliserar flyktiga ämnen, så som kolmonoxid, koldioxid, vatten och vätgas, i bränslepartikeln. Avgasningssteget kan antingen begränsas av den kemiska reaktionshastigheten eller av hastigheten för värmetransport till bränslepartikeln. För att avgöra vilket som är det begränsade fenomenet beräknas Damköhlers tal, som är kvoten mellan den kemiska reaktionshastigheten och hastigheten för uppvärmning. Se Bilaga för beräkning av denna. Om Damköhlers tal är mindre än 1 begränsas avgasningstiden av reaktionshastigheten, varpå tiden för avgasning bestäms enligt Ekvation 2

$$t_{avgasning} = \frac{-\ln\left(\frac{m-m_c-m_a}{m_{df}-m_c-m_a}\right)}{R_v} \quad (2)$$

där  $m$  är den avgasande partikelns massa,  $m_a$  massan för askan,  $m_c$  massan för koksen i bränslepartikeln och  $R_v$  reaktionshastigheten. [16, Kap. 9] Om Damköhlers tal är större än 1 begränsas avgasningstiden av hastigheten för värmetransport, varpå tiden för avgasning kan bestämmas enligt Ekvation 3

$$t_{avgasning} = \frac{m_{df} C_{p,df}}{Ah_{c,eff}} \ln\left(\frac{T_\infty - T_v}{T_\infty - T_0}\right) \quad (3)$$

där  $T_v$  är avgasningstemperaturen, som beräknas enligt Ekvation 48, se Bilaga A. [16, Kap. 9]

Efter torkning och avgasning återstår varken fukt eller flykt i bränslet, vilket gör att

vattenånga enklare kan diffundera genom bränslepartikeln och det tredje delsteget, koks-förgasning, kan ske. Detta sker genom tre huvudsakliga reaktioner enligt Reaktioner I, III och IV.

Tiden för koks-förgasning kan bestämmas genom olika approximationer av hur bränslepartikelns storlek påverkas under förloppet. Bränslepartikeln kan approximeras genom tre modeller; ”Shrinking density regime”, ”Shrinking core/sphere regime” och ”Shrinking sphere restricted by mass transfer”. Modellen ”Shrinking density regime” antar att bränslepartikeln behåller sin totala volym under koks-förgasningsförloppet men att densiteten för partikeln minskar. ”Shrinking core/sphere regime” och ”Shrinking sphere restricted by mass transfer” utgår från att partikeln krymper under koks-förgasningsförloppet. [16, Kap. 9] För att undersöka vilken modell som är lämplig för ett undersökt fall kan storleken på Thiele modulen undersökas. Thiele modulen beräknas enligt Ekvation 4

$$Th = r_0 \sqrt{\frac{R_{C,O_2}}{D_{AB,eff}}} \quad (4)$$

där  $r_0$  är den initiala radien på bränslepartikeln,  $R_{C,O_2}$  den inneboende reaktionshastigheten för en första ordningens reaktion och  $D_{AB,eff}$  den effektiva diffusionen inuti partikeln. [16]

Tiden för koks-förgasning kan med modellen ”Shrinking sphere restricted by mass transfer”, det vill säga då värdet på Thiele modulen är högt, bestämmas med hjälp av Ekvation 5

$$t_{koks-förgasning} = \frac{\rho_C d_i^2}{8\Omega D_{AB} C_{O_2,\infty} M_C} \quad (5)$$

där  $\rho_C$  är densiteten för koks,  $d_i$  den initiala diametern för bränslepartikeln,  $\Omega$  antal mol kol per mol syre,  $D_{AB}$  diffusionskoefficient,  $C_{O_2,\infty}$  koncentration syre i omgivningen och  $M_C$  molmassa för kol. [16, Kap. 9] Då Thiele modulen är låg används modellen ”Shrinking density regime”. Se Bilaga A för härledning.

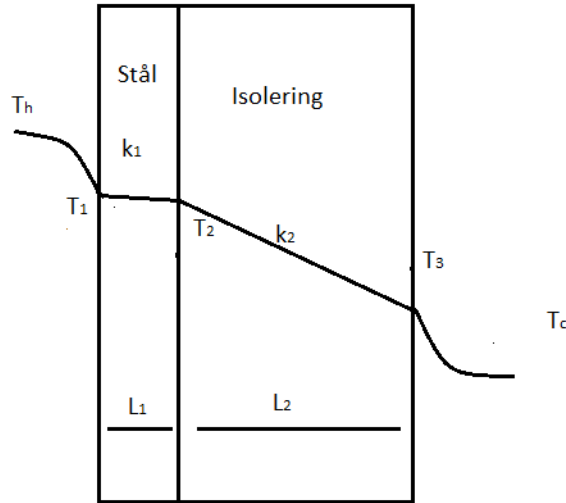
Den totala uppehållstiden för en bränslepartikel i förgasaren kan bestämmas då tiden för torkning, avgasning och koks-förgasning adderas enligt

$$t_{uppehållstid} = t_{torkning} + t_{avgasning} + t_{koks-förgasning} \quad (6)$$

### 2.1.2 Förgasarens energiförbrukning

Förgasning sker vid hög temperatur, vilket innebär att det krävs mycket energi för att uppnå denna och värmeförluster kan blir stora. Därför är det viktigt att modellera de största energiförbrukningsbidragen, värmeförluster och förångning.

Den största värmeförlusten kommer från kombinerad ledning och konvektion från insidan av förgasaren mot stålskalet, som är omslutet av isolering. Utanför isoleringen sker konvektion mot omgivande luft. Figur 3 visar temperaturprofilen för förgasaren.



Figur 3: Temperaturprofil för ledning och strömning inuti och utanpå förgasaren

För temperaturprofilen i Figur 3 kan följande balanser ställas upp.

$$T_h - T_1 = \frac{q}{h_b A_{insida}} \quad (7)$$

$$T_1 - T_2 = \frac{q L_1}{k_1 A_1} \quad (8)$$

$$T_2 - T_3 = \frac{q L_2}{k_2 A_2} \quad (9)$$

$$T_3 - T_c = \frac{q}{h_c A_{utsida}} \quad (10)$$

där  $q$  är mängden värmeflöde,  $k_i$  är värmeledningstalet för respektive material,  $T_i$  yttemperaturen för varje punkt,  $L_i$  tjockleken av respektive material,  $h_b$  är konvektiva värmeöverföringstalet för insidan av förgasaren,  $h_c$  är konvektiva värmeöverföringstalet för utsidan av isoleringen,  $A_{insida}$  är mantelarean på insidan av förgasaren,  $A_{utsida}$  är mantelarean för utsidan av isoleringen,  $A_1$  är logaritmiska medelarean mellan insidan av förgasaren och utsidan av förgasarens stålhölje. Slutligen är  $A_2$  den logaritmiska medelarean mellan mantelarean av utsidan på isoleringen och utsidan på förgasarens stålhölje.

För beräkning av  $h_b$  beräknas Reynolds tal, enligt Ekvation 11 [18]

$$Re = \frac{L \cdot v}{\nu} \quad (11)$$

där  $L$  är karakteristisk längd,  $v$  är gashastigheten och  $\nu$  är kinematisk viskositet. Om Reynoldstalet är lägre än 2300, används följande korrelationen för Nusselts tal, som är kvoten av värmelednings- och konvektionsbidragen, giltiga för påtvingad konvektion inuti rör vid laminärt flöde.

$$Nu = 1.86 \left( Pe \frac{D}{L_{tub}} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (12)$$

Där  $D$  är diametern på tuben,  $L_{tub}$  tublängden,  $Pe$  Peclets tal,  $\mu_b$  viskositeten vid bulken och  $\mu_w$  viskositeten vid centrum av röret. [18]



$h_c$  beräknas med korrelationer för naturlig konvektion kring vertikal cylinder. Om laminär strömning råder ( $Ra < 10^9$ ) används Churchill och Chus modifierade korrelation för beräkning av Nusselts tal.

$$Nu = 0.68 + \frac{0.670 Ra_L^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{4/9}} \quad (13)$$

Rayleighs tal kan beräknas enligt.

$$Ra = \frac{g\beta(T_3 - T_c)L^3}{v^2} Pr \quad (14)$$

Det konvektiva värmeöverföringstalet för in- och utsida av förgasaren beräknas från definitionen av Nusselts tal, enligt Ekvation 15. [18]

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (15)$$

Maximala mängden värme som kan avges från isoleringen via strålning kan beräknas med Ekvation 16

$$q_{\text{Strålning}} = \sigma A(T_3^4 - T_c^4) \quad (16)$$

Mängden värme som måste tillföras för att förångna tillflödet av vatten beräknas med hjälp av vattnets förångningsentalpi via Ekvation 17.

$$q_{\text{Förångning}} = \Delta H_{\text{vap}} m_{\text{vatten}} \quad (17)$$

Genom att summera energiförbrukningarna och förlusterna erhålls total energiförbrukning.

## 2.2 Fluidisering

Förgasare klassificeras efter hur gasfas interagerar med fast material. Det finns i regel tre huvudkategorier:

(I) fast eller rörlig bädd, (II) fluidiserad bädd och (III) bädd med entrained flow-teknik. Fritz Winkler utvecklade år 1921 en variant av en fluidiserad bädd. Denna utgick från att bäddmaterialet endast skulle bubblas och fungera som ett värmeöverförande medium till biomassan. [19, Kap.8]

Fluidisering är en teknik som används för att få en jämn och effektiv värmeöverföring till en bränslepartikel. Ett bäddmaterial, i form av sandpartiklar, värms upp till en hög temperatur. Genom att låta en gas blåsa under den finkorniga sandbädden kommer denna att, till viss del, lyftas upp av trycket. Bädden fungerar som en rörlig termisk massa och ger en effektiv omblandning av, samt värmeöverföring till bränslet. En rörelse i bädden ger en jämn temperaturfördelning och minskar förekomsten av isolerade fickor med högre eller lägre temperatur, som kan påverka förgasarens prestanda. Bäddmaterialet får alltså fluidliknande egenskaper.[19–21]

I traditionella fluidiserande bäddar är den cirkulerande bädden den vanligaste varianten och skillnaden mot en bubblande bädd är att den cirkulerande använder mycket högre

inflöde av gas i bädden, vilket gör att bäddmaterial följer med i den utgående strömmen från förgasaren [19, Kap.8]. Detta kräver en sekundär enhet, en cyklotron, för att avskilja solitt material från syntesgasen inför nästkommande steg i processen.

Den bubblande bädden har inte lika stort volyminflöde av gas och bäddmaterialet stannar i förgasaren. Dock är de katalytiska egenskaper från bädden bättre i den cirkulerande bädden, då kontakten mellan biomassa och bäddmaterial är större. [19, Kap.8] För att erhålla en fluidiserad bädd måste gasflödet vara tillräckligt stort, det finns alltså en minsta fluidiseringshastighet som skapar en fluidiserad bädd. Då denna är uppfylld expanderas den statiska bädden och uppvisar fluidliknande egenskaper. Om gasflödet blir för högt riskeras det att sandpartiklarna rycks med och följer gasflödet ut från förgasaren. Dessa två randvillkor behöver alltså bestämmas för att kunna bestämma tillflödeshastigheten för att erhålla en bubblande bädd. [19]

### 2.2.1 Minsta fluidiseringshastighet och terminalhastighet

För att undersöka vilka gasflöden som kan användas för att fluidisera en bädd av sandpartiklar kan teoretiska beräkningar av minsta fluidiseringshastighet samt terminalhastighet göras. Dessa är den minsta gashastigheten för fluidisering, respektive maximala hastigheten gasen kan ha utan att medryckning av bäddpartiklar sker.

För beräkning av minsta fluidiseringshastighet kan Wen och Yus korrelation användas enligt Ekvation 18. [22]

$$U_{mf} = \frac{\mu}{\rho_g d_{sv}} (\sqrt{33.7^2 + 0.0408 Ar} - 33.7) \quad (18)$$

Där  $Ar$  är Archimedes tal, enligt Ekvation 19

$$Ar = \frac{\rho_g d_{sv}^3 (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (19)$$

där  $d_{sv}$  är den diameter partiklarna skulle haft om partikeln vore en sfär med samma volym.

Terminalhastighet beräknas med hjälp av den empiriskt framtagna ekvationen, Ekvation 20 [19, s.34]

$$U_{max,sfr} = \frac{Ar^{0.666}}{7.5} \frac{\mu}{\rho_g d_{sv}} \quad (20)$$

som gäller för sfäriska partiklar. För att kompensera för formkillnader kan Ekvation 21 användas.

$$U_{max} = U_{max,sfr} K \quad (21)$$

där  $K$  är en kompensationsfaktor. Beräkning av  $K$  görs med hjälp av Ekvation 22 för Reynold lägre än 0.2 och med Ekvation 23 för Reynold större än 1000. Om Reynold är mellan dessa värden används linjär interpolation.

$$K = 0.843 \log_{10} \left( \frac{\Phi}{0.065} \right) \quad (22)$$

Där  $\Phi$  är partikelns formfaktor.

$$K = \left( \frac{4(\rho_{sand} - \rho_g) g d_{sv}}{3\rho_g (5.31 - 4.88 * \Phi)} \right)^{1/2} \quad (23)$$

### 2.2.2 Tryckfall över bädd och gasfördelare

För att uppnå en jämn fluidisering är det viktigt att gastillförseln fördelas jämnt i bädden. Detta uppnås genom att, med hjälp av förträngningar, introducera ett tryckfall i gasfördelarna som är tillräckligt stort för att eventuella tryckskillnader som kan uppstå mellan olika punkter i bädden inte ska påverka gasflödet. Därför krävs beräkningar på tryckfallet både över bädden och i förträngningarna.

Tryckfallet över bädden är detsamma som trycket sanden utgör mot botten, då det är detta som fluidiseringsgasen ska motverka. Sandens tryck beräknas med Ekvation 24

$$\Delta P = \frac{F}{A} \quad (24)$$

där  $A$  är bottenarean i förgasaren och  $F$  är sandens tyngdkraft.

Enligt P. Basu bör tryckfallet över förträngningarna vara 15 – 30 % av tryckfallet över bädden för att säkerställa jämn fluidisering [19, s.368]. Däremot anser Bo Leckner att förhållandet snarare bör vara 1:1 för en reaktor i labbskala [23].

Relationen mellan gashastigheten  $U_{or}$  och tryckfallet  $\Delta P_{or}$  över förträngningarna ges av Ekvation 25

$$U_{or} = C_{d,or} \sqrt{\frac{2\Delta P_{or}}{\rho_g}} \quad (25)$$

där  $C_{d,or}$  är förträngningens motståndskoefficient och  $\rho_g$  är gasens densitet.  $C_{d,or}$  förhåller sig till reaktorns Reynoldstal  $Re_t$  enligt Tabell 1.

Tabell 1: Förträngningarnas motståndskoefficient som funktion av reaktorns Reynoldstal. [21, s.105]

$Re_t$	100	300	500	1000	2000	>3000
$C_{d,or}$	0.68	0.70	0.68	0.64	0.61	0.60

$Re_t$  beräknas enligt Ekvation 26

$$Re_t = \frac{d_t U_o \rho_g}{\mu} \quad (26)$$

där  $d_t$  är reaktorns diameter,  $U_o$  är gashastigheten genom reaktorn, och  $\mu$  är gasens dynamiska viskositet. [21, s.105]



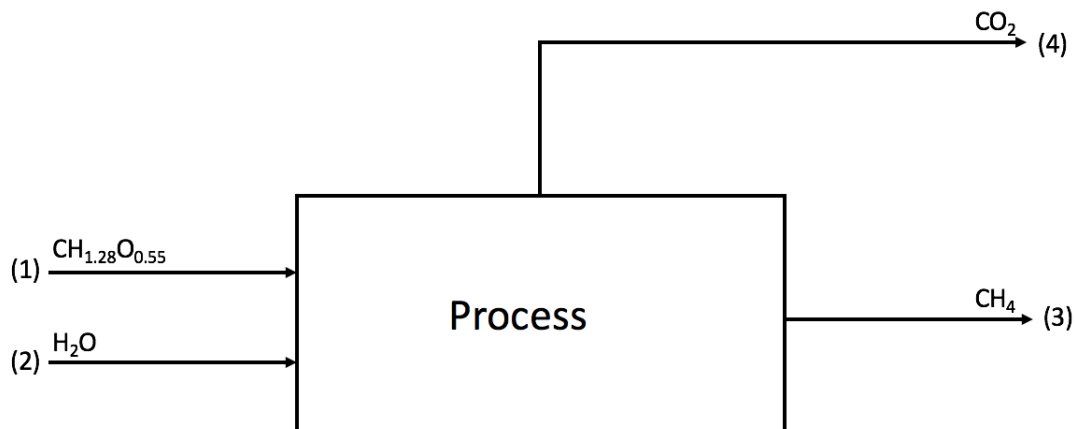
### 3 Metod och delresultat

Vid framtagning av en förgasare behöver först teoretiska och experimentella förstudier utföras. Dessa ligger till grund för förgasardesign och slutligen tillverkning av denna. Även egenskaper hos det ämnade bränslet, barkpellets, undersöks.

Dessa moment, förstudier och tillverkningsprocess, presenteras nedan.

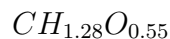
#### 3.1 Bränsletillförsel utifrån metanprocessen

Utgångspunkten för att beräkna erforderlig bränsletillförsel är det önskade metanflödet från metanframställningen, det vill säga att en tvåliterstubb trycksatt till 70 bar ska fyllas med metangas på några timmar. Vid dessa beräkningar ansattes tiden till två timmar. In- och utflöden över hela processen antogs endast bestå av bränsle och vatten respektive koldioxid och metangas. Se Figur 4.



Figur 4: Schematisk bild över in- och utflöden för hela metanproduktionen

Flödet markerat med (1) i Figur 4 är bränslemolekylen. Med hjälp av en bränsleanalys av barkpellets, se Bilaga H, var massprocenten av kol, väte, syre och andra komponenter i bränslet kända. Via antagandet att bränslet endast bestod av kol, syre och väte kunde molsammansättningen av varje komponent beräknas varpå den teoretiska bränslemolekylen formulerades enligt



För att avgöra vilket metanflöde som krävs för att fylla den trycksatta tuben på två timmar användes ideala gaslagen, modifierad med kompressibilitetsfaktormodellen, enligt Ekvation 27

$$n = \frac{PV}{ZRT} \quad (27)$$

där  $P$  är tryck,  $V$  volym,  $Z$  kompressibilitetsfaktorn för metan,  $R$  allmänna gaskonstanten och  $T$  temperatur. Då flödet av metan ut ur processen beräknades, med hjälp av Ekvation 27, antogs temperaturen i förvaringstuben vara  $25^{\circ}\text{C}$  och kompressibilitetsfaktorn  $Z$  för metan vid ovan nämnda tryck och temperatur 0.8771. [24, 25]

Utifrån det kända önskade metangasflödet ut från processen beräknades det erforderliga bränsleflödet. Detta gjordes med hjälp av elementbalanser för kol, väte och syre med

utgångspunkt och beteckningar enligt Figur 4. Elementbalanserna formulerades under antaganden att stationära förhållanden råder, att processen har en verkningsgrad på 1 samt att det endast bildas koldioxid och metan. Se Ekvationer 28, 29 och 30 för kol-, väte- respektive syrebalans.

$$\dot{n}_1 = \dot{n}_3 + \dot{n}_4 \quad (28)$$

$$0.55\dot{n}_1 + \dot{n}_2 = 2\dot{n}_4 \quad (29)$$

$$1.28\dot{n}_1 + 2\dot{n}_2 = 4\dot{n}_3 \quad (30)$$

### 3.1.1 Resultat

Med hjälp av det önskade metanflödet och elementbalanserna i Ekvationer 28-30 kunde samtliga flöden beräknas. Dessa presenteras i Tabell 2.

Tabell 2: Mol- och massflöden för hela processen

	Molflöde [mol/h]	Massflöde[kg/h]
Vatten	2.5	0.045
<b>Bränsle</b>	<b>6.2</b>	<b>0.14</b>
Koldioxid	2.9	0.13
Metan	3.22	0.052

Beräkningarna visar alltså att det krävs ett massflöde av bränsle på 0.14 kg/h för att erhålla önskat utflöde av metan. Detta motsvarar att en barkpellets, á 1 gram, matas till processen var 26:e sekund.

Dessa beräkningar är utförda efter antagandena att systemet är stationärt, att processens verkningsgrad är 1 samt att endast koldioxid och metan lämnar systemet. Samtliga antaganden är alltså avvikande från en verklig process, då det till exempel bildas andra kolväten, men de ger en bra uppskattning och grund för vidare beräkningar.

## 3.2 Driftförhållanden utifrån förgasningsexperiment

Vid framtagning av förgasaren krävs kännedom om vilka parametrar som är avgörande vid design och drift av denna. För att undersöka hur den teoretiskt modellerade förgasaren skiljer sig från en verklig utfördes experiment där några av de parametrar som valdes att studeras var förgasningstemperaturen, tillflödet av vattenånga och inert gas, koncentration av vatten i tillflödet samt bränslets storlek och hur ofta det bör matas till förgasaren. Inverkan av dessa parametrar undersöktes med hjälp av experiment på en befintlig förgasare på avdelningen för oorganisk miljö kemi på Chalmers tekniska högskola. Erhållna resultat analyserades med avseende på förgasningsstid och erhållna mängder kolmonoxid, koldioxid, vätgas och metan.

Innan experimenten utfördes skapades en försöksplanering för att effektivisera tiden och avgränsa antalet tester till så få som möjligt, där relevant information erhålls. I försöket användes kvävgas som inert gas. Experiment utfördes vid olika temperaturer, storlek på bränsle, storlek på tillflödet av vattenånga och kvävgas samt koncentration av vatten för att kunna studera dessa parametrars inverkan på förgasningsprocessen.

Det bränsle som planerades att användas i försöken var barkpellets. Dock var dessa pellets för stora för den befintliga förgasaren, varför blomsterpinnar blev det slutgiltiga bränslet i experimenten. Se Bilaga B.1 för detaljerad metodbeskrivning.

### 3.2.1 Resultat

Utifrån behandlad data från experimenten kan det visas att temperatur, koncentration av vattenånga i tillflödet samt storleken på tillflödet är betydande parametrar vid bestämning av driftförhållanden för förgasaren. Den parameter som hade den största inverkan på både erhållen mängd gas och tiden för förgasningsförloppet var temperaturen. Vid en lägre drifttemperatur tog det betydligt längre tid innan ett fullständigt förgasningsförlopp hade uppnåtts. En lägre driftstemperatur gav även mindre mängd gas ut från förgasaren. En parameter som inte ansågs ha en lika signifikant påverkan var bränslestorleken, vilket tyder på att det inte är av stor vikt att alla bränslebitar är uniforma.

De mest gynnsamma betingelserna för förgasaren i förgasningsexperimentet presenteras i Tabell 3

Tabell 3: Gynnsamma driftförhållanden för förgasaren i förgasningsexperimentet.

Temperatur	920 °C
Gastillflöde	500 ml/min
Andel vattenånga i tillflöde	20 %
Andel kvävgas i tillflöde	80 %

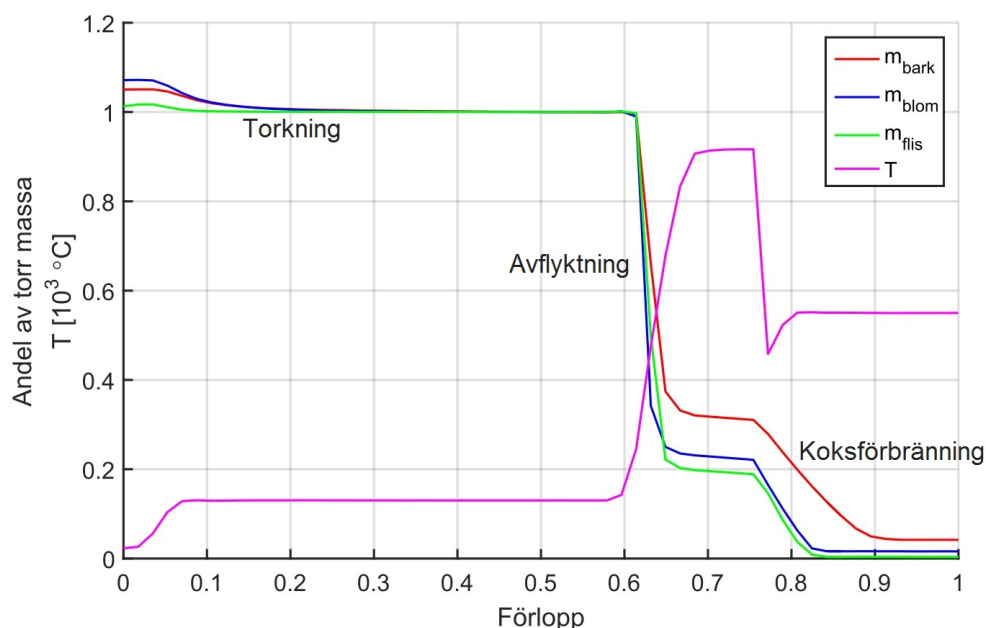
Under dessa förhållanden var även utbytet av kol högst, det vill säga mest kol från bränslet återfanns som kolmonoxid, koldioxid och metan. Experimenten visade vidare på att bränslematning bör ske var 30:e sekund för att få ett jämnt flöde av kolmonoxid, koldioxid, metan och vätgas. Dock är dessa resultat mest representativa för den förgasare som testades i experimenten men kan ses som en fingervisning för driftförhållandena hos projektets förgasare. Se Bilaga B.2 för detaljerad resultatpresentation.

### 3.3 Bränsleanalys – TGA

För att kunna dra slutsatser kring förgasningsegenskaperna hos barkpellets utifrån experimenten med blompinne, beskrivna i kapitel 3.2, behövs information om hur dessa material skiljer sig åt. Därför utfördes en termogravimetrisk analys, TGA, på prover av barkpellets, blompinne samt träflis. Resultatet av en TGA är massprofiler under torkning, avflyktning och koksförbränning av proverna. Genom att även analysera träflis erhöles information om hur de andra två bränslena skiljer sig från trä. Detta är värdefullt, då det är betydligt lättare att hitta litteratordata på diverse materialegenskaper hos trä.

### 3.3.1 Resultat

Resultaten av TGA-experimentet presenteras i Figur 5.



Figur 5: Mass- och temperaturprofiler under TGA-analys normerat efter torr massa

I Tabell 4 redovisas uppmätta andelar av olika komponenter i bränslena.

Tabell 4: Fukt-, aska-, koks- och flyktandelar för varje bränsle som undersöktes med TGA.

Bränsle	Fukt (%)	Flykt (%)	Koks (%)	Aska (%)
Barkpellets	4.86	65.58	25.58	3.98
Blomsterpinne	6.69	72.69	19.14	1.49
Träflis	1.30	80.06	18.30	0.34

Blomsterpinnen innehöll 10.8 % mer flykt än barkpelletsen, vilket innebär att 10.8 % mer barkpellets måste förgasas för att generera lika mycket flykt. Resultaten visar även att koksförbränningen tog betydligt längre tid för barkpellets än för blompinne. Även om förhållandena i förgasaren kommer vara annorlunda, så kan detta tas som en fingervisning om att barkpellets lär ha en längre total uppehållstid i förgasaren. Blompinne och träflisen gav resultat som ligger väldigt nära varandra. Detta indikerar att eventuella andra data som kan behövas för blompinne kan antas ligga nära de för vanligt trä.

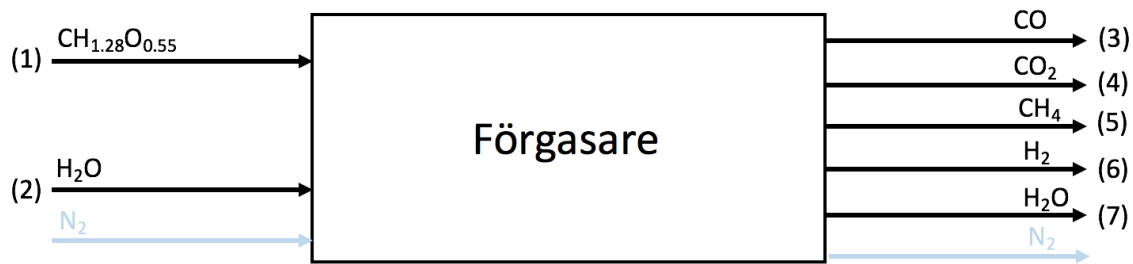
Se Bilaga C för mer detaljer om TGA-experimentets utförande och resultat.

### 3.4 Förväntade utflöden från förgasaren

Det är önskvärt att få en uppfattning om hur mycket av respektive komponent, kolmonoxid, koldioxid, metan och vätgas, som potentiellt kan erhållas från den tillverkade förgasaren. Det är av vikt, ur designsynpunkt av förgasarens storlek, att få en uppfattning om storleken och sammansättningen på flöden till och från förgasaren. För att undersöka



detta användes molbalanser över förgasaren enligt Figur 6 samt data från experiment utförda på en befintlig förgasare.



Figur 6: Schematisk bild över in- och utflöden för förgasaren

Elementbalanser för kol, väte och syre ställdes upp utifrån den hypotetiska bränslemolekylen  $CH_{1.28}O_{0.55}$ , under antagandet att allt kol i bränslet återfinns i kolmonoxid, koldioxid eller metan. Kvävgas är i detta fall inert, det vill säga att det inte kommer att delta i de reaktioner som sker, varför den utesluts från balanserna. De balanser som togs fram, för kol, syre respektive vätegas, presenteras i Ekvation 31-33 med nummerbeteckning av flöden enligt Figur 6.

$$\dot{n}_1 = \dot{n}_3 + \dot{n}_4 + \dot{n}_5 \quad (31)$$

$$0.55\dot{n}_1 + \dot{n}_2 = \dot{n}_3 + 2\dot{n}_4 + \dot{n}_7 \quad (32)$$

$$1.28\dot{n}_1 + 2\dot{n}_2 = 4\dot{n}_5 + 2\dot{n}_6 + 2\dot{n}_7 \quad (33)$$

I Ekvationer 31-33 är det endast ett av flödena, bränseltillförseln, som är känd. Det är alltså bara en av sex variabler som är kända för tre ekvationer. För att kunna lösa molbalanserna användes data från förgasningsexperiment på en befintlig förgasare. Värden togs vid 920 °C och där tillflödet bestod av 40 % vattenånga, se Tabell 14 i Bilaga B.2. Med hjälp av denna togs en procentsats fram för hur många mol kolmonoxid, koldioxid och metan som bildades i förhållande till varandra, det vill säga värden på hur mycket av det totala utflödet av kol som återfanns i respektive ämne. Genom att använda data vid dessa förhållanden kunde resterande flöden beräknas.

### 3.4.1 Resultat

De beräknade procentsatserna för det totala kolutflödet var 38.75 % kolmonoxid, 41.41 % koldioxid samt 19.84 % metan. Utbytet av kol beräknades vara ca 70-80 %.

Enligt tidigare beräknade flöden, vilka togs fram genom balanser över hela metanproduktionen, presenterade i Tabell 2, krävdes 6.2 mol/h av barkpellets för att erhålla ett flöde av 1 l/h metangas, med ett tryck på 70 bar, från hela metanprocessen. Denna mängd bränsle användes som utgångspunkt för att beräkna utflödet från förgasaren.

Antal mol bränsle som matades in i förgasningsexperimentet skiljer sig från det som har utgångspunkt i önskat metanflöde från processen, framtaget i Avsnitt 3.2. Därför kan inte de, i förgasningsexperimentet, använda vattenflöden användas i dessa beräkningar.

Således behöver erforderligt tillflöde av vatten beräknas. Detta gjordes genom att kombinera Ekvation 32 och Ekvation 31 till Ekvation 34. Dessutom användes de framtagna procentsatserna för kolmonoxid, koldioxid och metan.

$$\dot{n}_7 = \dot{n}_1(0.55 - 0.3875 - 2 \cdot 0.4141) + \dot{n}_2 \quad (34)$$

Enligt Ekvation 34 kan det ses att termen innanför parentesen blir negativ, varför vattentillflödet,  $\dot{n}_2$ , måste vara större än den vänstra termen i högerledet. För att undvika ett underskott av vatten bestämdes vattentillflödet vara 40 % större än det minimala, alltså 40 % större än den vänstra termen i högerledet. Tillflöde av vattenånga beräknades till 6 mol/h vilket motsvarar 184 l/h då 100 °C och atmosfärstryck används.

Med hjälp av det framtagna tillflödet av vatten, procentsatserna för respektive komponent och molbalanserna i Ekvation 31-33 kunde mol- och volymflöden av kolmonoxid, koldioxid, metan, vätgas och vatten från förgasaren beräknas. Dessa presenteras i Tabell 5.

Tabell 5: Teoretiskt beräknade utflöden från förgasaren.

Ämne	Kolmonoxid	Koldioxid	Metan	Vätgas	Vatten
Molflöde [mol/h]	2.4	2.6	1.2	5.6	1.9
Volymflöde [ml/min]	923	1040	498	2282	791

Genom att summera volymflödena erhålls ett totalflöde ut från förgasaren på 9278 ml/min, där även kvävgasen är inkluderad. Detta värde behöver tas hänsyn till då rör, kopplade från förgasaren, ska dimensioneras.

Ur Tabell 5 kan det avläsas att det bildas mer koldioxid än kolmonoxid, vilket inte är önskvärt då koldioxid inte är en önskad produkt. Däremot bildas det 2.5 gånger mer vätgas än kolmonoxid, vilket är gynnsamt då det krävs en ratio på 3:1 av vätgas och kolmonoxid då dessa ska reagera vidare i senare processsteg och bilda metan enligt Reaktion V. De beräknade värdena skulle kunna användas för att jämföra med experimentella data från den bygga förgasaren. Denna jämförelse kan användas som verifiering av molbalanserna.

### 3.5 Förgasarens energiförbrukning

Modellering av värmeförluster görs för att avgöra hur kraftig ugn som behövs för att värma upp förgasaren till önskad temperatur. Idealt bör en 2 kW ugn räcka, så energiförbrukning bör ej vara i denna storleksordning, eftersom att ugnen ska klara av att hålla denna en temperatur på 800-900 °C. I beräkningarna antogs att 10 cm tjock isolering av glasfiber användes. Den termiska verkningsgraden förväntas vara betydligt lägre än för en anläggning i industriell skala [26].

Gasens fysikaliska egenskaper antogs vara motsvarande 40 % vattenångans och 60 % kvävgasens värde på egenskaperna, ty denna gassammansättning ansågs lämplig för förgasningsförloppet.

Ekvation 7, 8, 9 och 10, kombineras och följande uttryck erhålls.

$$T_h - T_c = q \left( \frac{1}{h_b A_{insida}} + \frac{L_1}{k_1 A_1} + \frac{L_2}{k_2 A_2} + \frac{1}{h_c A_{utsida}} \right) \quad (35)$$

Vid beräkning av värmeflödet på utsidan av isoleringen antogs  $T_h$  vara 800 °C och isoleringens yttertemperatur,  $T_3$ , vara 50°C Beteckningar enligt Figur 3. För att lösa ut värmeflödet,  $q$ , kombinerades Ekvation 10 och 35. Ekvation 36 erhöles [18]

$$q = \frac{T_3 - T_h}{\frac{1}{h_c A_{\text{utsida}}} + \left( \frac{1}{h_b A_{\text{insida}}} + \frac{L_1}{k_1 A_1} + \frac{L_2}{k_2 A_2} + \frac{1}{h_c A_{\text{utsida}}} \right)} \quad (36)$$

Ekvation 12 och 13 användes för att beräkna Nusselts tal för insidan respektive utsidan av förgasaren. Med hjälp av ekvation 15 erhöles de konvektiva värmeöverföringstalen  $h_b$  och  $h_c$ . Den totala värmeförlusten från ledning och strömning beräknades med Ekvation 36, som sedan divideras med mantelarean för isoleringen för att få ut totala värmefluxet  $W$ . [18]

Utöver dessa energiförbrukningar sker en uppvärming av tillförd gas, dock är denna energiförlust liten i förhållande till övriga förluster.

Energiförbrukning från förångning av vatten beräknades med Ekvation 17, och energiförluster från strålning beräknades med Ekvation 16.

### 3.5.1 Resultat

Tabell 6 visar de beräknade energiförbrukningarna.

Tabell 6: Resultat av energiförbrukningsberäkningar.

Värmeflux	258.3 $\frac{W}{m^2}$
Förångningsvärme	119.4 W
Strålningsförlust	82.2 W

Den beräknade strålningsförlusten är den för en svart kropp, vilket glasfiberisolering skiljer sig avsevärt ifrån. Förlusten blir i verkligheten lägre. Slutsatsen dras att en 2 kW ugn klarar av att värma reaktorn trots förluster.

## 3.6 Uppehållstid för bränslepartikel i förgasaren

Diverse parametrar krävs för att kunna upprätta en god design av en förgasare. En av dessa parametrar är uppehållstiden, vilken ger en uppfattning om den tid som varje bränslepellets kräver för att erhålla ett fullständigt förgasningsförlopp. Ett fullständigt förgasningsförlopp innebär att torkning, avgasning och koks-förgasning äger rum. Kännetecken om uppehållstiden kan användas för att uppskatta bottenarean på den förgasare som ska byggas.

Vid beräkning av uppehållstiden fanns ej värmekapaciteten för barkpellets samt barkpelletsens porositet att tillgå, varför dessa uppskattades vara desamma som för trä. För att undersöka huruvida dessa uppskattningar påverkade resultatet gjordes känslighetsanalyser på dessa parameterar, se Bilaga A.1. Efter att inverkan från värmekapaciteten och porositeten på förgasningstiden var känd kunde den erforderliga uppehållstiden i förgasaren beräknas. Tid för torkning kunde beräknas med Ekvation 1. För att kunna beräkna tiden för avgasning krävdes vetskap om Damköhlers tal, vilket i detta fall blev större än 1, varpå Ekvation 3 kunde användas. Vidare kunde tiden för koks-förgasningen beräknas med hjälp av modellen "Shrinking sphere restricted by mass transfer" enligt Ekvation 5.

### 3.6.1 Resultat

Uppehållstiden beräknades med en förgasningstemperatur på 700 respektive 900 °C, se Tabell 7. Dessa beräkningar är utförda med en partikeldiameter på 7 mm samt en massa på 1 g.

Tabell 7: Resultat av uppehållstidsberäkning

	700 °C [s]	900 °C [s]
Torkning	4.2	1.9
Avgasning	20.8	11.2
Koxsförgasning	611	531
<b>Total</b>	<b>636</b>	<b>544.1</b>

Utifrån värden i Tabell 7 kan det avläsas att det är koxsförgasningsförloppet som är det begränsade steget i ett förgasningsförlopp, eftersom det tar längst tid. Det kan även utläsas att det tar kortare tid att uppnå ett fullständigt förgasningsförlopp då temperaturen är högre.

Genom att studera Ekvation 1, 2, 3 och 5 kan det ses att det är endast tiden för koxsförgasningen, Ekvation 5, som beror av diametern på partikeln. Vidare kan det ses att tiden för torkning och tiden för avgasning beror på massan av partiklarna. Eftersom koxsförgasning är det begränsade steget i ett förgasningsförlopp, med avseende på uppehållstiden, har partikeldiametern således en stor betydelse för uppehållstidens längd.

## 3.7 Minsta fluidiseringshastighet och terminalhastighet

För att avgöra inom vilket intervall gashastigheten kan varieras vid fluidisation beräknades minsta fluidiseringshastighet och terminalhastighet. Gasens fysikaliska egenskaper antogs vara motsvarande 40 % vattenångans och 60 % kvävgasens värden. Detta ansågs vara en rimlig sammansättning eftersom en liknande förgasare arbetade med gas av denna sammansättning.

Minsta fluidiseringshastigheten beräknades med Ekvation 18, terminalhastighet beräknades med Ekvation 20 och 21. Då Reynolds tal var mellan 0.2 och 1000 användes både ekvation 22 och 23 och interpolation för beräkning av kompensationsfaktorn K. De framtagna hastigheterna beräknades sedan om till flöden, med enheten normalkubikmeter per sekund. Vidare saknades formfaktor för bäddpartiklarna, vid beräkning av terminalhastighet. Därför användes den formfaktorn inom det vanliga intervallet 0.67-1 som gav lägst resultat. [19]

### 3.7.1 Resultat

De beräknade flödena och hastigheterna presenteras i Tabell 8

Tabell 8: Resultat av fluidiseringshastighetsberäkningar.

$U_{mf}$	$0.002 \frac{m}{s}$
$Q_{mf}$	$0.298 \frac{NL}{min}$
$U_{Max}$	$0.769 \frac{m}{s}$
$Q_{Max}$	$113.29 \frac{NL}{min}$

Sammanfattningsvis är intervallet av möjliga hastigheter stort. Detta innebär att andra optimeringar för gashastighet har stor frihet i vilka hastigheter som går att använda.

### 3.8 Materialval

Förgasningsprocessen av biomassa kräver en hög temperatur för en effektiv produktion av syntesgas. Enligt P. Basu krävs det åtminstone 800 °C, men i industriella sammanhang är temperaturspannet på 800-1000 °C [19, Kap.8]. Oavsett vilken temperatur som är mest effektiv, är det ett faktum att materialet som förgasaren skall bestå av måste klara en temperatur på minst 1000 °C. Rostfritt stål finns i flera olika utföranden, men ingen variant klarar den högre delen av intervallet eftersom det blir mjukt och kryper, vilket gör att detta inte fungerar som material. Därför valdes ett temperaturtåligt stål av typen 253-MA [27]. 253-MA är ett austenitiskt krom-nickelstål legerad med kväve och jordartsmetaller, se Tabell 9 [27].

Tabell 9: Kemiska sammansättningen av 253-MA stål. \*Till cerium läggs även kvantiteten av andra sällsynta jordartsmetaller, eftersom tillsatsen sker i form av mischmetall, innehållande ca 50 % Ce.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Ce*
0.08	1.6	≤ 0.8	≤ 0.040	≤ 0.030	21	11	0.17	0.05

Materialet kännetecknas av hög kryphållfasthet, mycket god beständighet mot isoterm och, i synnerhet, cyklisk oxidation. Men av störst vikt är materialets goda strukturella stabilitet vid höga temperaturer, med en maximal arbetstemperatur runt 1150 °C. Ytterligare en bra egenskap är stålets goda svetsbarhet, vilket förenklar tillverkningen av förgasaren.

### 3.9 Förgasardesign

De förstudier och experiment som föregick designarbetet resulterade i ett antal funktioner som krävdes av förgasaren.

- Förgasaren ska dimensioneras för att klara av att producera en tillräcklig mängd syntesgas på utsatt tid
- Förgasaren ska gå att öppna för att smidigt kunna tömma ut och byta bäddmaterial
- Förgasarens öppning ska kunna förslutas på ett sådant sätt att läckage ej uppkommer
- Fluidiserad bädd ska implementeras på grund av dess goda egenskaper vid förgasning
- Bränsletillförsel ska kunna ske utan att luft kommer in i förgasaren
- Temperaturen ska kunna mätas i förgasaren

Nedan följer en beskrivning av hur dessa funktioner implementerades i förgasarens design.

### 3.9.1 Dimensionering

Målet för förgasarens prestanda är att producera en mängd syntesgas som gör det möjligt att uppfylla målet för metanproduktion, att fylla en tvåliterstank trycksatt till 70 bar på ett par timmar. Detta sätter krav på förgasarens fysikaliska storlek eftersom denna skall kunna processera en viss mängd biomassa med en uppehållstid som beskrivs teoretiskt i avsnitt 3.3.1 och i Bilaga A, samt praktiskt i Bilaga B.

Under stationära förhållanden antogs det att bränslepartiklarna lägger sig ovanpå bädden, i ett lager med samma tjocklek som en bränslepartikel. Ett tunt lager av bränsle skapar de bästa förutsättningarna för att reaktionerna III - IV ska ske som snabbast. Ett tjockt lager av bränsle kan försämra förutsättningarna för en effektiv förgasningsprocess, då de översta bränslepartiklarna inte får tillgång till ett färskt gasinflöde och att de omges av förgasningsprodukterna från de understa partiklarna. Det kan leda till att uppehållstiden blir längre för de översta bränslepartiklarna och resulterar i en ackumulering av bränsle som utnyttjas långsamt och ineffektivt.

Då bränslets storlek och volym är känt, kan diametern på förgasaren uppskattas. Utgångspunkten är en matningsfrekvens på ungefär var 30:e sekund, se Bilaga B. En låg temperatur i förgasaren ger en längre uppehållstid och således uppehåller sig en större volym bränsle i förgasaren vid stationärt tillstånd. För en hög temperatur blir uppehållstiden kortare och volymen av bränslet således mindre. Förgasarens diameter kan då förminskas. Denna uppskattning kan tillsammans med resultat för uppehållstiden i Bilaga B, ge ett storleksintervall för förgasarens diameter på 100-160 mm.

En praktisk avgränsning avgjorde vilken diameter som valdes, då endast en begränsad variation av prefabricerade rör i 253-MA fanns att tillgå [27]. Ett rör med ytterdiameter på 114,3 mm och en innerdiameter på 102,26 mm valdes. Höjden på förgasaren antogs behöva vara fyra gånger större än diametern på förgasaren, enligt uppgifter i kapitel 6 av Kunii [21, Kap.6]. Höjden uppskattades till 600 mm då bäddens storlek, luftfördelarens placering och möjlighet att kapa i förgasaren i händelse av förnyad design, summerades.

### 3.9.2 Förslutning

Det är önskvärt att kunna öppna förgasaren för att på ett smidigt sätt kunna byta bäddmaterialet i syfte att experimentera med olika typer av bäddmaterial och för att ta ut aska. Det är även viktigt att ingen syntesgas läcker ut från förgasaren till omgivningen eftersom den då går förlorad från processen, men även för att syntesgasen innehåller hälsofarliga komponenter. För att hitta en lösning på detta togs inspiration från vakuumflänsar. Dessa är väl beprövade och konstruerade för att vara täta vid stora tryckdifferenser mellan tryckkärl och dess omgivning. Då förgasaren kommer drivas nära atmosfärstryck med möjlighet till ett svagt övertryck, bör ett vakuumflänsförband säkerställa en tät förslutning av förgasaren.

Det som särskiljer vakuumflänsar från andra typer av flänsar är utformningen av packningsmotlägget och hur detta samverkar med packningen. En smal förhöjning av packningsmotläggets yta utgör en tryckpunkt då flänsförbandet kläms ihop. Packningsmotlägget är speglat på båda flänsarnas ytor så att förhöjningarna klämmer åt packningen mitt för varandra. Förhöjningarna har en skarp spets som skär in packningen då fläns-

förbandet kläms åt. Förhöjningen i packningsmotlägget kallas även för kniv på grund av dess funktion och kommer härnäst benämnas som kniv i denna rapport. Då kniven skär in i packningen så deformeras packningen kring kniven och formar därmed en tät förslutning. Packningamaterialet som används är koppar eftersom det är ett förhållandevis mjukt material som deformeras lätt av kniven men behåller sin form efter deformation.

Ritningar av flänsförbandet och kopparpackningen togs fram enligt Figur 31, 32 och 33. Tillvägagångssätt vid tillverkningen av flänsförbandet och kopparpackningen beskrivs i Bilaga F.

Nedre änden av förgasaren försluts med en svetsad bottenplatta. Det finns inget behov av att kunna öppna denna ände och därför är svets det självklara alternativet. För detta ändamål designades en bottenplatta med ett centrerat hål för inflöde av gas enligt Figur 28. Tillverkningsprocessen beskrivs i Bilaga F.

### 3.9.3 Fluidisering

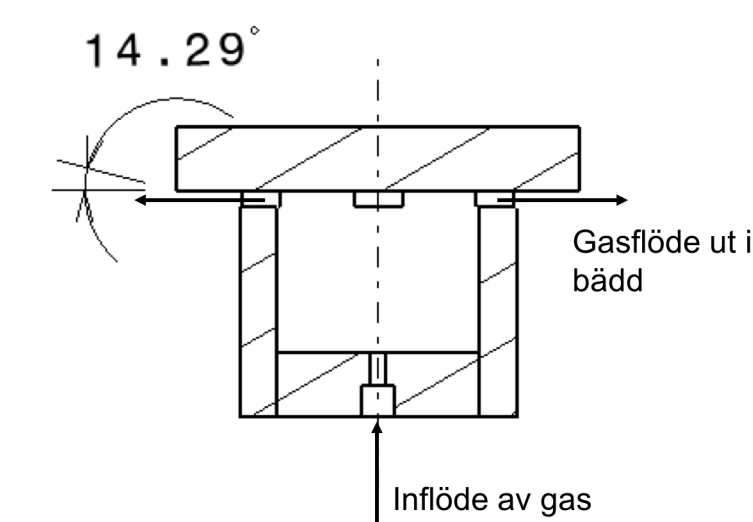
Den bubblande fluidiserande bädden (BFB) valdes som funktionell konstruktion till förgasaren med grund i att den är mindre komplicerad än en cirkulerande fluidiserande bädd (CFB) att tillverka, samt att den katalytiska effekten från bäddmaterialet inte ingår inom projektets ramar.

Bäddmaterial fluidiseras med vattenånga, luft, koldioxid eller syre, eller en kombination, beroende på valet av förgasningsmedium. Den aska som bildas från biomassan kommer inte att avskiljas från bädden, eftersom detta är ett problem som uppkommer vid långvarig kontinuerlig drift. Det är dock ett problem som måste hanteras i en kommersiell anläggning [19, 21].

Förgasningsmediet kan tillföras i två steg. Det första steget tillförs under bädden och är tillräcklig för att upprätthålla den fluidiserade bädden vid den önskade temperaturen. Det andra stegets tillsätts över bädden och omvandlar medbringade oreagerade koks-partiklar och kolväten till användbar gas.

En av de viktigaste designfaktorerna i en förgasare är hur gasfördelningen under bädden skall konstrueras för bästa resultat. Det som eftersträvas är en jämn fluidisering och att bäddmaterialet inte skall kunna ta sig igenom gasfördelarna. Den ideala konstruktionen är en porös platta som ger ett tillräckligt högt flödesmotstånd för att ge en jämn fördelning av gas över bädden [28]. Dessvärre det är svårt att hitta värmebeständiga porösa plattor och de som finns är mycket dyra. Istället kan andra material användas, till exempel kompakterade trådnät som förstärkas genom att klämma de mellan metall- eller trådplattor med stora öppningar. Även om denna konstruktionen enligt Kunii är väldigt bra, har den ett flertal nackdelar, bland annat att ett högt tryckfall kan leda till ökade effektbehov. Det är ofta en stor driftskostnadsfaktor och en viktig parameter när en förgasare ska optimeras [21, Kap.4]. Det är även svårt att hitta material som har en hög resistivitet mot termiska spänningar, vilket gör att alla komponenter måste tillverkas på beställning, av till exempel 253-MA stål. Denna konstruktion är därför inte aktuell för den tänkta förgasaren. I Bilaga D beskrivs tre olika designförslag som av olika anledningar inte valdes som den slutgiltiga designen.

Det fjärde och slutgiltiga designförslaget fördelar den ingående gasen via dysor i botten på förgasaren. Enligt Kunii är denna metoden att föredra då hög temperatur kännetecknar processen [21, Kap.4]. Dysorna kan konstrueras på olika sätt för att kringgå problemet med att bäddmaterialet kan falla genom fördelaren [21, Kap.4]. Det viktigaste är att designen inte tillåter att partiklarna blockerar hålen och skapar stopp där den ingående gasen ska introduceras i bädden. För att minimera denna effekt togs en dysa fram där en sandfälla hindrar bäddmaterialet från att ta sig ner i gasinflödet, se Figur 7.



Figur 7: Dysa som introducerar den inkommande gasen till bädden.

Dysan utnyttjar bäddmaterialets rasvinkel för att hindra bäddmaterialet från att ta sig in i dysan och därmed blockera gasinflödet till bädden. Rasvinkel är den vinkel som uppstår då sand eller andra material bestående av små partiklar matas ut i en ström vinkelrätt mot ett plant underlag. Materialet bildar då en konformad struktur på underlaget. Friktionen mellan partiklarna hindrar materialet från att flyta ut likt en fluid, men kan inte behålla formen då vinkeln mellan det plana underlaget och konens utsida överskrider ett visst värde, vilket är specifikt för olika material. Om vinkeln mellan yttre kanten på dysans lock och undre kanten på gasfördelarhålet, se Figur 7, är mindre än bäddmaterialets rasvinkel, borde bäddmaterialet inte flöda in genom gasfördelarhålet då gasflödet stängs av. Problem kan dock uppstå eftersom vattenånga flödar genom dysorna. Då kvarvarande vattenånga kondenserar efter avslutad drift uppstår ett undertryck som kan dra in sand i dysan. Detta återstår att se vid test av förgasaren.

En jämn fördelning av gasflödet mellan dysorna säkerställs om tryckfallet över dysorna är lika stort som tryckfallet över bädden. Varje dysa förses med en förträngning över öppningen vid dess gasinlopp, såsom visas i Figur 7. En del förgasare tillverkas med förträngningen, och då även tryckfallet, placerad vid fördelarhålen istället för vid gasinloppen [21, Kap.4]. En sådan design kräver större precision vid tillverkningen och det måste säkerställas att samtliga hål är av rätt storlek så att tryckfallet blir optimalt. Dessutom finns risk att en jeteffekt bildas från varje fördelarhål, vilket påskyndar blästringseffekten på alla komponenter vid drift [28]. Av dessa anledningar, samt för att fördelarhålen i varje dysa ska vara färre och enklare att tillverka, ligger förträngningarna vid gasinloppen. Ett annat sätt att säkerhetsställa att det skapas ett tillräckligt tryckfall för jämn fluidisering är att öka den ingående gasens flöde. Detta ger dock i kommersiella förgasare en höjd kost-



nadsfaktor då onödig energi går åt för att en designparameter inte optimerades [19, Kap.8].

Bäddens tryckfall beräknades med Ekvation 24, där kraften var sandens tyngd mot förgasarens botten och arean var förgasarens bottenarea. Gasens fysikaliska egenskaper, så som viskositet, densitet mm, antogs vara en kombination av vattenånga och kvävgas, motsvarande andelen av respektive gas i blandningen. För beräkningen användes en bäddhöjd på 10 centimeter. Bäddens densitet är den för olivinsand, ca 1600 kg/m<sup>3</sup> [29].

$Re_t$  bestämdes enligt Ekvation 26, där  $U_o$  bestämts utifrån den grundläggande ekvationen  $U = Q/A$ , med ett ångflöde på 6 mol/h som räknats om till volymflöde vid standardtryck och 900 °C. Därefter kunde  $C_{d,or}$  bestämmas enligt Tabell 1, och en önskad gashastighet genom förträngningarna beräknades enligt Ekvation 25. Med hjälp av samma samband som tidigare beräknades önskad hålarea enligt Ekvation 37

$$A_{or} = \frac{Q}{n_{or}U_{or}} \quad (37)$$

där  $n_{or}$  är antalet förträngningar, i det aktuella fallet tre stycken (se kapitel 3.9.5).

Resultaten av tryckfallsberäkningarna i form av tryckfallet över bädden, önskad gashastighet genom förträngningarna och förträngningarnas individuella hålarea presenteras i Tabell 10.

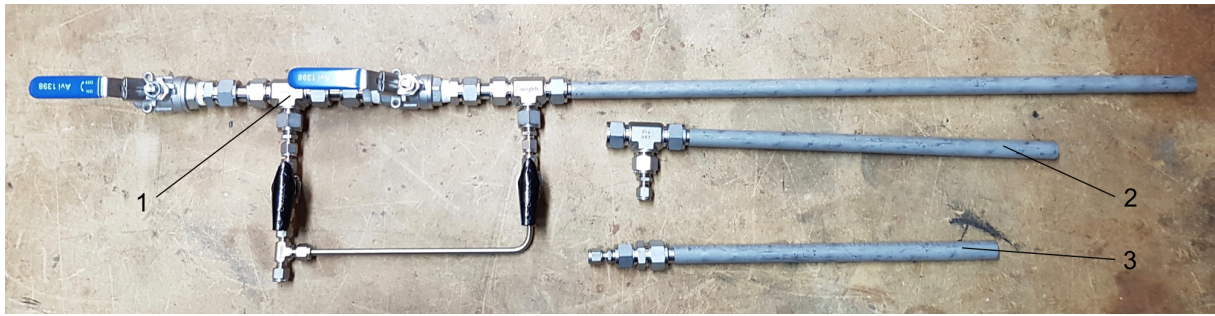
Tabell 10: Resultat av tryckfallsberäkningar.

$\Delta P_{bädd}$	1500 Pa
$U_{or}$	76.0 m/s
$A_{or}$	0.703 mm <sup>2</sup>

Detta motsvarar en förträngningsdiameter på 0.95 mm. Det höga värdet på  $U_{or}$  bekräftar att stora problem med blästring hade uppstått om förträngningarna hade placerats vid fördelarhålen.

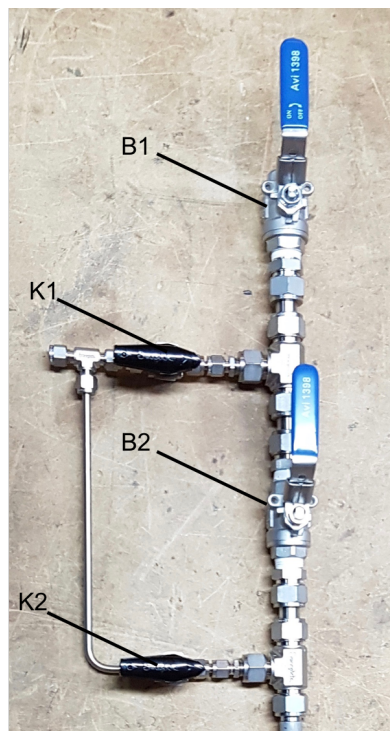
### 3.9.4 Rörsystem för bränslematning, gasflöden och temperaturmätning

För att kunna mata in bränsle i förgasaren på ett säkert sätt måste ett system för detta utvecklas. Det är viktigt att undvika tillförsel av luft till reaktorn genom bränslematningen, eftersom syrgas bör undvikas för att styra reaktionerna. Därför utvecklades ett slussystem med kvävgas. Kvävgas är inert och fungerar därför bra som slussmedium i detta fall eftersom den inte reagerar med andra komponenter i förgasaren och är inte brännbar. Bränslematningen utgår från två manuella hydralventiler med två trevägskopplingar för inflöde av kväve, se Figur 8.



Figur 8: (1) Bränslematning med kvävesluss. (2) Gasuttag och port för termoelement. (3) Gasinflödesrör till botten av förgasaren.

Bränslematningssystemet och dess olika ventiler redovisas i Figur 9. Kväve flödar in i slussystemet genom trevägskopplingen till vänster om K1. Kväve flödar konstant i denna sluss under drift. Bränsle introduceras till systemet genom B1.



Figur 9: (B1) Bränsleventil 1 (B2) Bränsleventil 2  
(K1) Kväveventil 1 (K2) Kväveventil 2.

Bränslepellets slussas in i förgasaren genom följande tillvägagångssätt.

1. K1 och B2 stängda, B1 och K2 öppna
2. Släpp ned bränslepellets genom B1 och stäng sedan B1
3. Öppna K1
4. Öppna B2 och stäng K2 samtidigt
5. Öppna K2 och stäng B2 samtidigt

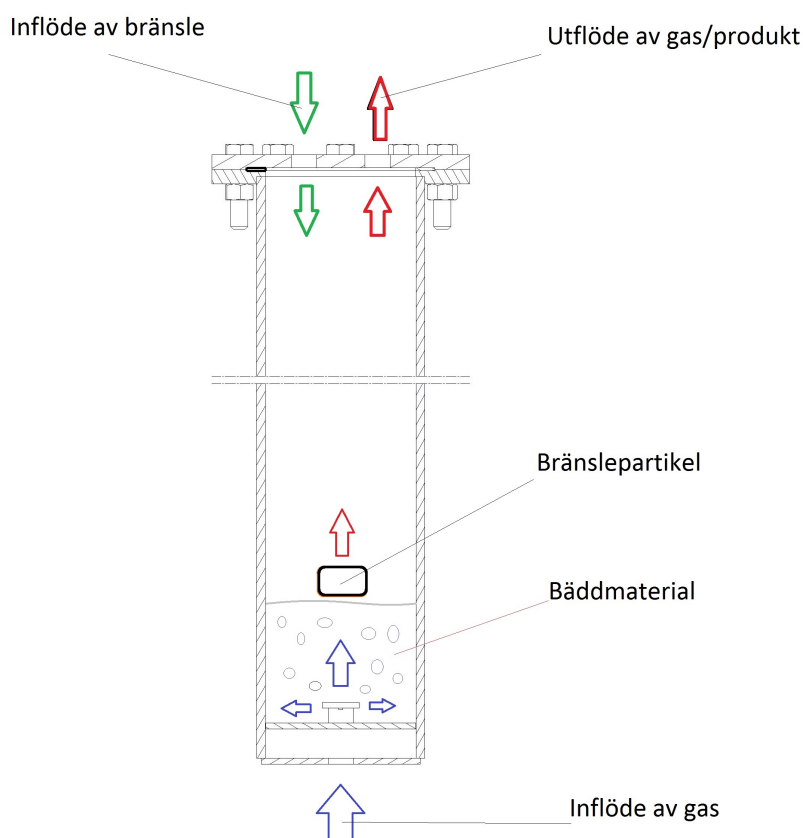
6. Stäng K1

7. Återgå till steg 1

Ritning av rörsystemen redovisas i Bilaga E och tillverkningsprocess beskrivs i Bilaga F.

### 3.9.5 Slutgiltig design

Den slutgiltiga designen är beskriven i Figur 10 och med en ritning i Figur 11. Alla komponenter är av 253-MA stål, förutom kopparpackningen i flänsförbandet, rörkopplingar samt de rostfria bultarna som trycker ihop flänsen. Själva förgasningen kommer att ske i den cylindriska kammaren och för att hålla tätt är botten igensvetsad och toppen försluten med ett flänsförband. En bit ifrån botten på förgasaren är en insats monterad. Denna består av en plåt som skiljer bäddmaterialet från underliggande gasinflöde. Gasen introduceras genom tre stycken dysor av typen som beskrivs i Figur 7. I toppen på förgasaren kan utgående gas avledas och ett termoelement kan föras in genom samma öppning ner i bädden. Bränslematningen sker genom en manuell kvävesluss, där varje bränslebit avskiljs från luft genom att kväve introduceras i den avskilda delen mellan de två hydraulventilerna, se Figur 8. Röret från bränslematningen går ner en bit i förgasaren för att inte bränslebitar skall kunna följa med in i gasutflödet. Samtliga mått är beskrivna i Bilaga E.



Figur 10: Flöden in och ut från den slutgiltiga designen av förgasaren

Dysorna i insatsen har ett avstånd mot varandra på 43 mm, se Figur 29, vilket enligt Kunii är för tätt i jämförelse med liknande förgasare [21, Kap.4]. Men om antalet dysor hade minskats, hade även antalet hål för gasinflödet minskat, vilket inte hade varit en fördel i strävan efter en jämn fluidisering.



## 4 Övergripande resultat och diskussion

Vid design av förgasare är det många designparametrar som behöver bestämmas och utvärderas. Inledningsvis presenteras resultat med tillhörande resultatanalys och diskussion från projektets delsteg på vägen mot en tillverkad förgasare. Därefter presenteras resultat med tillhörande diskussion av den slutgiltiga förgasardesignen och tillverkningen av förgasaren. De två planscher som togs fram presenteras i Bilaga G.

### 4.1 Driftparametrar

Förgasaren ska leverera tillräcklig mängd gas till efterföljande processteg i vilka metanisering sker. Det är även av vikt att bränslet utnyttjas på ett effektivt sätt, det vill säga att så mycket kol som möjligt i bränslet återfinns som kolmonoxid och metan i gasutflödet. För att uppnå dessa önskemål krävs det att förgasningen sker vid gynnsamma tryck och temperaturer samt med en fördelaktig sammansättning och hastighet på gastillflödet. Även bränslematningsfrekvensen behöver uppskattas.

För att bestämma de mest optimala driftförhållandena för den tillverkade förgasaren hade tester på denna behövt utföras. Då detta var utanför projektets tidsram har gynnsamma driftförhållanden uppskattats med hjälp av teoretiska och experimentella undersökningar. Resultaten av dessa, med tillhörande analys och diskussion, presenteras nedan.

#### 4.1.1 Matningsfrekvens

Gasutflödet från förgasaren ska, via ett antal processer, metaniseras till metangas. För att efterkommande delsteg i metaniseringsprocessen ska kunna erhålla så konstant tillflöde som möjligt är det önskvärt att utflödet från förgasaren är relativt konstant. En undersökning kring huruvida detta är möjligt att åstadkomma gjordes genom att använda data från experiment på en förgasare. Efter behandling av dessa data kunde det ses att ett konstant flöde ut från förgasen erhöles då en bränslebit á 0.6 g matades in var 10:e sekund. Då matning av bränsle till förgasaren ska ske manuellt ansågs var 10:e sekund orimligt, varför en matningsfrekvens på var 30:e sekund bestämdes vara tillräcklig. Däremot är denna matningsfrekvens ej anpassad efter önskat utflöde av metan från hela processen, vilket var 1 l/h med ett tryck på 70 bar.

Matningsfrekvensen undersöktes dessutom via molbalanser över hela metanproduktionen, se Figur 1. Detta resulterade i en bränslematning på var 26:e sekund för att erhålla ett flöde av 1 l/h metan trycksatt till 70 bar, vilket stämmer överens med den matningsfrekvens som erhöles från förgasningsexperimenten.

Då bränslematningsfrekvensen beräknades med hjälp av molbalanser gjordes ett antal förenklingar av systemet, bland annat att allt kol i bränslet återfinns i antingen utgående koldioxid eller i metan. Det antogs även att verkningsgraden för hela processen var 1, alltså att inget går förlorat längs vägen. Dessa är väldigt grova uppskattningar av verkligheten, och för att erhålla en verklig matningsfrekvens med hjälp av molbalanser behöver dessa ses över. Dock kan detta värde användas som en riktlinje, men tiden att bilda önskad mängd metan kan troligtvis bli längre.

Genom att beräkna matningsfrekvensen från ett experiment på en liknande förgasare

som den framtagna fås värdefull information om hur den tillverkade förgasaren kommer fungera. För att bestämma en optimal matningsfrekvens hade den tillverkade förgasaren behövts undersökas vidare, alltså utföra liknande experiment på denna där utflöden analyseras i en analysator.

För att tillverka metan under en längre tid hade en automatisk matning behövts tas fram. Att manuellt tillsätta en bränslebit ett par gånger per minut tar mycket arbetstid och är slitsamt för operatören.

#### 4.1.2 Driftförhållanden

För att undersöka temperaturens inverkan på förgasningsförloppet utfördes förgasningsexperiment. Resultaten av dessa tyder på att ett större utflöde av kolmonoxid, vätgas och metan erhålls vid högre temperaturer. Den högsta testade temperaturen var 920 °C, vilken gav det största flödet ut av kolmonoxid och vätgas. Resultatet tros även stämma för den byggda förgasaren, varför den mest gynnsamma temperaturen bestämdes vara runt 920 °C. I förgasningsexperimentet tilläts förgasningen ske under atmosfärstryck, vilket tros vara ett gynnsamt tryck för den byggda förgasaren.

Eftersom den högsta temperaturen var den som gav högst utbyte hade det varit av intresse att studera förgasningsförloppet vid högre temperaturer och hur utbytet då förändras. Materialet som förgasaren är byggt av tål temperaturer upp till 1150 °C, alltså hade högre temperaturer kunnat användas. Dock hade detta begränsats av kapacitet och tillgång på ugnar samt ur en energieffektivitetssynpunkt.

För att erhålla en fluidiserad bädd beräknades det att gastillflödet minst bör vara 0.3 Nl/min och högst 113 Nl/min. Vid experiment på befintlig förgasare var de undersökta gastillflödena 0.5 l/min och 1.0 l/min av en blandning av vattenånga och kvävgas. Det flöde som gav högst utbyte av önskade komponenter i utflödet var 0.5 l/min, vilket troligtvis beror på att diverse gaser får en längre uppehållstid i förgasaren och således får mer tid att reagera till de önskade komponenterna. Enligt förgasningsexperimentet bör tillflödet av gas alltså vara så litet som möjligt, dock ej lägre än minsta fluidiseringshastigheten. Ytterligare beräkningar på gastillflödet utfördes med hjälp av molbalanser över förgasaren. Dessa beräkningar visar att det krävs ett tillflöde på 7.65 l/min för att förgasa 0.14 kg barkpellets per timme. Även detta värde ligger inom det beräknade intervallet för fluidisering.

De teoretiskt framtagna värdena för fluidiseringshastigheterna har ej testat experimentellt på den tillverkade förgasaren. Dessutom är beräkningarna grundade på diverse antaganden, så som att det inte fanns tillgång till en formfaktor för sandpartiklarna, vilket resulterade i en uppskattning av denna. Visserligen ansattes en formfaktor som gav det minst gynnsamma fallet, dock hade en korrekt formfaktor krävts för att dessa beräkningar skulle kunna vara fullständigt representativa. Det är alltså inte säkert att det lägsta värdet räcker för att fluidisera bädden, och detta hade behövts verifieras med hjälp av test på förgasaren. Förgasningsexperimentens resultat tyder på att en lägre hastighet på gasinflödet ger högre utbyte. Detta bör dock hållas i beaktning och tillflödet får ej vara lägre än den minsta fluidiseringshastigheten. De molbalanser som användes för att beräkna gastillflödet är också grundade på antaganden. Det antogs att utbytet av kol var ett, det vill säga att allt kol i bränslet återfanns som kolmonoxid, koldioxid och metan.

Detta antagande är en grov uppskattning av det verkliga fallet, eftersom det bildas andra kolväten under förgasningsförloppet. Det framtagna värdet bör alltså endast ses som en ungefärlig siffra.

Det har även undersökts vilken sammansättning gastillflödet bör ha. Vid förgasningsexperiment, där blompinnar användes som bränsle, undersöktes utbytet av syntesgas då sammansättningen var 20 % vattenånga med 80 % kvävgas, respektive 40 % vattenånga med 60 % kvävgas. Den gassammansättning som gav högst utbyte var då gastillflödet bestod av 20 % vattenånga. Dessa resultat anses även gälla för den framtagna förgasaren då barkpellets används som bränsle.

Resultatet att en lägre koncentration vattenånga ger ett högre utbyte stämmer ej överens med Reaktion IV, ty denna kräver vatten för att bilda kolmonoxid och vätgas. Dessa resultat tyder på att förgasningsexperimenten kan ha haft brister. Framförallt tros behandlingen av denna data ha påverkat resultatet. Vid databehandlingen fanns det svårigheter att avgöra när enskild bränslepartikel hade förgasats fullständigt, vilket påverkade de framtagna koncentrationerna från varje bränslebit. Data från dessa experiment bör alltså användas med försiktighet. Även om deras trender kan användas bör de analyseras djupare och inte tas som absoluta sanningar. För att avgöra vilken gassammansättning som är mest optimal hade den tillverkade förgasaren behövt testas med olika tillflöden, och först då kan slutsatser dras om den mest fördelaktiga gassammansättningen på tillflödet.

En fråga som diskuterats under projektets gång har även varit att blanda vattenångan med koldioxid istället för kvävgas. Detta då kvävgas inte är lätt att separera i senare processteg, medan koldioxid ändå kommer bildas i förgasaren och i senare steg. Koldioxidavskiljning är således en del som redan finns med i processchemat. Om mer tid funnits hade detta varit en fråga värd att analyseras mer djupgående.

### 4.1.3 Uppehållstid

Uppehållstiden för en bränslepartikel i förgasaren är en viktig designparameter då förgasarens dimensioner ska bestämmas. Uppehållstiden beräknades teoretiskt, enligt Avsnitt 3.6, till 10.6 och 9.1 minuter vid 700 respektive 900 °C. I förgasningsexperimenten som utfördes på en befintlig förgasare, se Avsnitt 3.2, erhöles olika uppehållstider för olika driftförhållanden. När förgasningstemperaturen var 820 °C erhöles en genomsnittlig uppehållstid på 24.1 minuter. Med 870 °C respektive 920 °C erhöles en genomsnittlig uppehållstid på 11.9 samt 9.7 minuter.

Genom att jämföra de framtagna uppehållstiderna kan det ses att den teoretiskt beräknade uppehållstiden vid 900 °C ligger mellan de experimentellt bestämda vid 870 °C och 920 °C. Detta tyder på att de antaganden de teoretiska beräkningarna baseras på troligtvis är giltiga vid dessa höga temperaturer. Däremot visar jämförelse av de två metoderna att de teoretiska antagandena vid lägre temperaturer inte överensstämmer med förgasningsexperimentens resultat. Det är inte troligt att det tar längre tid att förgasa vid 870 °C respektive 820 °C än vid 700 °C. Detta tyder på att både teoretiska och experimentella värden behövs då uppehållstiden ska uppskattas, ty båda har inneboende brister.

De uppehållstider som erhöles från förgasningsexperimenten gäller för blompinnar, då dessa användes som bränsle. Resultaten från TGA-experimenten visar dels att blompin-

nen innehöll mer flykt än barkpellets och dels att koksförbränningen tog längre tid för barkpellets. Detta tyder således på att barkpellets behöver en längre uppehållstid än blom-pinnarna för att uppnå ett fullständigt förgasningsförlopp. Denna aspekt bör beaktas då uppehållstiderna från förgasningsexperimenten ska användas i beräkningar, till exempel de för diameterintervallet. Visserligen användes dessa uppehållstider endast för att få en indikation på vilket intervall förgasarens innerdiameter bör vara inom. Den slutgiltiga innerdiametern hade praktiska begränsningar, i tillgänglighet på rör, varför brister i bestämning av uppehållstiden inte tros ha påverkat förgasarens slutgiltiga dimensionering avsevärt.

#### **4.1.4 Energiförbrukning**

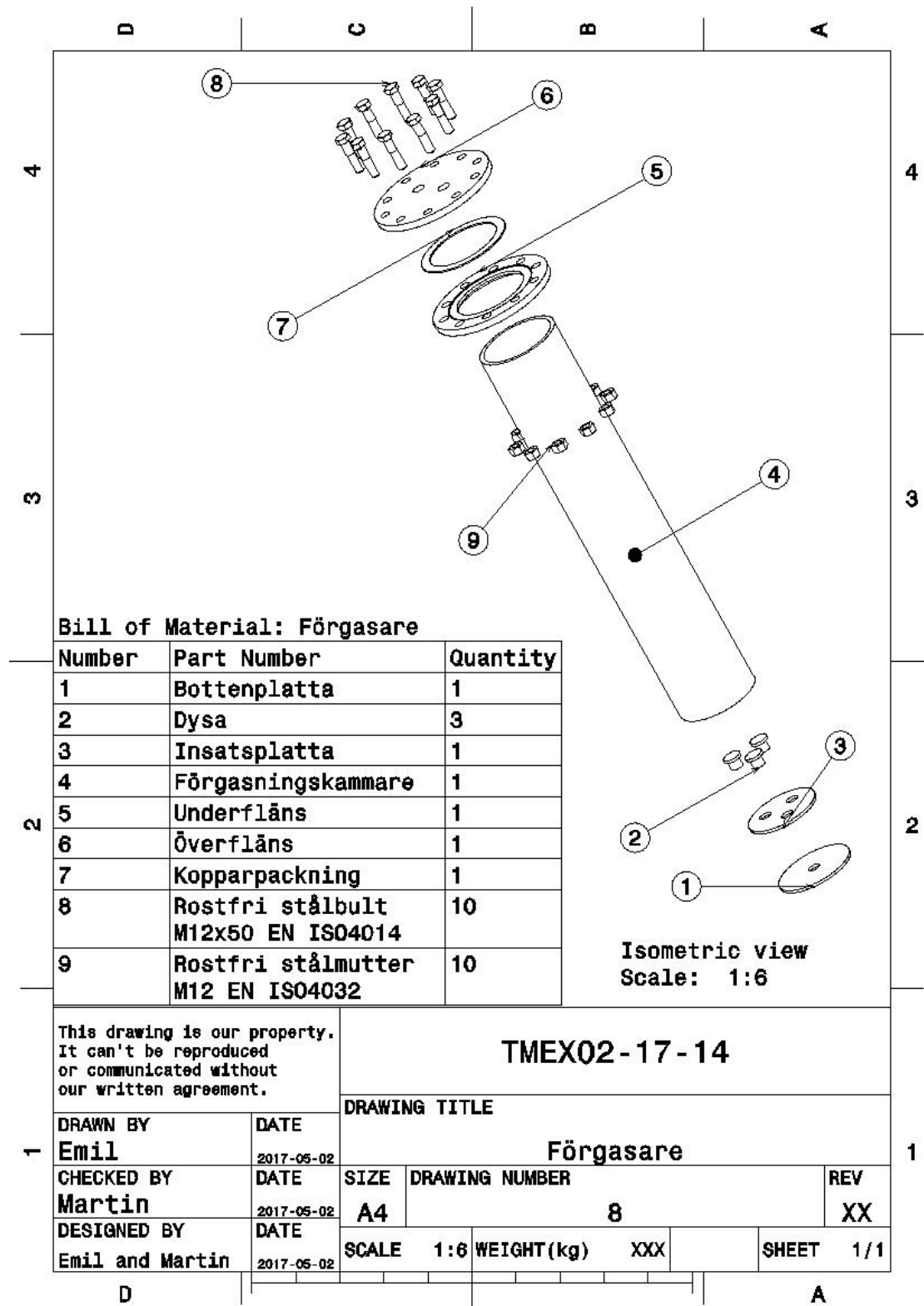
Energiförbrukning modellerades för att få en uppfattning om hur kraftig ugn som behövs och ifall processen kommer vara dyr att upprätthålla rent energimässigt. Energiförbrukning för förgasaren med isolering är förhållandevis små, vilket innebär att en ugn på 2 kW klarar av att värma förgasaren till önskad temperatur. Försummat är uppvärmning av gas, detta bidrag till energibehovet antogs vara litet i förhållande till övriga bidrag.

Det har ej undersökts hur mycket energi som tillförs/behöver tillföras vid koks-förgasningssteget. Dock är övrig energiförbrukning långt ifrån ett problematiskt värde, så detta borde inte leda till några problem.



## 4.2 Förgasardesign

Figur 11 visar den slutgiltiga designen av förgasaren. Samtliga komponenter finns beskrivna i Bilaga E.



Figur 11: Slutgiltig design av förgasaren

### 4.2.1 Praktiska avgränsningar

En av de större praktiska avgränsningarna som gjordes var att välja en diameter på förgasaren som passade ett stålrör som kunde beställas till en rimlig kostnad och leveranstid. En konsekvens av detta blir dock att förgasaren bör köras i det övre delen av temperaturintervallet, minst 900 °C, för att undvika ackumulering av biomassa inuti förgasaren, vilket får stöd av resultat i Bilaga B och uppehållstiden i Ekvation 6. Men en för hög bäddtemperatur leder till att askan agglomererar. Därför hålls temperaturen normalt under 900 °C för biomassa. Det resulterar i en avvägning mellan effektiv produktion av syntesgas och undvikande av tjärbildning.

En annan praktisk avgränsning var att den önskade arean på förstryppningarna, se Tabell 10, i botten på insatsplattan, se Figur 44, var svår att konstruera då det inte fanns någon borrhåla med en sådan liten diameter som behövdes. Valet av 1 mm borrhåla ansågs vara tillräckligt smått, men samtidigt praktiskt ur en tillverknings synpunkt. För att uppnå önskat tryckfall i dessa förstryppningshål, med det önskade gasflödet vid normala driftförhållanden, hade hålen behövt vara något mindre. Önskat tryckfall kan dock uppnås trots denna praktiska begränsning genom att öka gasflödet, eller justera bäddmaterialets höjd i förgasaren.

Valet av en kopparpackning i flänsförbandet, se Figur 11, grundar sig på antagandet att själva flänsförbandet inte kommer att befinna sig inuti en ugn, eller i kontakt med värmeband. Detta antagande gör att det går att använda koppar som packningsmaterial, då flänsförbandet inte blir lika varmt som resten av förgasaren. Om flänsförbandet skall placeras i en ugn eller liknande, måste ett nytt packningsmaterial användas. Förslagsvis en packning av glimmer eller liknande material med hög temperaturlöslighet.

En av de stora nackdelarna med den framtagna designen, se Figur 11, är att den inte är beprövad ur fluidiseringssynpunkt och att designparametrar hämtats från litteraturkällor där majoriteten av exemplen grundar sig på stora kommersiella förgasare. Det är därför osäkert hur väl fluidiseringen kommer att fungera och hur jämn den kommer att bli.

Förgasaren färdigställdes inte under projektet då det inte fanns tid att hinna testa den, samt för att lämna utrymme till modifieringar av rörsystem och andra komponenter så att de passar en framtida testanläggning.

### 4.3 Övergripande diskussion och fortsatt arbete

Detta projekt har begränsats av ett flertal avgränsningar, där tidsramen var den dominerande faktorn i val av fokus. Projektet ger upphov till ett flertal aspekter som med fördel kan undersökas vidare.

Tidsramen för detta projekt täckte ej in test av den byggda förgasaren. Att undersöka huruvida denna faktiskt fungerar, och vid vilka driftförhållanden den levererar som bäst, är en relevant fortsättning av detta projekt.

Vidare hade en beräkning på uppskalning av förgasaren varit av värde. Det har i projektet inte studerats hur mycket denna, med dess dimensioner och driftförhållanden, hade kunnat leverera i en storskalig process. Även de ekonomiska aspekterna av storskalig pro-

duktion av metan hade vart av värde för att avgöra dess konkurrenskraft på marknaden.

Syftet med projektet var att tillverka en förgasare med uppgift att producera en viss mängd syntesgas på en viss tid. Huvudfokus lades på att undersöka uppehållstid, bränsleanalys och förgasningsprocessen. En alternativ problemformulering skulle kunna fokusera på att få till en optimal fluidisering av bäddmaterialet, som är en av de viktigaste parametrarna för att uppnå en effektiv förgasare.

Projektets komplexitet har varit en utmaning under arbetets gång. De planerade driftparametrar som förutsatts i utförda beräkningar har ändrats många gånger i takt med att de analyserats och optimerats. Som exempel kan nämnas gassammansättningen; vissa beräkningar utgår från ett förhållande på 60 % kvävgas och 40 % vattenånga då det var den planerade sammansättningen i det läget, medan exempelvis dimensioneringen av förträngningarna i botten utgick från ett inflöde på endast vattenånga då det var vad som ansågs optimalt just då. Genom att göra om vissa beräkningar utifrån bättre underbyggda antaganden hade förgasarens design och driftparametrar kunnat optimeras.

Då den byggda förgasaren endast är ett delsteg i en större process behövs ytterligare processsteg för att producera metan. Dessa steg kan utvecklas och när samtliga processsteg är framtagna kan processen sättas samman för att få en fullständig process där metan bildas från biomassa.

Vid framtagande av förgasaren i detta projekt har endast barkpellets använts som planerat bränsle. Bränsleanalysen visade att barkpellets har relativt höga andelar koks och aska och en mindre andel flykt, samt kräver en längre uppehållstid. Dessa är stora nackdelar vid förgasning. Däremot är det värdefullt att kunna använda barkpellets då bark inte är särskilt användbart inom andra områden. Vidare undersökningar av olika bränsletyper, från biomassa, och vilken som är mest fördelaktig då det gäller effektivitet och ekonomi, hade varit värdefulla resultat.



## 5 Slutsats

Under projektets gång har en förgasare designats och tillverkats. Förgasarens utformning och dimensioner baserades på experimentella tester och teoretiska beräkningar. För att erhålla betydelsefulla parametrar utfördes experiment på en befintlig förgasare. När data från dessa experiment utvärderats och bränslet analyserats, kunde uppehållstid för bränslepartiklar, gynnsamma driftförhållanden samt designparametrar för fysisk dimensionering av förgasaren tas fram. Förgasaren tillverkades men projektets tidsbegränsning ledde till att praktiska experiment inte kunde utföras för att undersöka dess prestanda. Valet att inte slutföra monteringen av förgasaren gjordes eftersom vissa detaljer, bland annat bränslematningssystemet och resterande rörkopplingar, måste anpassas efter en ugn vars design ännu inte är känd. Projektets resultat begränsades både av tidsramen samt praktiska avgränsningar.

Ur en kritisk synpunkt kan det anses att mycket vikt har lagts vid förgasningsexperiment och dess resultat. Det var bara ett fåtal experiment i en komplex process som skulle behövt mer tid och fler experiment för att styrka dess resultat. De praktiska begränsningarna i projektet har också varit av stor betydelse, då tillverkningsmässiga svårigheter och tillgång till material haft inverkan på den önskade designen av förgasaren.

Även om den framtagna förgasaren inte testades under projektets tidsram, uppfylldes syftesbeskrivningen. Förgasarens design, dimensioner och material har noga valts efter erfarenheter hämtade från förgasningsexperiment, teoretiska beräkningar och litteraturstudier. Denna gedigna grund bör resultera i en förgasare som effektivt kan producera syntesgas då den väl är monterad. Denna syntesgas kan i efterkommande processteg omvandlas till metangas som i sin tur kan driva det fordon som är Chalmers bidrag till Shell Eco-marathon. Förgasarens termiska verkningsgrad har inte undersökts, men förväntas vara betydligt lägre än för en anläggning i industriell skala. Till nästkommande kandidatprojekt kommer det finnas utrymme för att testa och optimera förgasaren samt se om den fungerar på ett tillfredsställande sätt i processen som helhet. Det är först då en ordentlig uppskattning av förgasarens termiska verkningsgrad kan göras. Eftersom den inte heller är helt monterad finns en frihet att anpassa till yttre element såsom ugn och automatiserad bränslematning.

Projektet ska även presenteras för utomstående via de två framtagna planscherna, där den ena presenterar förgasning och den andra presenterar biometan i ett samhällsperspektiv. Förhoppningsvis ska dessa, tillsammans med demonstrationsanläggningen, bidra till vidare kännedom om hur förgasningsprocessen fungerar och om biometan som en hållbar energikälla. Den fördjupade kännedomen kan bidra till en snabbare utfasning av fossila bränslen och därigenom minskad klimatpåverkan.



## Referenser

- [1] UNFCCC. Paris agreement, 2015. URL [http://unfccc.int/files/essential\\_background/convention/application/pdf/english\\_paris\\_agreement.pdf](http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf). Artikel 2.
- [2] Naturvårdsverket. Miljömål.se – begränsad klimatpåverkan, 2016. URL <http://www.miljomal.se/sv/Miljomalen/1-Begransad-klimatpaverkan/>. Citerad 2017-02-02.
- [3] Naturvårdsverket. Naturvårdsverket.se – utsläpp av växthusgaser från inrikes transporter, 2016. URL <http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-0/Vaxthusgaser-utslapp-fran-inrikes-transporter/>. Citerad 2017-02-02.
- [4] Johansson T. B. *Fossilfrihet på väg*. Statens offentliga utredningar, 2013. URL <http://www.regeringen.se/rattsdokument/statens-offentliga-utredningar/2013/12/sou-201384/>. Rapport nr. SOU 2013:84. s. 35.
- [5] Einebrant E. Anderson S. *Fakta om biogas*. 2050 Consulting AB, 2015. URL [http://www.biogasvast.se/upload/BiogasVäst/Faktaombiogas\\_150903\\_web.pdf](http://www.biogasvast.se/upload/BiogasVäst/Faktaombiogas_150903_web.pdf). Rapport framtagen på uppdrag av Västra Götalandsregionen.
- [6] Göteborg Energi AB. [goteborgenergi.se](http://www.goteborgenergi.se) – gobigas, . URL [http://www.goteborgenergi.se/Privat/Projekt\\_och\\_etableringar/GoBiGas](http://www.goteborgenergi.se/Privat/Projekt_och_etableringar/GoBiGas). Citerad 2017-02-03.
- [7] Martin Seemann, docent vid institutionen för energi och miljö Chalmers tekniska högskola, personlig kontakt.
- [8] Baylan I. *Förnybara drivmedels roll för att minska transportsektorns klimatpåverkan*. Riksdagstryckeriet, 2008. ISBN 978-91-85943-23-4. URL [https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/rapport-fran-riksdagen/fornybara-drivmedels-roll-for-att-minska\\_GVOWRFR14](https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/rapport-fran-riksdagen/fornybara-drivmedels-roll-for-att-minska_GVOWRFR14).
- [9] Lindblom A. Stenberg V. Tegehall L. Winberg K. Ferrand-Drake del Castillo G., Gustavsson A. *Produktion av metangas till Chalmers Eco-marathon*. Institutionerna för energi och miljö, kemi- och bioteknik, tillämpad mekanik vid Chalmers tekniska högskola, 2013. URL <http://studentarbeten.chalmers.se/publication/179141-produktion-av-metangas-till-chalmers-eco-marathon>.
- [10] Jörgner L. Larsson F. Möller E. Tran P. Dahlgren L., Jonsson S. *Katalytisk framställning av biogas*. Institutionen för tillämpad mekanik vid Chalmers tekniska högskola, 2014. URL <http://studentarbeten.chalmers.se/publication/203737-katalytisk-framstallning-av-biogas>.
- [11] Jobson I. Mårtensson A. Olsson E. Sandström H. Beiron J., Ekström K. *Tillverkning och analys av Water-Gas Shift-reaktor för användning inom biometanproduktion*. Institutionerna för tillämpad mekanik, energi och miljö, kemi och kemiteknik vid Chalmers tekniska högskola, 2015. URL <http://studentarbeten.chalmers.se/publication/231608-tillverkning-och-analys-av-water-gas-shift-reaktor-for-anvandning-inom-biometanproduktion>.

- [12] Ferring J. Ivarsson Bergenhem S. Jakobsen P. Winberg L. Bengtsson H., Deleskog A. *Kemisk absorption av koldioxid efter en Water-Gas Shift-reaktor*. Institutionerna för energi och miljö, tillämpad mekanik, kemi och kemiteknik vid Chalmers tekniska högskola, 2016. URL <http://studentarbeten.chalmers.se/publication/241726-kemisk-absorption-av-koldioxid-efter-en-water-gas-shift-reaktor>.
- [13] Johansson R. Åhman L.-E. Harvey S. Elmroth L. Normann F., Rydén M. *Energiteknik*. Avdelningen för energiteknik vid Chalmers tekniska högskola, 2016. s. 30-33.
- [14] Nationalencyklopedin. Förgasning, . URL <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/förgasning>. Citerad 2017-05-05.
- [15] Göteborg Energi AB. [goteborgenergi.se – biogas genom termisk förgasning och metanisering](http://gobigas.goteborgenergi.se/Svensk_version/Biogas_genom_forgasning/Termisk_forgasning_och_metanisering), . URL [http://gobigas.goteborgenergi.se/Svensk\\_version/Biogas\\_genom\\_forgasning/Termisk\\_forgasning\\_och\\_metanisering](http://gobigas.goteborgenergi.se/Svensk_version/Biogas_genom_forgasning/Termisk_forgasning_och_metanisering). Citerad 2017-04-10.
- [16] Thunman H. *Combustion Engineering*. Institutionen för energi och miljö vid Chalmers tekniska högskola, 2016.
- [17] Niklasson K. *Förgasning av biomassa*. Fakulteten för hälsa, natur- och teknikvetenskap vid Karlstads universitet, 2013. URL <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:634152/FULLTEXT01.pdf>. s. 5.
- [18] Wilson R.E. Rorrer G.L. Welty J.M., Wicks C.E. *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons Inc., sixth edition, 2015. ISBN 978-0470128688.
- [19] Basu P. *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*. Taylor & Francis Group, LLC, 2006. ISBN 978-0-8493-3396-5.
- [20] Nationalencyklopedin. Fluidisering, . URL <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/fluidisering>. Citerad 2017-04-19.
- [21] Brenner H. Kunii D., Levenspiel O. *Fluidization Engineering*. Elsevier Inc., 1991. ISBN 978-0-08-050664-7.
- [22] Rosenfeld D. C. *Design and construction of an experimental setup to measure the impact of alkali metals on gasification*. Institutionen för energi och miljö vid Chalmers tekniska högskola, 2017.
- [23] Bo G. Leckner, professor vid institutionen för energi och miljö vid Chalmers tekniska högskola. Intervju 3 april 2017.
- [24] Lira C. T. Elliot J. R. *Introductory Chemical Engineering Thermodynamics*. Pearson, second edition, 2012. ISBN 978-0-13-275624-2.
- [25] Dansk Gasteknisk Center. Kompressibilitetsfaktor. URL <http://www.dgc.dk/kompressibilitetsfaktor>. Citerad 2017-01-26.
- [26] Alberto Alamia. *Large-Scale Production and Use of Biomethane*. PhD thesis, Chalmers tekniska högskola, The address of the publisher, 7 2016. s.42.



- [27] Sandvik AB. sandvik.com – sandvik 253-ma, 2017. URL <http://smt.sandvik.com/en/materials-center/material-datasheets/tube-and-pipe-seamless/sandvik-253-ma/>. Citerad 2017-04-21.
- [28] Oumer A. N. Shukrie A. Air distributor designs for fluidized bed combustors: A review. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 6(3):1029–1034, 2016. URL <http://etasr.com/index.php/ETASR/article/viewFile/688/350>.
- [29] Opta Minerals Inc. optaminerals.com – olivine sand. URL <http://www.optaminerals.com/Foundry/Olivine-Sand.html>. Citerad 2017-04-25.



# Bilagor

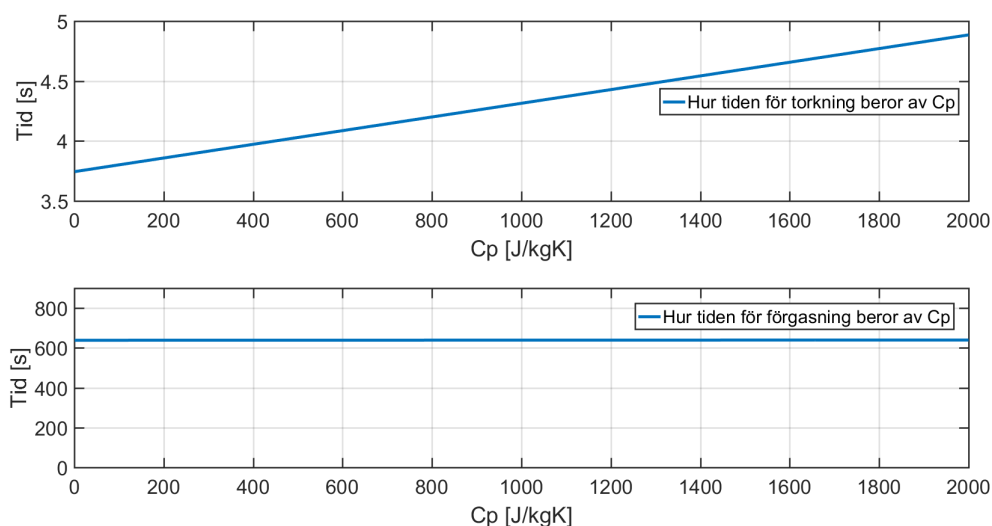
## A Uppehållstid i förgasaren

För att beräkna den totala uppehållstiden en bränslepartikel behöver befinna sig i förgasaren behöver tiden för förgasningsförloppens delsteg beräknas. De tre delstegen är torkning, avgasning och koks förgasning. Tillvägagångssättet för att beräkna tiden för dessa presenteras nedan.

### A.1 Känslighetsanalys av bränsleparametrar

Då uppehållstiden ska modelleras krävs det att vissa av bränslets parametrar är kända. För att undersöka en parameters inverkan varierades parametern och plottades mot total uppehållstid.

Värmekapaciteten spelar in under förbränningens första fas, torkning. Värmekapaciteten hos barkpelletsen förväntades vara ungefär samma som hos trä,  $1000 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ . Värdet varierades mellan 0 och 2000, för att få god marginal och plottades i Figur 12.



Figur 12: Visar hur tiden för torkning, respektive förgasning, av en barkpellets beror av pelletsens värmekapacitet

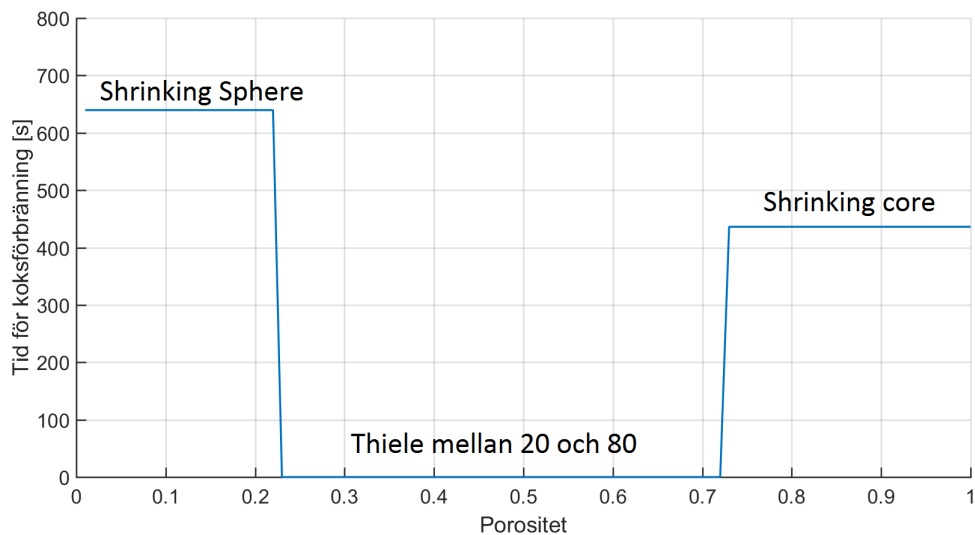
Tiden för torkning skiljer sig med 0.7256 sekunder om värmekapaciteten,  $c_p$ , är  $500 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  jämfört med  $2000 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , vilket innebär att  $c_p$  har relativt stor inverkan på torkningstiden. Dock är tiden för torkning väldigt liten i förhållande till de andra faserna i förgasning, vilket tydliggörs i den nedre grafen i Figur 12. Detta innebär att fel som kan uppstå av antagandet att barkpelletsen har samma värmekapacitet som trä går att försumma.

Då tid för koks förgasning skulle beräknas var det problematiskt att veta vilken av modellerna, ”Shrinking density regime”, ”Shrinking core/sphere regime” och ”Shrinking sphere restricted by mass transfer” som skulle användas för att approximera bränslepartikeln.

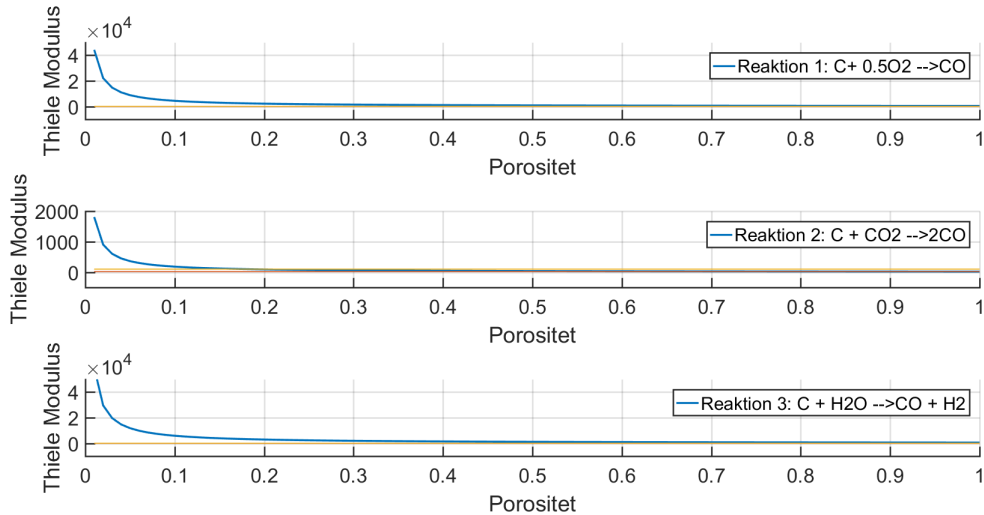
Thiele modulen undersöktes och erhöll ett värde mycket större än 1 för Reaktionerna I och IV, vilket tydde på att approximationen 'Shrinking sphere restricted by mass transfer' skulle användas. Värdet på Thiele modulen för Reaktion III var dock inom ett osäkert intervall, varför en känslighetsanalys av kokspartikelns porositet var av intresse då denna var en uppskattad parameter.

Tiden för förgasningens tredje fas, koks förgasning, beror på kokspartikelns porositet. För att avgöra hur stor inverkan detta har gjordes liknande plot som för värmekapaciteten, där porositeten varierades mellan 0 och 1 och plottades mot totala tiden, samt för alla de tre intressanta förgasningsreaktionernas Thiele modul.

Figur 13 visar hur den totala tiden för förgasning varierar med kokspartikelns porositet, och Figur 14 visar hur tre huvudsakliga förgasningsreaktioners (I, III och IV) Thiele modul variera med porositeten. Dessutom är värdet 25 och 80 markerat med varsin linje, ty dessa var gränserna som ansågs som höga eller låga.



Figur 13: Visar hur tiden för förbränning beror av koksens porositet, total tid är satt till 0 för de värden på Thiele Modulen som var svårtolkade.



Figur 14: Visar hur Thiele modulen beror av koksens porositet för 3 viktiga förgasningsreaktioner.

Från Figur 14 kan det avläsas att reaktion 2 i grafen riskerar att ha en Thiele modul under det värde som ansågs högt. Detta innebär att olika porositeter kommer att ge olika uppehållstider, vilket i sin tur innebär att noggrannare uppmätning av kokspartikelns porositet skulle behöva göras. Dock kan koksens porositet antas vara lägre än 0.24, som enligt Figur 13 är en kritisk gräns. Detta antagandet bygger på att barkpellets tillverkas genom att pressa samman bark, vilket innebär att porositeten blir låg. En enkel jämförelse mellan densiteten för pelletsen och standarddensiteten och porositeten för bark ger belägg för detta antagande.

Sammanfattningsvis kan barkpelletsens värmekapacitets avvikelse från träs värmekapacitet försummas, och porositeten bedöms vara tillräckligt låg för att inte ge stora fel på val av modeller.

## A.2 Tid för torkning

Det första steget i ett förgasningsförlopp är förångning av bunden fukt inuti bränslepartikeln. Genom att påföra värme dels genom en strömmande fluid och dels genom en värmekälla kan fukten förångas. Från den strömmande fluiden till bränslepartikeln sker värmetransport via konvektion. [16, Kap. 9] För att kunna beräkna denna värmetransport krävs kännedom om Nusselts tal, vilken kan beräknas enligt Ekvation 38

$$Nu = cRe^m Pr^n \quad (38)$$

där  $Re$  är Reynolds tal,  $Pr$  är Prandtls tal,  $c$ ,  $m$  och  $n$  är tabulerade konstanter som bestäms utifrån Reynolds tal. Reynolds tal kan bestämmas med hjälp av Ekvation 39

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (39)$$

där  $\rho$  är densiteten,  $v$  är hastigheten,  $\mu$  är den dynamiska viskositeten av den omgivande fluiden och  $d$  är diametern av partikeln. Med hjälp av Ekvation 38 och 39 kan den

konvektiva värmetransportskoefficienten,  $h_c$ , bestämmas med Ekvation 40

$$h_c = \frac{Nu \cdot k}{d} \quad (40)$$

där  $k$  är den konduktiva värmetransportkoefficienten för den omgivande fluiden. [16, Kap.9]

Från den installerade värmekällan sker värmetransport till bränslepartikeln via strålning. För att beräkna värmetransportkoefficienten för strålning,  $h_{rad}$ , används Ekvation 41 under antagandet att omgivningens temperatur är densamma som den strömmande fluidens temperatur samt att ingen gas strömmar ut från partikeln.

$$h_{rad} = \varepsilon\sigma(T_\infty^2 + T^2)(T_\infty + T) \quad (41)$$

där  $\varepsilon$  är emissiviteten för bränslet,  $\sigma$  Stefan–Boltzmanns konstant,  $T_\infty$  omgivningens temperatur och  $T$  yttemperaturen på bränslet.[16, Kap. 9]

Med hjälp av värmetransportkoefficienterna beräknade med Ekvation 38- 41 kan torktiden beräknas enligt Ekvation 42

$$t_{torkning} = -\frac{(m_m C_{p,m} + m_{df} C_{p,df})}{Ah_{c,eff}} \ln\left(\frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_0}\right) + \frac{m_m H_m}{Ah_{c,eff}(T_\infty - T)} \quad (42)$$

där  $m_m$  och  $m_{df}$  är massan fukt respektive torr substans i bränslet,  $C_{p,m}$  och  $C_{p,df}$  värmekapaciteten för fukt respektive torr substans i bränslet,  $A$  arean på bränslepartikeln,  $h_{c,eff}$  summan av värmetransportkoefficienten för strålning respektive konvektion och  $T_0$  den initiala temperaturen hos bränslet.[16]

### A.3 Tid för avgasning

Det andra steget i ett förgasningsförlopp är avgasning, i vilken flyktiga ämnen lämnar bränslepartikeln. Detta är en komplicerad process med ett flertal reaktioner med tillhörande kinetik. En approximation av avgasningstiden kan göras med hjälp av med Ekvation 43, vilken motsvarar en första ordningens kemiska reaktion [16, Kap. 9].

$$\frac{dm_v}{dt} = -m_v R_v \quad (43)$$

Där  $R_v$  är reaktionshastigheten som antas vara konstant,  $t$  tiden och  $m_v$  de flyktiga komponenternas massa, det vill säga bränslets massa minus massan av fukt, aska och koks i bränslet.  $R_v$  kan bestämmas enligt Ekvation 44

$$R_v = k_{rv,0} \exp\left(-\frac{E}{RT_\infty}\right) \quad (44)$$

där  $T_p$  är omgivningens temperatur,  $\frac{E}{R}$  och  $k_{rv,0}$  materialegenskaper. [16, Kap. 9]

För att avgöra om fenomenet styrs av reaktionshastighet eller av hastigheten för värmetransport krävs kännedom om Damköhler talet. Damköhlers tal är kvoten mellan den kemiska reaktionshastigheten och hastigheten för värmetransport, enligt Ekvation 45

$$\frac{1}{Da} = \frac{Ah_{c,eff}}{V \rho_{df} c_{p,df} k_{rv,0} \exp\left(-\frac{E}{RT_p}\right)} \quad (45)$$

där indexet  $df$  står för dry fuel,  $V$  är partikelns volym,  $\rho$  partikelns densitet,  $C_p$  partikelns värmekapacitet. Om Damköhler-talet är mycket mindre än 1 begränsas avgasningen av kinetik, och tiden för avgasning av partikeln kan bestämmas med Ekvation 46

$$t_{avgasning} = \frac{-\ln\left(\frac{m-m_c-m_a}{m_{df}-m_c-m_a}\right)}{R_v} \quad (46)$$

där  $m$  är den avgasande partikelns massa,  $m_a$  massan för askan och  $m_c$  massan för koksen i bränslepartikeln.

Om Damköhler-talet däremot är mycket större än 1 så är det hastigheten för värmetransport som begränsar avgasningen. Tiden kan då bestämmas med Ekvation 47

$$t_{avgasning} = \frac{m_{df}C_{p,df}}{Ah_{c,eff}} \ln\left(\frac{T_\infty - T_v}{T_\infty - T_0}\right) \quad (47)$$

där  $T_v$  är avgasningstemperaturen, som beräknas enligt Ekvation 48 [16]

$$T_{avgasning} = \left(-\ln\left(\frac{Ah_{c,eff}}{V\rho_{df}C_{p,df}k_{rv,0}}\right)\frac{R}{E}\right)^{-1} \quad (48)$$

## A.4 Tid för koks-förgasning

Det sista steget i förgasningsförloppet är koks-förgasning i vilken vattenånga diffunderar in i bränslepartikeln och ett flertal reaktioner sker. Den tid det tar för koksen att förgasas kan beräknas med tre olika modeller beroende på koncentration syre i omgivningen, temperaturen på den strömmande fluiden, bränslets storlek och porositeten hos koksen. De tre olika modellerna är; "Shrinking density regime", "Shrinking core/sphere regime" och "Shrinking sphere restricted by mass transfer".

"Shrinking density regime" är en modell där partikeln antas behålla sin volym men densiteten minskar det vill säga att storleken på partikeln är densamma men porositeten ökar. "Shrinking core/sphere regime" och "Shrinking sphere restricted by mass transfer" utgår från att partikeln krymper under koks-förgasningsförloppet. [16, Kap. 9]

För att avgöra vilken av dessa modeller som är lämplig för det undersökta fallet kan Thiele modulen,  $Th$ , användas enligt Ekvation 49, vilken tar hänsyn till hur reaktanter fördelas i bränslepartikeln.

$$Th = r_0 \sqrt{\frac{R_{C,O_2}}{D_{AB,eff}}} \quad (49)$$

Där  $r_0$  är den initiala radien på bränslepartikeln,  $R_{C,O_2}$  den inneboende reaktionshastigheten för en första ordningens reaktion och  $D_{AB,eff}$  den effektiva diffusionen inuti partikeln. [16]

Erhålls ett lågt värde på Thiele modulen ska "Shrinking density regime" användas, varpå tiden för koks-förgasningen kan beräknas i enlighet med Ekvation 50

$$t_{koks-förgasning} = -\frac{m_{c,0}}{\Omega V A_{int,0} k_{rC} C_{O_2,\infty}^n M_C} \ln\left(\frac{m_C}{m_{C,0}}\right) \quad (50)$$

där  $m_{C,0}$  är den initiala massan koks,  $\Omega$  antal mol kol per mol syre,  $A_{int,0}$  arean av bränslepartikeln per volym av bränslepartikeln med hänsyn till att densiteten minskar,  $k_{rC}$  en reaktionskonstant för den inneboende reaktionshastigheten,  $C_{O_2,\infty}$  koncentration syre i omgivningen,  $n$  reaktionsordningen och  $M_C$  molmassan för kol. [16, Kap. 9]

Om ett högt värde på Thiele modulen erhålls ska antingen "Shrinking core/sphere regime" eller "Shrinking sphere restricted by mass transfer" användas. Tiden för koksförgasning med modellen "Shrinking core/sphere regime" kan fås genom Ekvation 51.

$$\rho \frac{dV}{dt} = -\Omega A k_{rC} C_{O_2,\infty}^m M_C \quad (51)$$

Då värdet på Thiele modulen är högt och det är nödvändigt att ta hänsyn till masstransportens inverkan kan "Shrinking sphere restricted by mass transfer" användas, varav tiden för koksförgasning kan erhållas med Ekvation 52

$$t_{koks\text{förgasning}} = \frac{\rho_C d_i^2}{8\Omega D_{AB} C_{O_2,\infty} M_C} \quad (52)$$

där  $\rho_C$  är densiteten för koks och  $d_i$  den initiala diametern hos bränslepartikeln. [16, Kap. 9]



## B Förgasningsexperiment

Litteraturstudier visar på att temperatur, storlek på bränslepartiklar samt koncentration av vattenånga är viktiga parametrar för att få ett önskvärt förgasningsförlopp. För att undersöka betydelsen av dessa parametrar utfördes experiment på en befintlig förgasare. Syftet med detta var att undersöka vilka förgasningsförhållanden som gav mest kolmonoxid och vätgas per gram bränsle, samt hur ofta bränsle ska tillsättas till förgasaren.

### B.1 Metod förgasningsexperiment

För att kunna erhålla relevant data på ett tidseffektivt sätt upprättades en försöksplanering som försöken grundades på. I experimenten användes en förgasare, som visas i Figur 15, på avdelningen för oorganisk miljökemi på Chalmers Tekniska Högskola.



Figur 15: Förgasare på avdelningen för oorganisk miljökemi på Chalmers tekniska högskola

I toppen av förgasaren i Figur 15 matas bränsle in. För att säkerställa att bränslebiten når reaktorn samt att ingen gas läcker ut från matningshålet används kvävgas matad från toppen. Kvävgasen är inert, vilket betyder att dess närvaro ej påverkar förgasningsförloppet. Den gas som bildas under förgasningsförloppet tas ut över topp och förs vidare in till en vattenfälla där vattenånga avskiljs från gasen. Den resterande gasen passerar sedan genom en analysator där sammansättning av kolmonoxid, koldioxid, metan och vätgas mäts. Reaktorn är placerad i en ugn där önskad temperatur kan ställas in. Förgasaren i Figur 15 är konstruerad med en gasmatning underifrån, i vilken vattenånga och kvävgas matas in för att skapa en fluidiserad bädd inuti reaktorn.

Inledningsvis kalibrerades analysatorn. Under kalibreringen kunde det ses att mätningar för vätgas ej överensstämde med känd tillförd koncentration. Analysatorn mäter halten vätgas genom att mäta dess värmeledningsförmåga relativt kvävgas. Ämnen som analysatorn inte mäter tolkas dock som vätgas, vilket leder till att halt vätgas som mäts inte är tillförlitlig.

Barkpelletsen, som var det i projektet undersökta bränslet, hade en diameter som var större än diametern på matningsingången. Detta problem ledde till att barkpelletsen fick ersättas med blomspinnarna som visas i Figur 16. Trots att blomsterpinnar inte är det



Figur 16: Blomspinnar i olika storlekar som användes under experiment

bränsle som kommer användas i den framtagna förgasaren anses de trender som uppvisas för blomsterpinnen även gälla för barkpellets.

En blompinne fördes ner i matningsingången på förgasaren i Figur 15, varpå ett tidtagarur startades och halter av kolmonoxid, koldioxid, metan och vätgas kunde studeras på en dator. Då halter av kolmonoxid, koldioxid och metan hade sjunkit till en försumbar nivå stoppades tidtagaruret och tiden noterades. Detta upprepades under 19 experiment i vilka temperatur, bränslestorlek, koncentration vattenånga i det ingående flödet samt flödes hastigheten av vattenånga och kvävgas varierades. Parametrarna tilläts variera enligt försöksplaneringen i Tabell 11.

Tabell 11: Visar hur parametrarna temperatur, bränslestorlek samt flödes hastighet varierades under experimenten

Parameter	-1	0	+1
Temperatur [°C]	820	870	920
Bränslestorlek [cm]	1.5	2.25	3
Halt vatten i tillflöde [%-vatten]	20	40	Testades ej
Flödes hastighet av vatten i tillflöde [ml/min]	200	400	Testades ej

Gasmätningen är trovärdig för koncentrationsmätning av kolmonoxid, koldioxid och metan, men ej för vätgas. Analysatorns värden för vätgasen kan endast användas för att studera skillnader och trender, men mängd vätgas kan ej tillförlitligt avläsas från denna.

Det är önskvärt att ha ett högt flöde av kolmonoxid och vätgas ut från förgasaren då det är denna gas som sedan ska användas vid tillverkning av metangas. Eftersom mängd vätgas inte är tillförlitlig jämfördes flödet av kolmonoxid och koldioxid ut från förgasaren vid de olika förgasningsförhållandena. Dessa värden används sedan för att optimera förgasarens design och driftförhållanden så att det bildas så mycket kolmonoxid och vätgas som möjligt. Bildandet av metan i förgasaren ansågs vara positiv, men inget som förgasaren designas efter. Därför har dessa värden inte undersökts vidare.

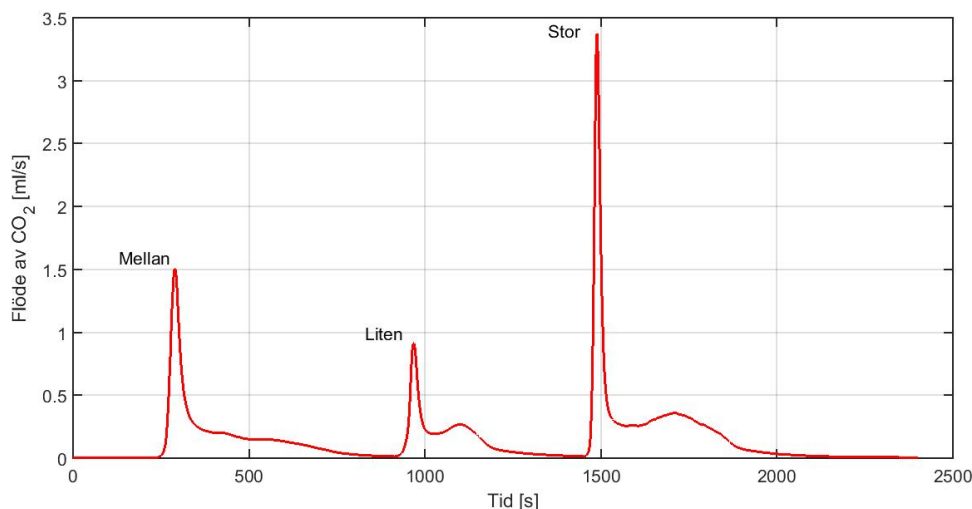
## B.2 Resultat och analys av förgasningsexperiment

Ett flertal experiment utfördes på den befintliga förgasaren. Försöksplaneringen som användes presenteras i Tabell 12.

Tabell 12: Utförda förgasningsexperiment där  $x_1$  är bränslestorlek,  $x_2$  temperatur,  $x_3$  halt av vatten i tillflöde och  $x_4$  flödeshastighet av vatten i tillflödet.

Försök	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
1	-1	0	0	0
2	+1	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	-1	0	0
6	-1	-1	0	0
7	+1	-1	0	0
8	0	-1	0	0
9	0	+1	0	0
10	-1	+1	0	0
11	+1	+1	0	0
12	0	+1	0	0
13	+1	+1	-1	0
14	-1	+1	-1	0
15	0	+1	-1	0
16	0	+1	-1	0
17	+1	+1	0	-1
18	-1	+1	0	-1
19	0	+1	0	-1
20	0	+1	0	-1

Data erhållen från förgasningsexperimenten kunde med hjälp av MATLAB plottas så som den i Figur 17, där koncentration av koldioxid är plottad mot tid. Liknande grafer togs fram för samtliga ämnen och förgasningsförhållanden då dessa undersöktes.



Figur 17: Koncentration av koldioxid i utflöde vid tre olika matingsfrekvenser.

Grafen i Figur 17 visar tidsförloppet under vilket tre olika stora bränslebitar tillsattes till förgasaren. Storlekskillnaden kan ur grafen avläsas, där den högsta toppen representerar den största bränslebiten och den lägsta toppen den minsta bränslebiten. Genom att integrera varje kurva kan den totala mängden koldioxid per bit erhållas.

Nedan presenteras de undersökningar som gjordes för optimering av förgasningstemperatur, vattenflöde, bränslestorlek och bärnslematningsfrekvens. Erhållen mängd av varje ämne togs fram på samma vis som för exemplet med koldioxid ovan.

### B.2.1 Förgasningstemperatur

En avgörande parameter vid förgasning är temperaturen. Tre olika temperaturer, 820 °C, 870 °C och 920 °C testades, vilka gav varierande gasflöde och sammansättning. Genom att ta fram ett medelvärde av ml gas per gram bränsle för tre olika bränslestorlekar erhöles värden i Tabell 13. Dessa data är tagna från experiment utförda med 40 % vattenånga samt med 400 ml vattenånga per minut i inflödet.

Tabell 13: Förgasningstemperatur och erhållen mängd gas då 40% vattenånga användes i tillflödet.

Parameter	820 [°C]	870[°C]	920 [°C]
$CO$ [ml/g]	141	183	281
$CO_2$ [ml/g]	207	258	317
$H_2$ [ml/g]	371	475	596
$CH_4$ [ml/g]	89	93	152

Vid jämförelse av värden i Tabell 13 kan det tydligt avläsas att mängd kolmonoxid per gram bränsle ökar med ökande temperatur. En ökning på 100°C gav en nästintill dubbelrad mängd kolmonoxid. Temperaturökning ledde även till en ökad mängd koldioxid och vätgas. Varje bränslebit ger alltså mer kolmonoxid och vätgas per gram bränsle vid högre temperaturer, varför den mest gynnsamma, undersökta temperaturen anses vara 920 °C.

### B.2.2 Gastillflöde

Genom att variera halten av vattenånga i inflödet erhöles värden i Tabell 14. Dessa erhöles genom att ta ett medelvärde av erhöles ml gas per gram bränsle för tre bränslebitar vid 920 °C med varierande vattenflöde.

Tabell 14: Halt vattenånga och erhöles mängd kolmonoxid, koldioxid, vätgas och metan.

Parameter	20% vatten	40% vatten
$CO$ [ml/g]	341	281
$CO_2$ [ml/g]	330	317
$H_2$ [ml/g]	605	596
$CH_4$ [ml/g]	170	152

Värden erhöles i Tabell 14 visar att en lägre koncentration vatten leder till högre koncentration av både kolmonoxid och koldioxid. Trots att den senare inte är en önskvärd produkt ansågs ett lägre vattenflöde vara optimalt, ty ökningen av kolmonoxid var större än ökningen av koldioxid.

Vidare undersöktes det vilket totalflöde av vatten och kvävgas som gav högst koncentration av kolmonoxid och vätgas i utflödet. Dessa värden, i ml/g bränsle, togs fram på samma sätt som för då koncentrationen ändrades. Värdena är presenterade i Tabell 15

Tabell 15: Totalt samt halverat gastillflöde till förgasaren mot erhöles mängd kolmonoxid, koldioxid, vätgas och metan.

Parameter	Halverat flöde, 40 % vatten	Hela flödet, 40 % vatten
$CO$ [ml/g]	415	281
$CO_2$ [ml/g]	543	317
$H_2$ [ml/g]	212	596
$CH_4$ [ml/g]	208	152

Den koncentrationsökning som uppstod då ett halverat tillflöde av vattenånga och kvävgas användes, det vill säga 500 ml/min istället för 1000 ml/min, tros komma från den längre uppehållstiden gasen får då ett halverat flöde används. Således ansågs det mest fördelaktiga inflödet bestå av 20 % vatten och ett halverat inflöde på 500 ml/min vattenånga och kvävgas.

### B.2.3 Bränslestorlek

För att undersöka förhållandet mellan bränslestorlek och gasutflöde togs värden i Tabell 16 fram. Dessa är alla undersökta vid 920 °C och 20 % vatten i tillflödet, då dessa förhållanden ansågs vara de mest fördelaktiga.

Tabell 16: Bränslestorlek mot gasutflöde.

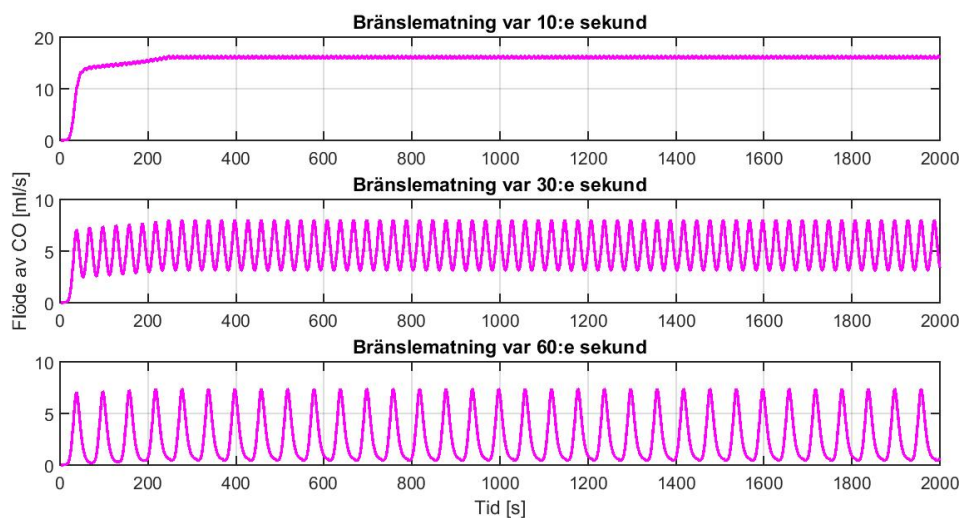
Parameter	Liten	Mellan	Stor
Vikt [g]	0.29	0.42	0.59
Area [cm <sup>2</sup> ]	2.8	4.2	5.7
CO [ml/g]	330	292	348
CO <sub>2</sub> [ml/g]	360	328	304
H <sub>2</sub> [ml/g]	649	623	543
CH <sub>4</sub> [ml/g]	196	149	165

Via jämförelse av gassammansättning och bränslestorlek i Tabell 16 kan det avläsas att skillnaderna i erhållet gasutlöde inte varierar markant vid olika bränslestorlekar, och det finns heller ingen tydlig trend mellan gasflöde och bränslestorlek. Därför anses bränslets storlek ej vara en avgörande parameter.

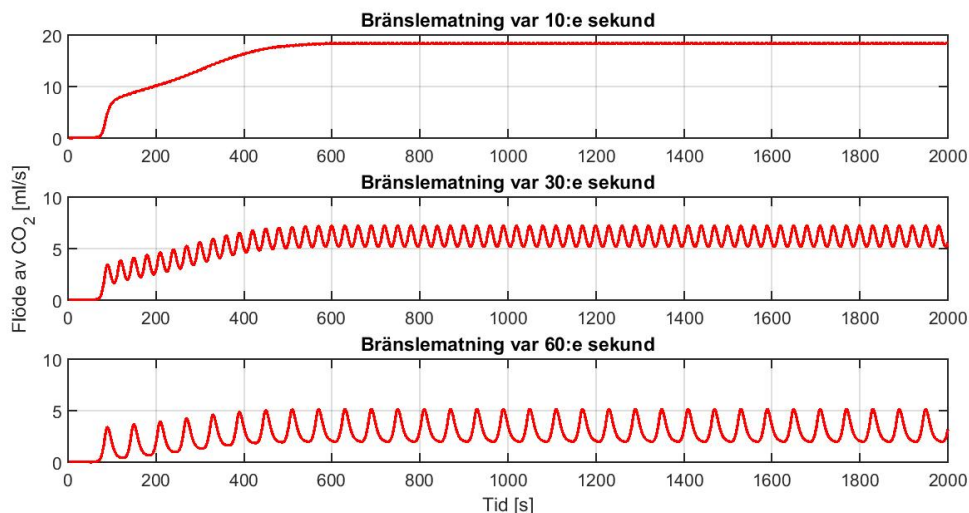
### B.2.4 Bränslematning

Det var även intressant att undersöka huruvida det är möjligt att få ett jämnt flöde av gaser ut från förgasaren. Detta kan eventuellt ha betydelse för efterföljande processteg, då dessa möjligtvis får en högre verkningsgrad med ett konstant inflöde av processgas från förgasaren. Med hjälp av data erhållen från förgasningsexperimenten kunde det undersökas hur ofta en bränslebit bör matas till förgasaren för att erhålla ett konstat flöde. Detta utfördes för en stor bit vid 920 °C och totalt vattenflöde med 40 % vatten.

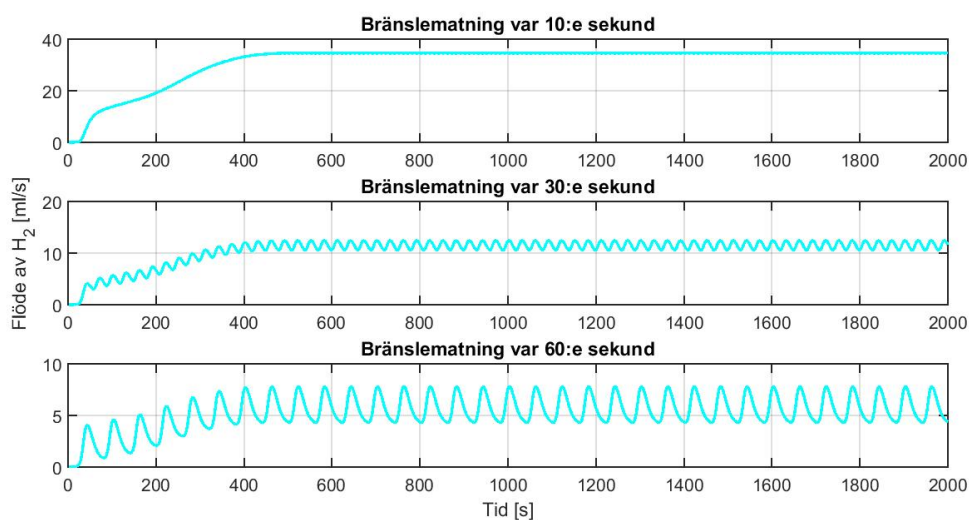
Genom att addera en koncentrationstopp, för respektive komponent, flera gånger om kunde Figurer 18-20 tas fram i MATLAB.



Figur 18: Koncentration av kolmonoxid i utflöde vid tre olika matingsfrekvenser.



Figur 19: Koncentration av koldioxid i utflöde vid tre olika matingsfrekvenser.



Figur 20: Koncentration av vätgas i utflöde vid tre olika matingsfrekvenser.

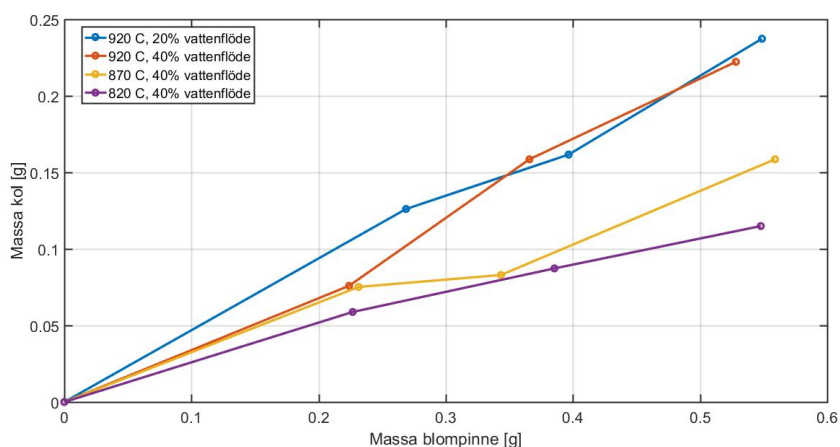
Genom att analysera Figurer 18- 20 kan det avläsas att en bränslematning var 10:e sekund gav det högsta och mest konstanta koncentrationsutlödet. Då bränslematningen till förgasaren kommer ske manuellt ansågs dock matning var 30:e sekund vara den mest optimala som även är praktiskt genomförbar. De processteg som har tagits fram av tidigare kandidatarbeten tros klara detta gasflöde.

Det kan ur Figur 18-20 även avläsas att det tar längre tid för koncentrationen av koldioxid att stabiliseras än för övriga ämnen.

Matning av bränsle var 30:e sekund innebär bränsletillförsel på 0.0708 kg/h då en stor bit används. Detta är ungefär hälften av det bränsleflöde som beräknades i Tabell 2 för barkpellets.

## B.2.5 Utbyte av kol

I förgasningsexperimenten erhöles ej en total omvandling av kolet i blompinne till koldioxid, metan och kolmonoxid. En del av kolet som inte återfanns i gasen till analysatorn återfinns troligtvis som aska eller som en annan typ av kolväte, vilken analysatorn inte kunde mäta. För att undersöka utbytet av kol i förgasningsexperimenten plottades massan kol ut från förgasaren mot massan blompinne vid de olika förgasningsförhållandena. Se Figur 21



Figur 21: Massa kol ut från förgasaren plottad mot massa blompinne som lades i under olika förgasningsförhållanden.

Genom att studera de olika grafer i Figur 21 kan det utläsas att olika förgasningsförhållanden ger olika lutningar. En konstant linjär lutning tyder på fullständig omvandling av kolet i blompinne, vilket betyder att inget kol från blompinne återfinns som andra kolväten. Enligt Figur 21 kan det avläsas att ett sådant fall ej inträffar under något av försöken, vilket var enligt förväntningar. Det driftfall som, i experimenten, gav mest kol ut från förgasaren är enligt, Figur 21, 920 °C och 20 % vatten i tillflödet.

Vidare undersöktes kolverkningsgraden genom att dividera antal mol kol ut från förgasaren med antal mol kol i bränslet. Detta gjordes för att få en uppfattning om hur effektiv förgasaren i experimenten var. Det erhållna värdet kan sedan jämföras med den byggda förgasarens verkningsgrad. Verkningsgraden beräknades att vara 70-80 % med 920 °C och 20 % vattenånga i tillflödet. Detta värde ansågs vara en tillfredsställande verkningsgrad på förgasaren i experimenten.

## B.2.6 Sammanställning förgasningsexperiment

Analysering av förgasningsexperimenten visar på att de förhållanden där mest gas erhöles per gram bränsle var vid 920°C, 20% vatten i tillflödet samt med ett tillflöde av vattenånga och kvävgas på 500 ml/min. Det var även vid dessa förhållanden som bränslet utnyttjades mest effektivt det vill säga då mest kol från bränslet återfanns som kolmonoxid, koldioxid och metan. Vidare visades att storleken på bränslet inte hade en signifikant påverkan på resultatet.

Bränslematning bör ske, enligt ovan resonemang, var 30:e sekund.



## C Bränsleanalys – TGA

För att ta reda på mängden fukt, flykt, koks och aska i de olika bränslena, och på så sätt kunna jämföra dem, användes TGA (Thermogravimetric analysis).

### C.1 Metod

18 prover förbereddes; sex stycken med barkpellets, sex stycken med blomsterpinnar och sex stycken med träflis. Proverna placerades i öppna koppar i maskinen. Maskinen vägde alla prover vid inplacering, och därefter även kontinuerligt under processens gång. Proverna hettades upp till 130 °C för att torkas. När provernas massa var konstant över tid, vilket tolkas som att all fukt avgått, placerades lock på kopporna. De hettades sedan upp till 915 °C under tillförsel av ånga, för avgasning. Sju minuter efter att denna temperatur uppnåtts fick de svalna till 480 °C. Locken plockades av, varpå proverna hettades upp till 550 °C under tillförsel av syre för koksförbränning. Detta pågick tills att massan var konstant, vilket togs som ett tecken på att allt brännbart material var förbränt och att endast aska återstod.

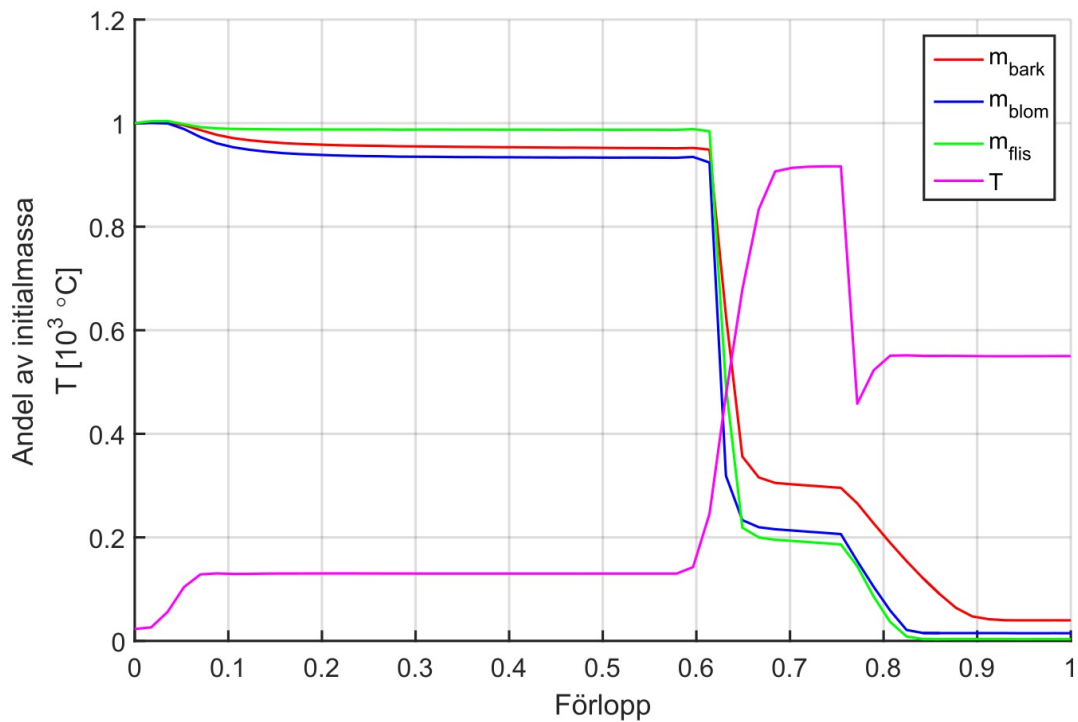
### C.2 Resultat

I Tabell 17 redovisas de andelar fukt, flykt, koks och aska som kunde utläsas av TGA-experimentet.

Tabell 17: Fukt-, aska-, koks- och flyktandelar för varje bränsle som undersöktes med TGA.

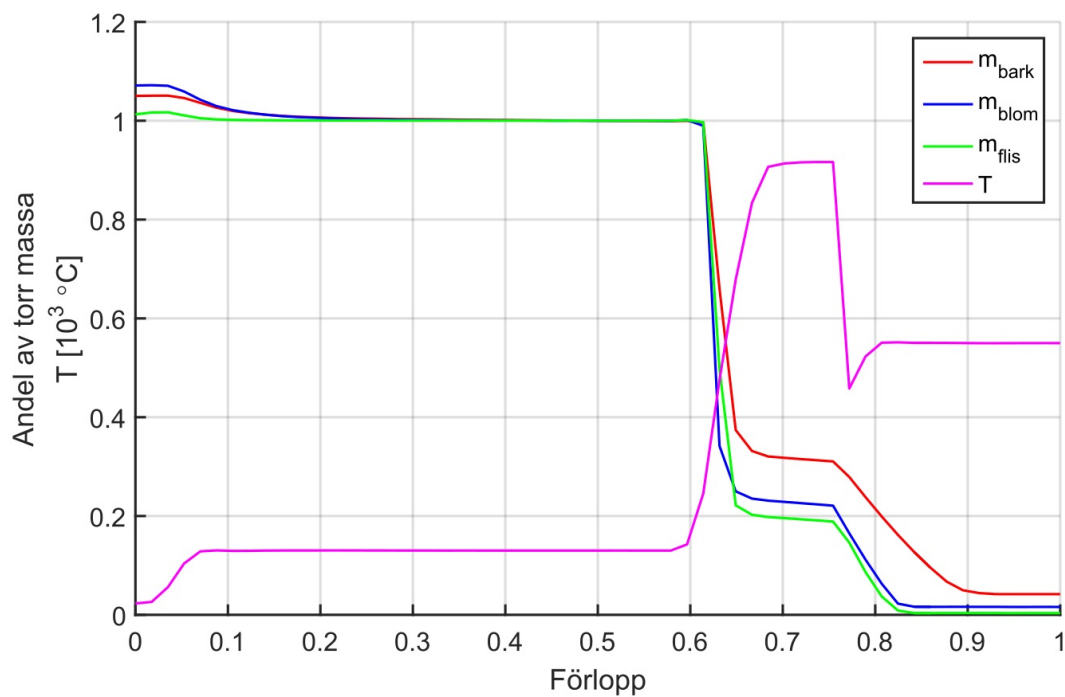
Bränsle	Fukt (%)	Flykt (%)	Koks (%)	Aska (%)
Barkpellets	4.86	65.58	25.58	3.98
Blomsterpinne	6.69	72.69	19.14	1.49
Träflis	1.30	80.06	18.30	0.34

Figur 22 visar resultaten av TGA-experimentet, plottat över experimentets förlopp. Förlopp är inte riktigt samma sak som tid i det här fallet, då x-axeln bara är en linjär fördelning av datapunkterna. Det finns inga data på exakt tid då mätningarna registrerades, och mätningar gjordes inte regelbundet under hela experimentet då avbrott gjordes för att exempelvis lägga på och plocka av lock.



Figur 22: Mass- och temperaturprofiler under TGA-analys.

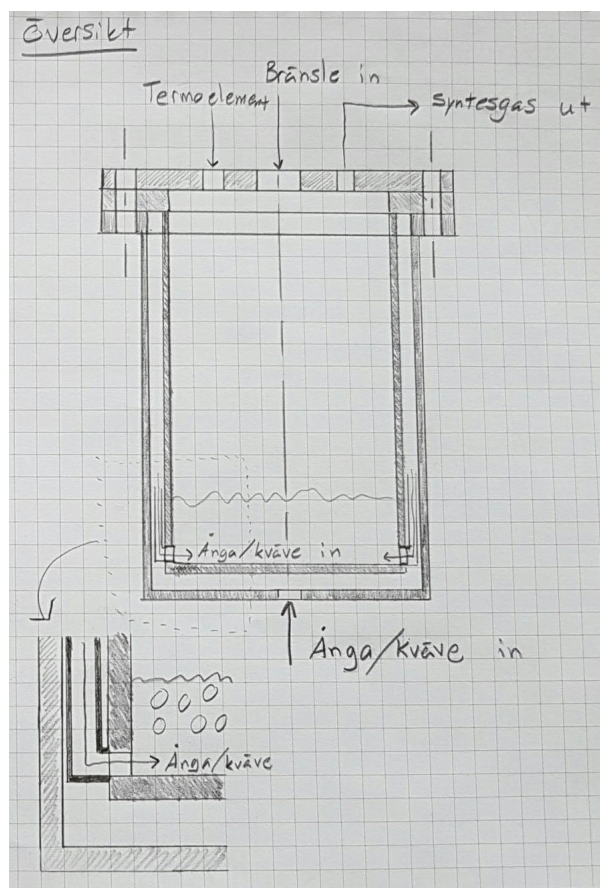
Figur 23 visar samma resultat som Figur 22, men normerat efter partiklarnas torra massa. Detta kan vara mer intressant att jämföra, för att få en bild av själva bränsleinnehållet.



Figur 23: Mass- och temperaturprofiler under TGA-analys, normerat efter torr massa.

## D Designförslag

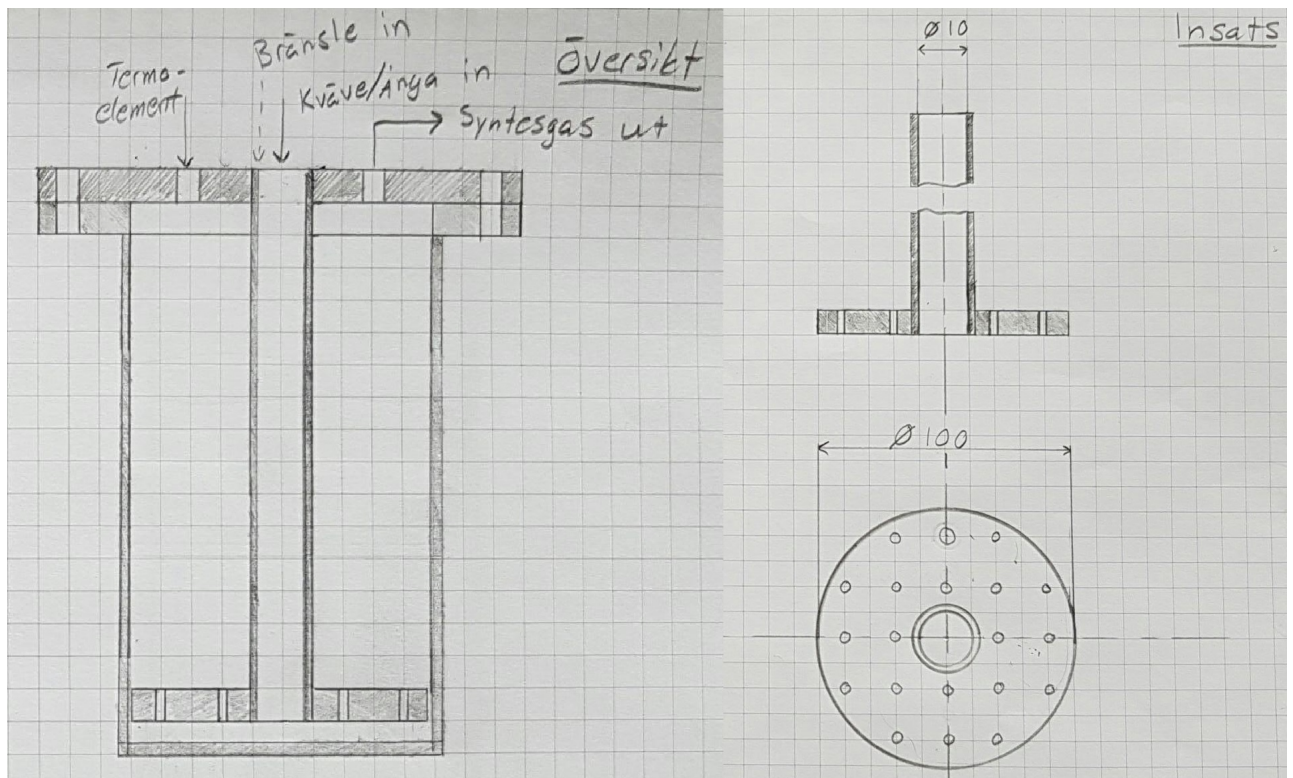
Första designförslaget grundade sig på att använda två kammare där den ingående gasen introduceras till det mellanliggande utrymmet. Den inre kammaren är där fluidiseringen och förgasningen sker. I Figur 24 beskrivs förslaget med en ritning och att fluidiseringen sker genom ett antal rör som mynnar ut i bäddmaterialets botten. Dessa rör ligger i det mellanliggande utrymmet mellan kamrarna och fungerar således också som sandfällor för att hindra att bäddmaterial tar sig ut från innersta kammaren.



Figur 24: Designförslag nummer 1, med två kammare och fluidisering via ett antal rör i det mellanligganutrymmet mellan de två kamrarna.

En rad faktorer resulterade i att denna förgasardesign övergavs. Bland annat materialåtgången för två stycken kammare och svårigheten att placera små rör i mellanrummet och fästa dessa. Även värmetransporten från den utomliggande värmekällan upplevdes som ineffektiv då värmekällan kommer längre från bädden och ger upphov till ökat effektbehov.

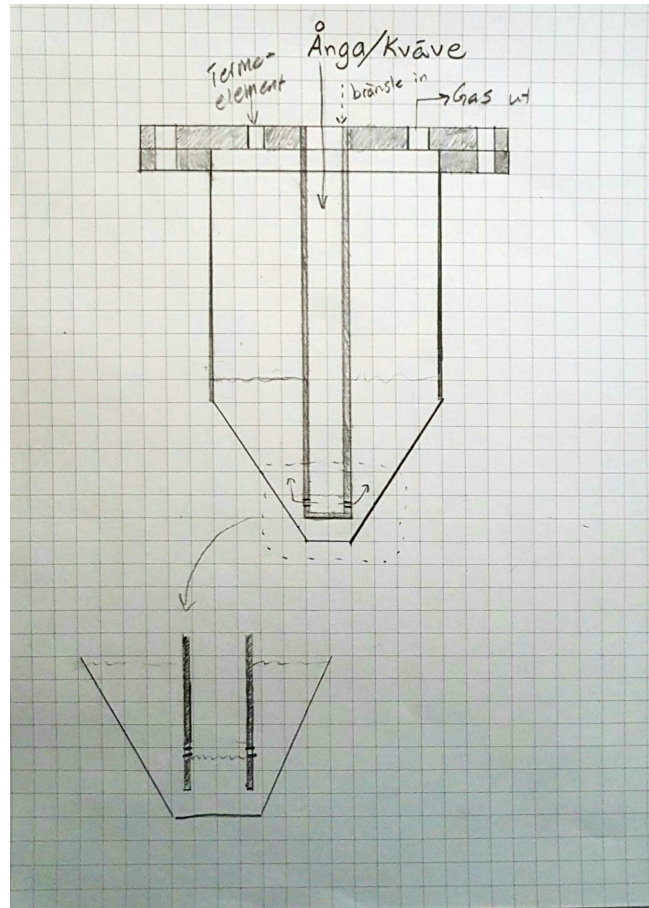
En ny design togs fram med huvudsyftet att bara använda en kammare och minska materialåtgången, se Figur 25. Designförslag nummer 2 grundar sig på en insats med en luftfördelare i form av en plåt med många små hål i. Tanken var att dessa skulle ge en jämn och effektiv fluidisering, snarlik den som uppnås i fallet med en porös platta.



Figur 25: Designförslag nummer 2, med en insats i form av en plåt med små hål och där ingående gas introduceras via ett rör i toppen av förgasaren.

Ett antal problem uppstod med denna design. Det främsta var svårigheten att få till en lösning för att bäddmaterialet inte skulle falla ner under insatsen och eventuellt täppa till hålen. En annan viktig aspekt var tryckfallet, detta kontrolleras genom förträngningar och hur dessa skulle appliceras på insatsen [21, Kap.4].

Nästa designförslag grundade sig på att få en omrörande rörelse i bädden genom att använda en konformad botten och att det ingående gasflödet introduceras via ett rör i centrum av bädden, se Figur 26. Fördelen med denna design, i jämförelse med de tidigare nämnda, är konstruktionens simplicitet och att få komponenter måste tillverkas.

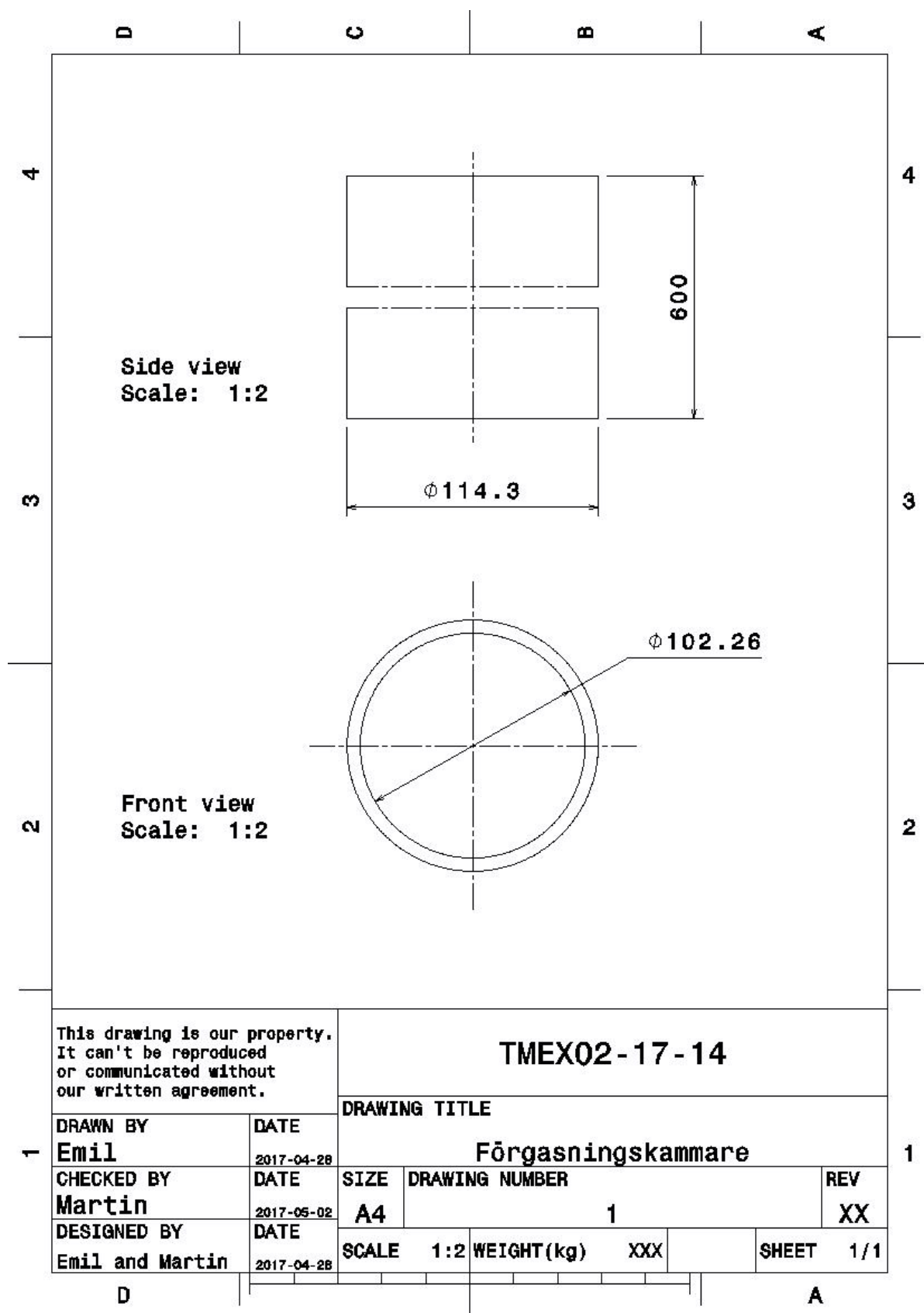


Figur 26: Designförslag nummer 3, med en konformad botten och där ingående gas introduceras via ett rör som går ner i bäddmaterialet från toppen av förgasaren.

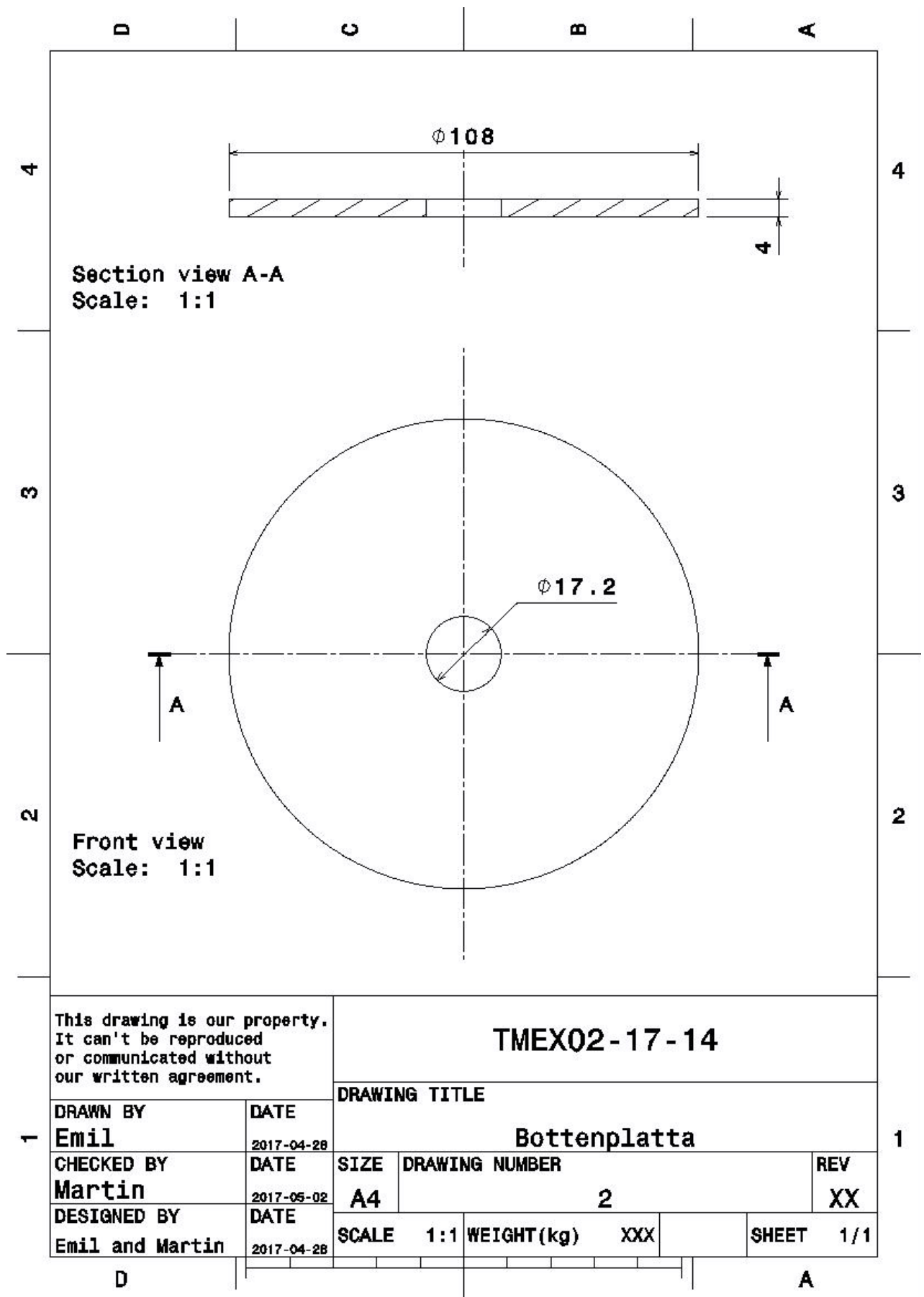
Problemet med designförslag nummer tre är att antalet hål som krävs inte får plats på den begränsade tvärsnittsarean på röret för det centrala gasinflödet i Figur 26. Eftersom syftet är att efterlikna en porös platta kan denna design inte efterlikna en traditionell fluidisering, utan skulle mer liknas vid en omröring av bäddmaterialet. Ytterligare en faktor som inte var till designens fördel är svårigheten att bocka och bearbeta 253-MA stål, vilket skulle försvåra tillverkningen av den konformade botten. Summan av nackdelarna med designförslag tre gjorde att en ny design togs fram.



## E Ritningar över förgasaren

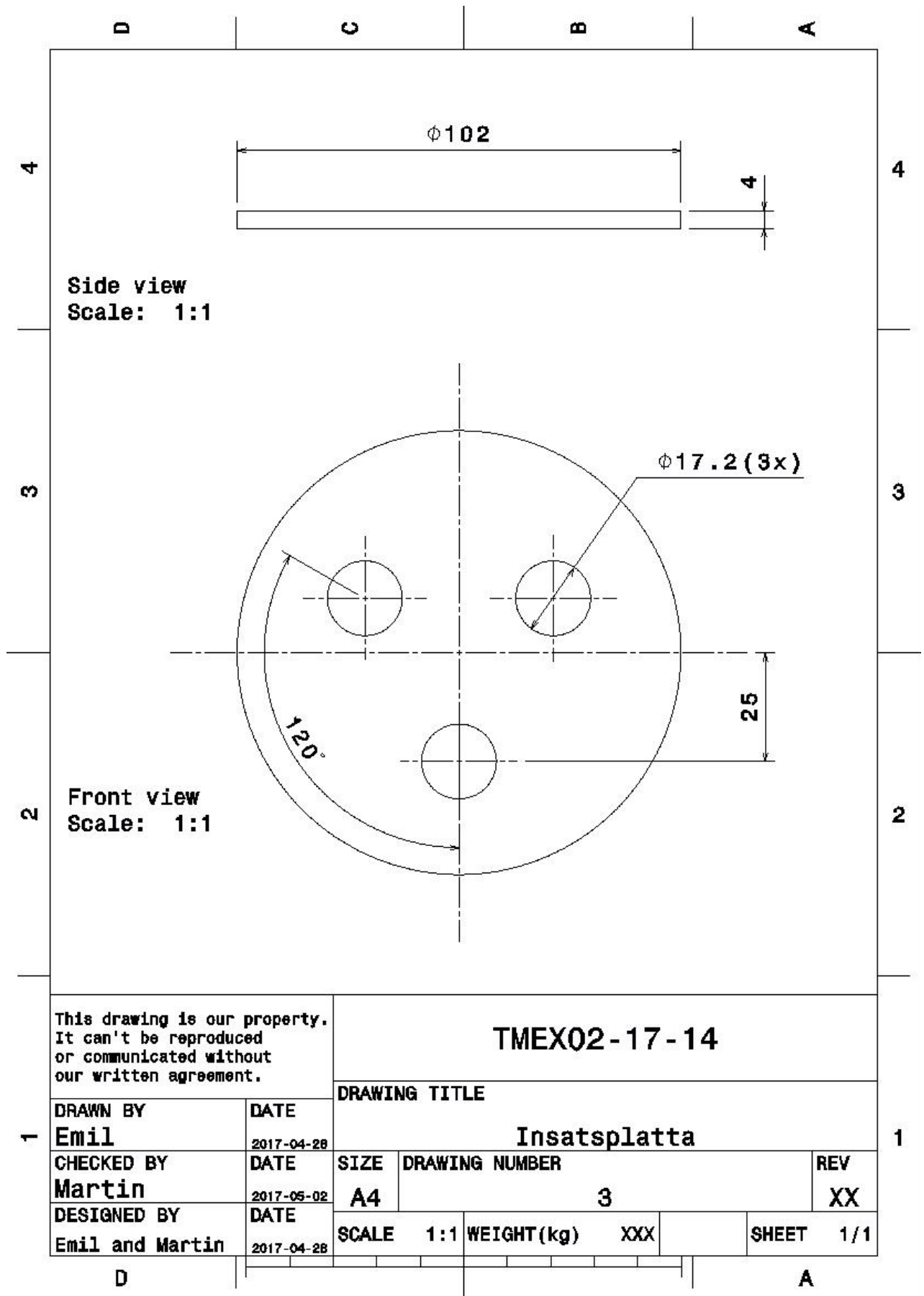


Figur 27: Slutgiltig design av förgasningskammaren.

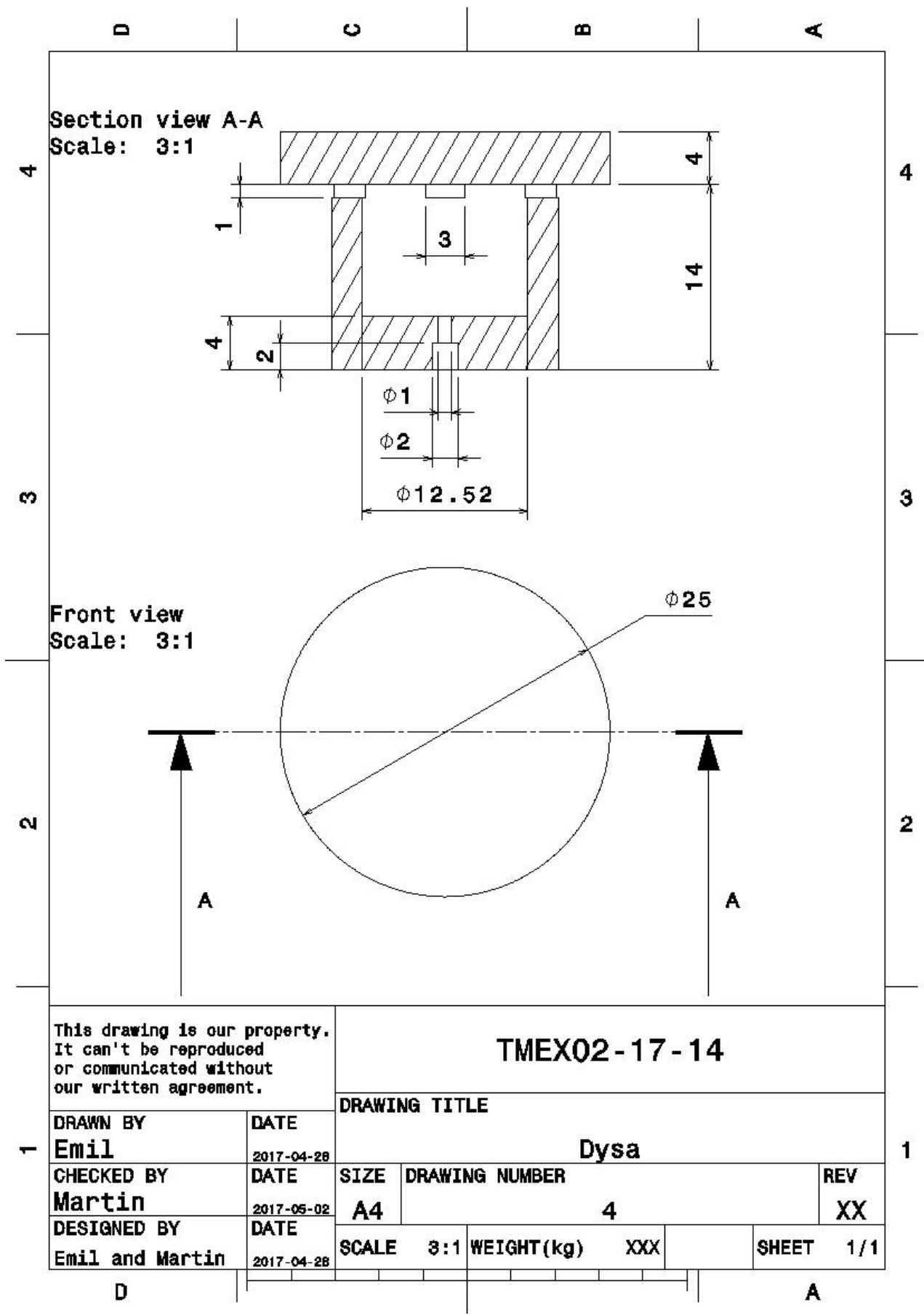


Figur 28: Slutgiltig design av bottenplattan.

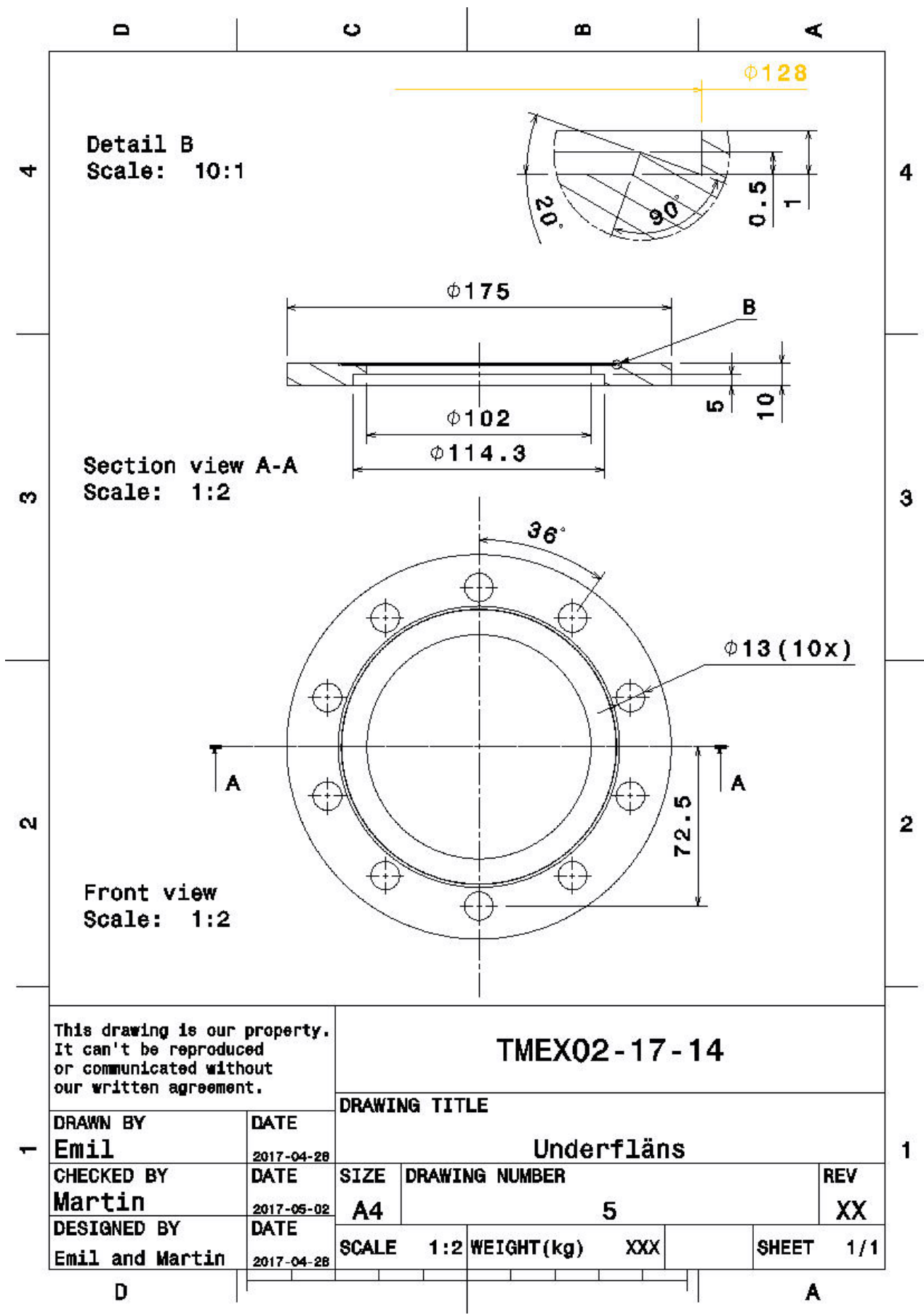




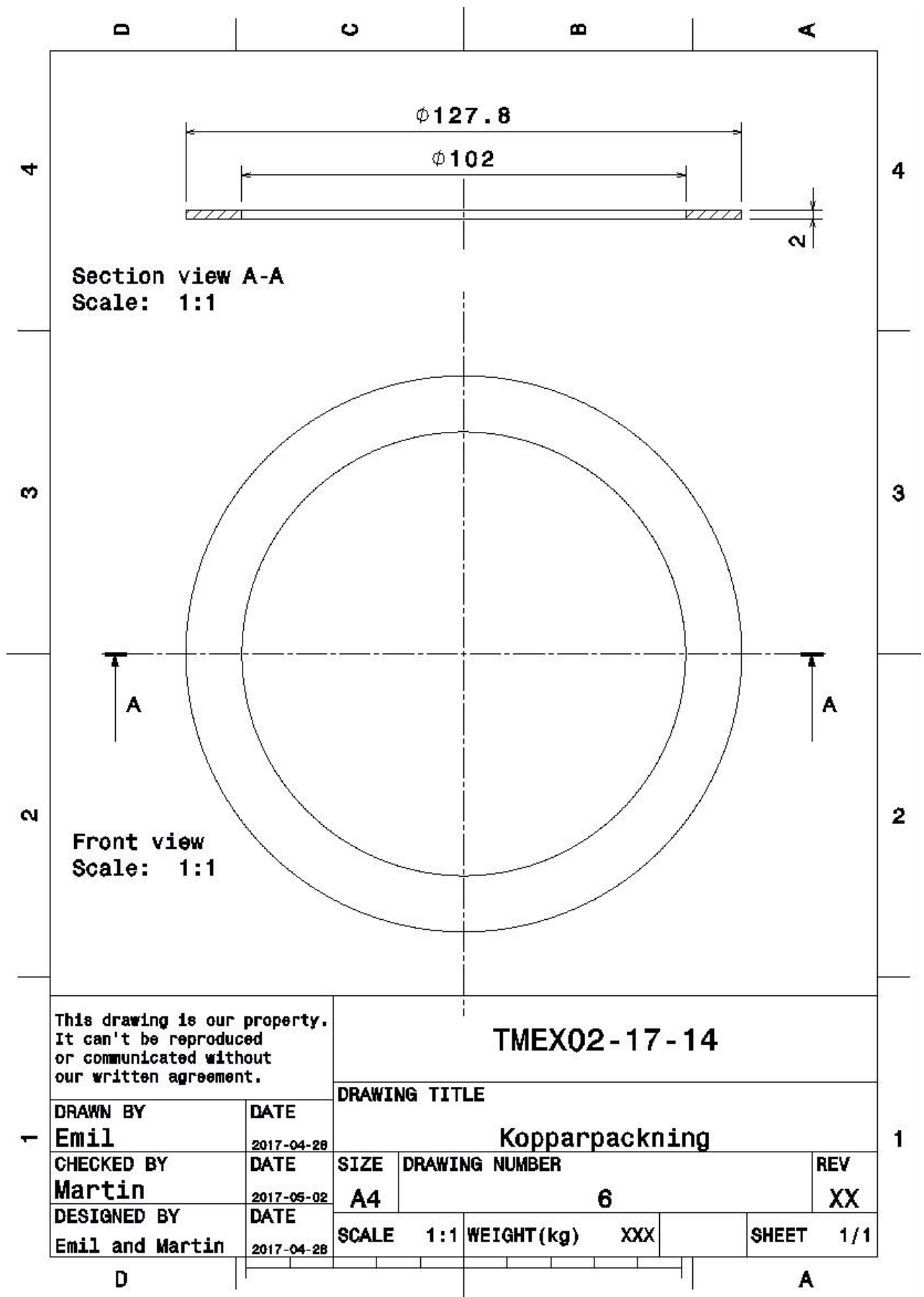
Figur 29: Slutgiltig design av insatsen.



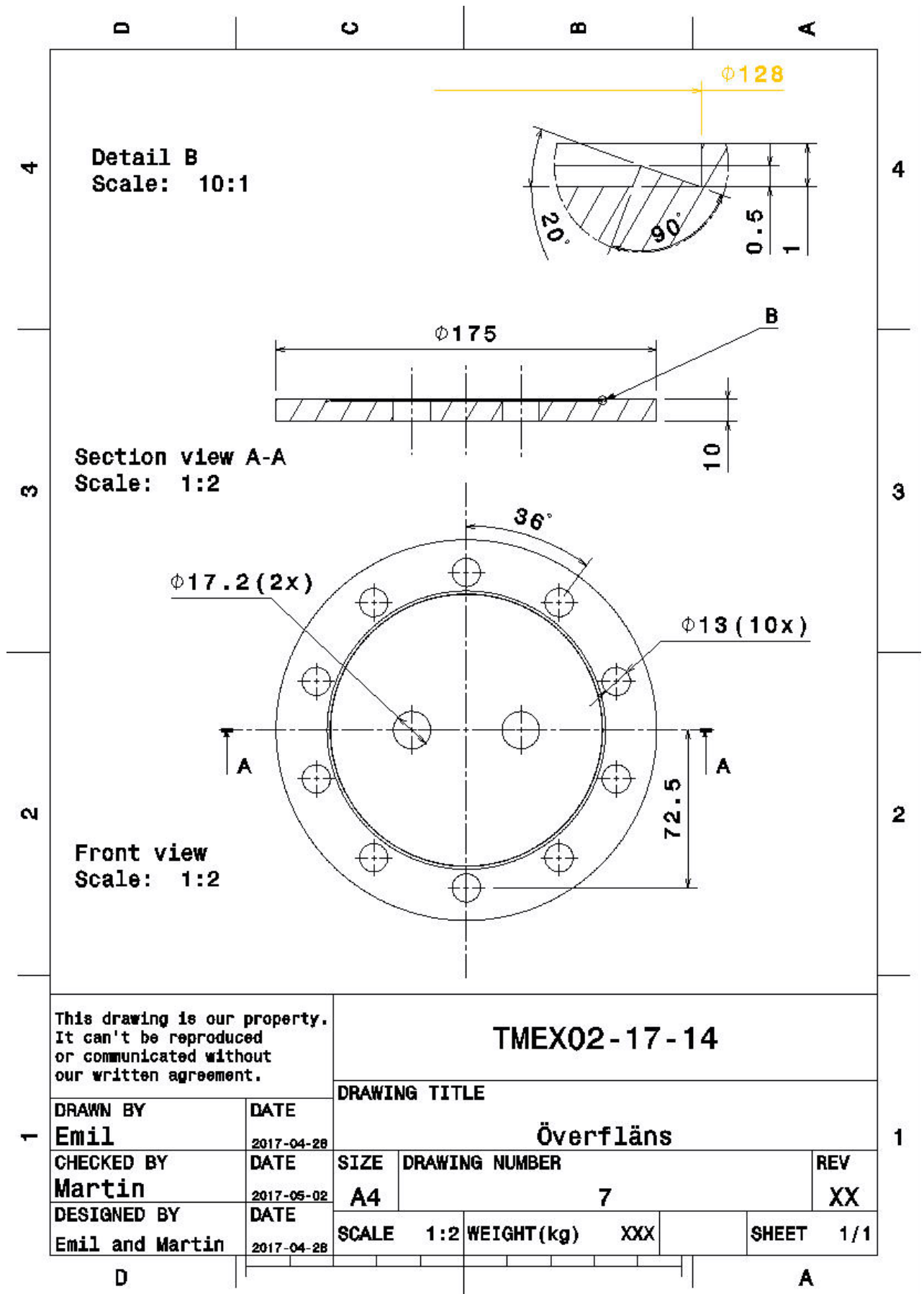
Figur 30: Slutgiltig design av dysorna.



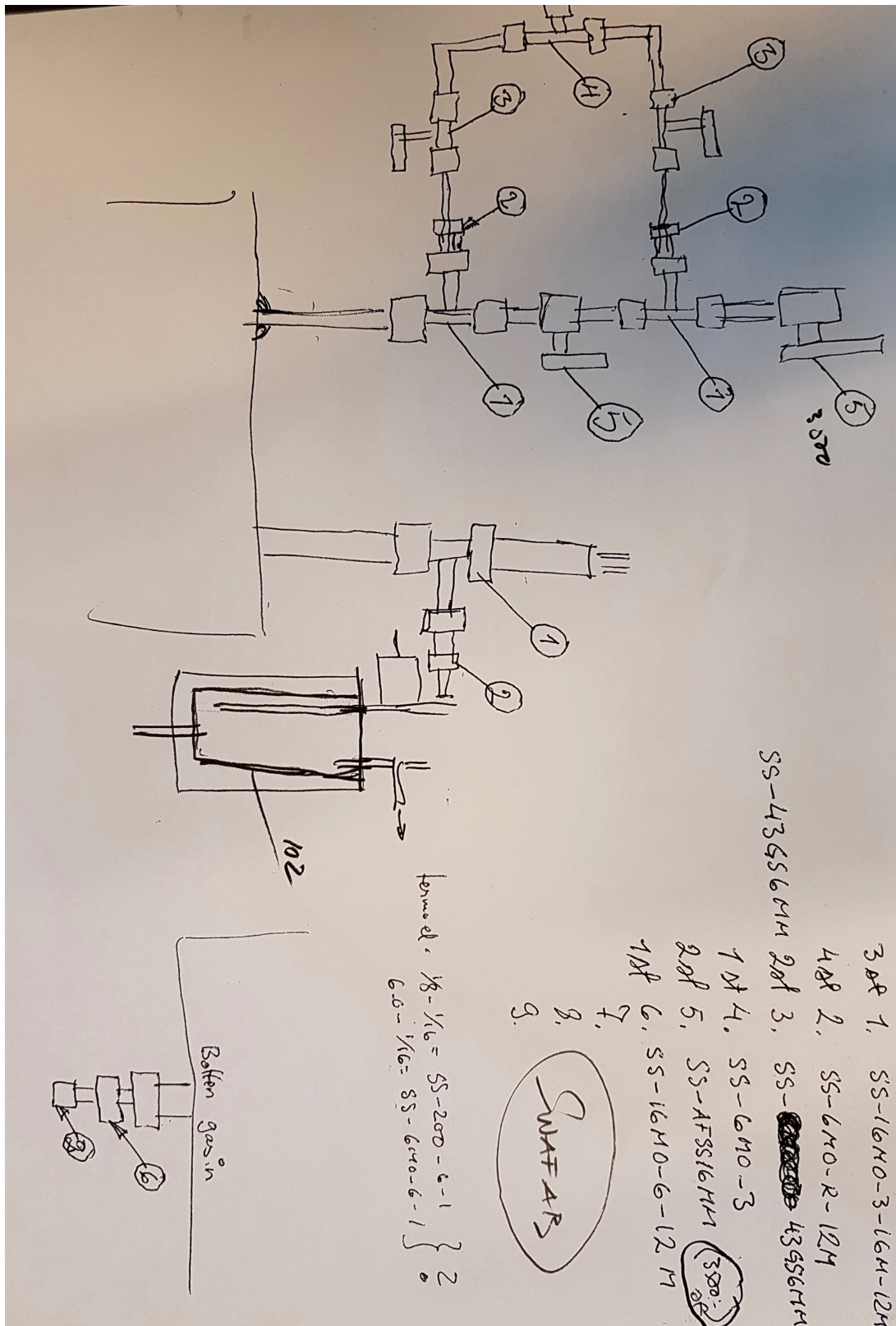
Figur 31: Slutgiltig design av underflänsen.



Figur 32: Slutgiltig design av kopparpackningen.



Figur 33: Slutgiltig design av överflänsen.



Figur 34: Ritning av rörsystem.

En förändring gjordes i designen av bränslematningssystemet som beskrivs i Figur 34. Ventil nummer fem byttes ut på grund av att de var för dyra. Istället användes kulventiler av typen AVI 1398 från Ahlsell.

## F Tillverkningsprocess

Förgasaren tillverkades i maskinverkstaden och kemiverkstaden på Chalmers. Kopplings-systemen för bränslematning samt tillförsel/bortförsl av gas tillverkades av Esa Väänänen i kemiverkstaden utefter ritning som togs fram av projektgruppen. Resterande delar av förgasaren tillverkades av projektgruppen i maskinverkstaden med handledning av personalen, Jan Bragee och Reine Nohlborg.

En byggplan utformades innan tillverkningen av förgasaren påbörjades. Byggplanens syfte är att strukturera arbetet i verkstaden så att det fortlöper så snabbt och smidigt som möjligt. Detta resulterade i att förgasaren delades in i olika detaljer som tillverkades separat. När alla detaljer var färdiga monterades dessa ihop och bildade förgasaren. Nedan beskrivs tillvägagångssättet för detaljtillverkning och slutmontering.

### F.1 Detaljtillverkning

Tillverkningen av förgasarens olika detaljer beskrivs i detta avsnitt. Den detalj som inte beskrivs är förgasningskammaren eftersom detta rör köptes färdigbearbetat till önskade specifikationer. Mått och ritningar redovisas i Bilaga E och tas således inte upp i sin helhet i detta avsnitt.

#### F.1.1 Bottenplatta

Bottenplattan skars med vattenskärare enligt ritning, se Figur 28. Figur 35 visar den skurna bottenplattan. Centrumhålet bearbetades invändigt med metallfil för att jämna till ytan och göra det möjligt att föra igenom röret för inflöde av gas.

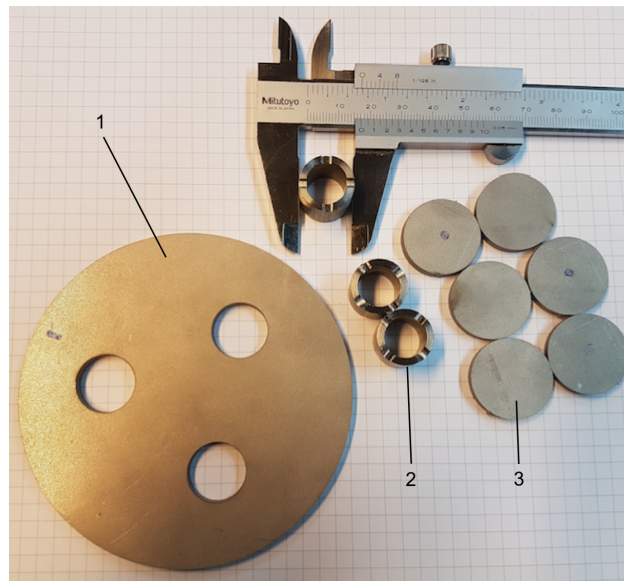


Figur 35: Bottenplatta.

#### F.1.2 Insats

Figur 36 visar några av de komponenter som ingår i insatsen. Denna bild visar de olika detaljerna i bearbetat stadium. De komponenter som redovisas är 1: Insatsplatta, 2: Hylsor

för tillverkning av dysor, 3: Lock till dysor. Förstrypningspluggen saknas i denna bild men redovisas senare i detta avsnitt.



Figur 36: Ingående komponenter till insatsen.

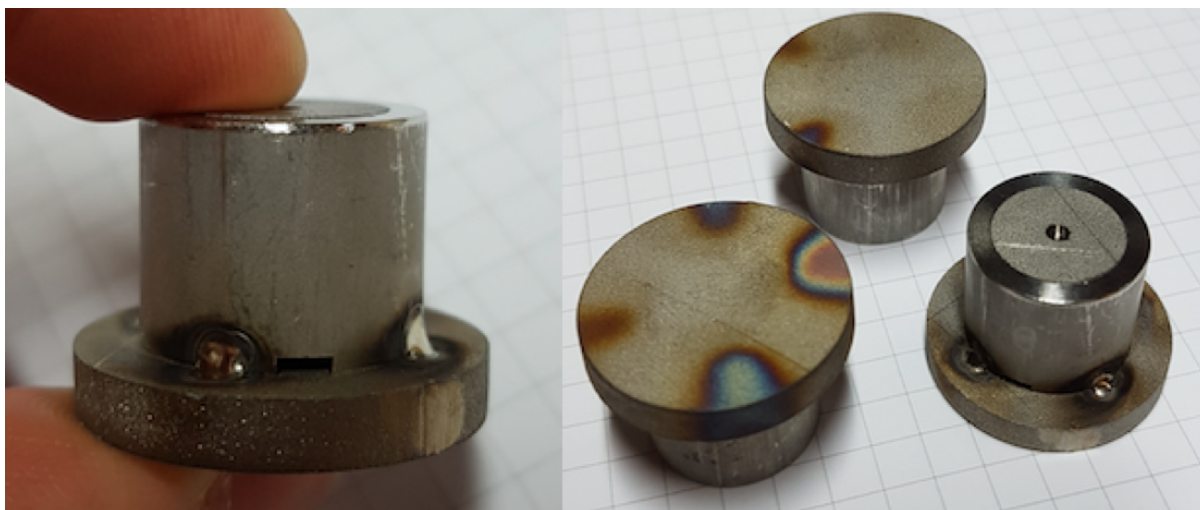
Insatsplattan, förstrypningspluggarna och locken till dysorna skars med vattenskarare enligt ritningar, se Figur 29 och 30. Efter vattenskarningen var insatsens diameter något för stor för att kunna föras in i förgasningskammaren. Därför bearbetades kortsidan av insatsplattan med bandslip tills den gick att föra in. De tre hålen i insatsplattan bearbetades med metallfil för att fila bort de ojämnheter som uppstår vid vattenskarning. Detta var nödvändigt för att i ett senare skede kunna pressa in hylsorna till dysorna i dessa hål. Förstrypningspluggarnas kortsida bearbetades med bandslip eftersom pluggarna senare skulle pressas in i hylsans hål. Ojämnheter från vattenskarningen var tvungna att avlägsnas även här.

Förstrypningspluggarna spändes sedan upp i en svarv för att borra förstrypningshålet. Först borrades ett 2 mm djupt hål med 2 mm borrar. Därefter borrades resterande tjocklek, 2 mm, med 1 mm borrar. Detta gjordes för att minska risken att förstöra det lilla borrarstålet. Ett så litet borrar är känsligt och desto djupare man borrar, desto större risk är det att borrarstålet skär snett och förstörs.

Dysornas hylsor sågades till önskad längd med maskinverkstadens kallsåg. Hylsorna sågades med drygt en millimeters övermått i förhållande till ritningen. Detta ger marginal för att kunna bearbeta hylsornas ändar. Hylsan spändes upp i en svarv och ändarna planades av. Sedan spändes hylsan upp i en fräs. Spår frästes i ett kryssmönster ur hylsans gods. Dessa spår utgör fördelarhålen som sprider gasen ut genom bäddmaterialet.

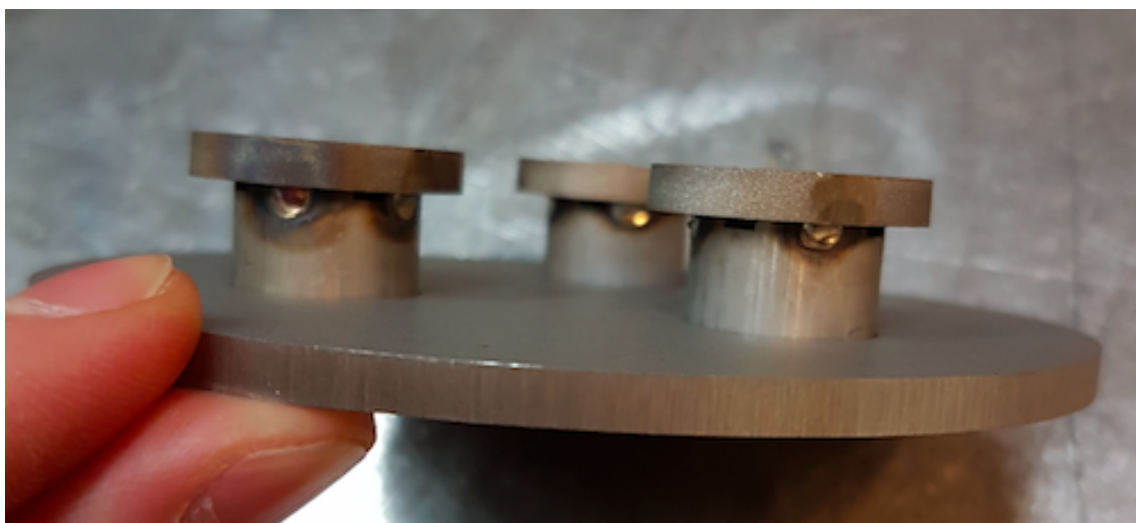
Monteringen av insatsen började med dysorna. Förstrypningspluggen pressades in i hylsan med hjälp av ett skruvstäd. Efter detta nästades locken fast i hylsorna genom att smälta ihop materialet med hjälp av TIG-svets. Inget tillsatsmaterial användes vid svetsningen. Resultatet kan beskådas i Figur 37. Till höger syns förstrypningspluggen som pressats in i hylsan.





Figur 37: Dysor.

Nästa steg var att montera ihop dysorna och insatsplattan. Först pressades dysorna in i insatsplattans hål med hjälp av skruvstäd. Därefter lades svetsfogar i skarvarna mellan insatsplatta, hylsa och förstrypningsplugg på undersidan av insatsen för att fixera dysornas samt förstrypningspluggarnas position. TIG-svets användes för att smälta ihop materialet. Inget tillsatsmaterial användes. Den färdiga insatsen redovisas i Figur 38



Figur 38: Insats.

### F.1.3 Flänsförband

Flänsförbandet skars med vattenskarare enligt ritning, se Figur 31 och 33. De råämnena som erhöles från vattenskarningen visas i Figur 39.

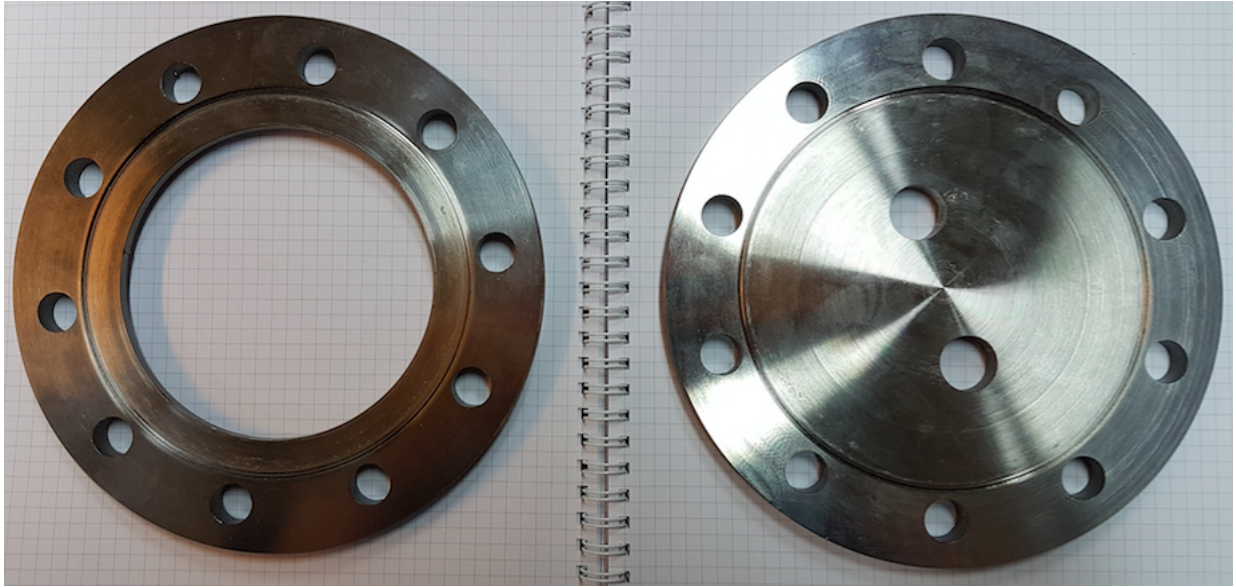


Figur 39: Över- och underfläns skurna med vattenskarare.

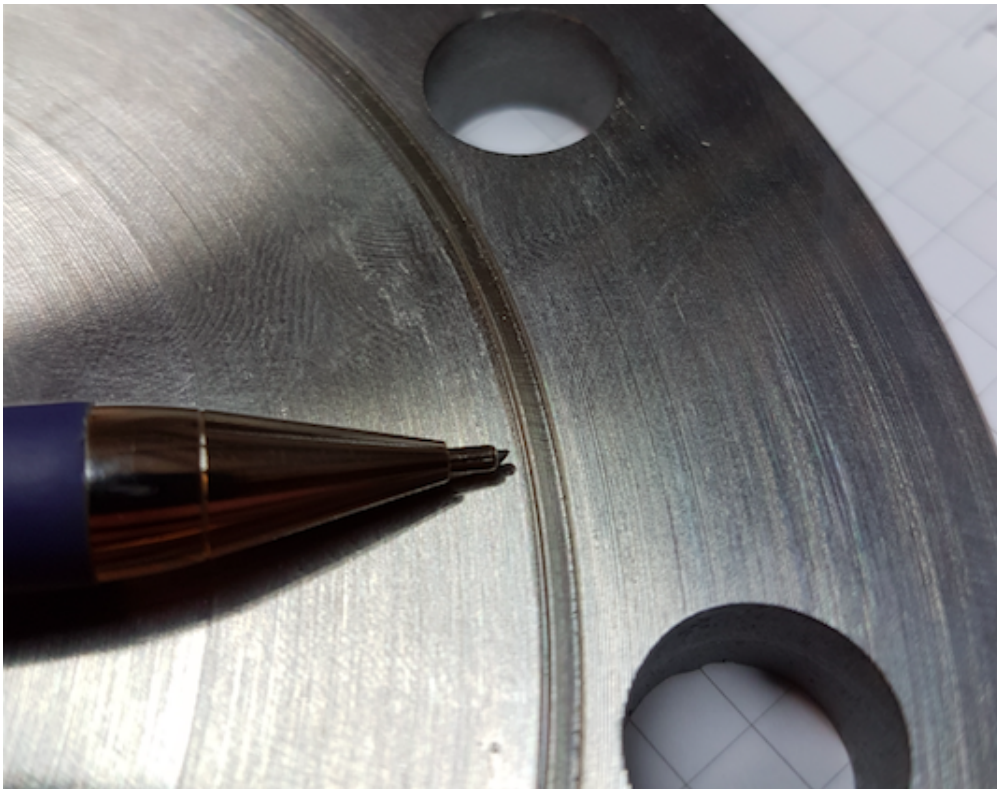
Först spändes underflänsen upp utvändigt i svarven för att möjliggöra bearbetning av centrumhålet. Ett 5 mm djupt urtag svarvades enligt Figur 31 för att kunna föra in det stora reaktorröret till mitten av flänsens tjocklek. Det är önskvärt att svetsa i mitten av flänsens tjocklek för att undvika att flänsen slår sig.

Flänsen vändes för bearbetning av andra sidan, den sida som möter överflänsen. Först plansvarvades hela ytan för att avlägsna eventuella ojämnheter. Ett 0,5 mm urtag svarvades över hela packningsmotläggets yta. Ytterligare ett 0,5 mm urtag svarvades, men denna gång svarvades urtaget endast från centrumhålets kant till knivens början. Dessa två urtag skapade en rektangulär hylla som var 0,5 mm hög och 3 mm bred. Ur denna hylla skapades kniven.

Vid tillverkningen av kniven användes ett 20°stickstål för att erhålla önskade vinklar, se Figur 31. Flänsen spändes utvändigt i svarven. Först skapades knivens långa kant genom att tänga 0,5 mm utragets yttre kant och mata in stålet tills det nådde 1 mm totaldjup. Sedan vändes stålet för att skapa knivens korta kant. Svarven måttades in så att stickstålet tängerade den inre kanten av den rektangulära hyllan som skapats och matades sedan in till ett totaldjup av 1 mm. Samma tillvägagångssätt användes för att tillverka urtaget för packningsmotlägget och kniven på överflänsen. Resultatet visas i Figur 40 och 41.



Figur 40: Flänsförband efter bearbetning.

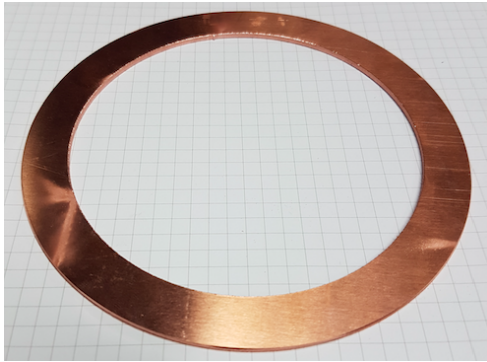


Figur 41: Kniven synlig vid pennans spets.

Tillverkningen av knivarna anses lyckad. Dock skulle kniven med fördel kunnat placeras ett par millimeter längre in mot flänsens centrum för att ge ett större spel för kopparpackningen.

### F.1.4 Kopparpackning

Kopparpackningar skars med vattenskarare enligt Figur 32. Flera packningar skars på en gång eftersom de är engångspackningar och behöver således bytas efter varje åtdragning av flänsförbandet. De yttre kanterna gradades med bandslip och de inre med handfil för att få bort vassa rester från vattenskarningen. Innan användning värmebehandlas packningarna för att bli mjuka. Figur 42 visar den färdiga kopparpackningen och Figur 43 visar kopparpackningen på sin plats i flänsen.



Figur 42: Kopparpackning.



Figur 43: Kopparpackning i fläns.

### F.1.5 Rörsystem

De rörsystem som tillverkades för bränslematning, ut- och inflöde av gas samt genomföring för termoelement tillverkades av Esa Väänänen efter önskemål från projektgruppen. De olika komponenterna visas i Figur 8 och ritning av rörsystemen finnes i Bilaga E. Rörlängderna består av samma stål som resterande förgasarkomponenter, 253-MA.

## F.2 Slutmontering

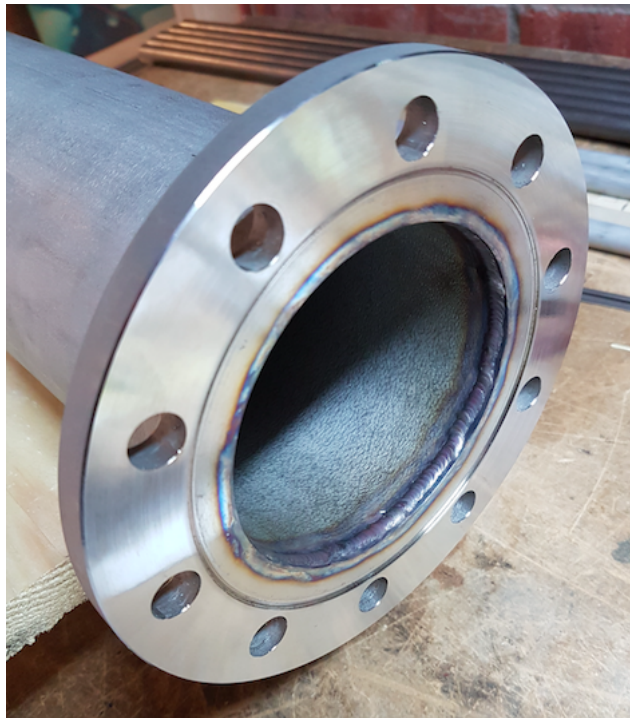
Vid slutmonteringen sattes alla färdiga detaljer från detaljtillverkningen ihop till den färdiga förgasaren. Slutmonteringen började med att insatsen svetsades fast inne i reaktorröret. För att få insatsen så rak som möjligt användes ett rör med ytterdiameter som var något mindre än innerdiametern av reaktorröret. Detta rör fördes in i reaktorn ovanifrån och agerade som motlägg för insatsen. Därefter lades en svetsfog runt kanten av insatsen för att fästa den inne i reaktorröret enligt Figur 44.



Figur 44: Insatsen monterad i reaktorröret.

Insatsen placerades 20 mm in från botten av förgasningskammaren. Detta är viktigt att notera vid eventuellt byte av insatsen. Vid ett sådant byte sågas förgasaren av precis ovanför insatsen.

Nästa steg i slutmonteringen var att svetsa fast underflänsen på reaktorröret. Reaktorröret fördes in i det urtag som svarvats ur underflänsen. Sedan lades en svetsfog med TIG-svets i skarven mellan fläns och rör enligt Figur 45.



Figur 45: Underfläns monterad på reaktorröret.

I detta skede valde projektgruppen i samråd med handledarna att inte fortsätta slutmonteringen. De detaljer som kvarstår att montera är de anslutande rörsystemen för bränslematning, in/utflöde av gas samt bottenplattan. Anledningen att inte montera alla delar är att arbetet med denna förgasare kommer fortsätta efter kandidatprojektets slut. Förgasarens röranslutningar kommer behöva anpassas efter den ugn som värmer förgasaren. Det är ännu oklart hur denna ugn kommer se ut. På grund av detta monteras inte röranslutningarna eftersom de kanske måste modifieras för att vara kompatibla med ugnen.

Bottenplattan monteras inte heller eftersom röret för inflöde av gas kommer svetsas fast invändigt på bottenplattan. Röret för inflöde av gas svetsas alltså samman med bottenplattan innan bottenplattan svetsas fast i botten av förgasningskammaren och får således vänta på montering tills rörkopplingarnas design är fastställd.

# G Planscher till Shell Eco-marathon

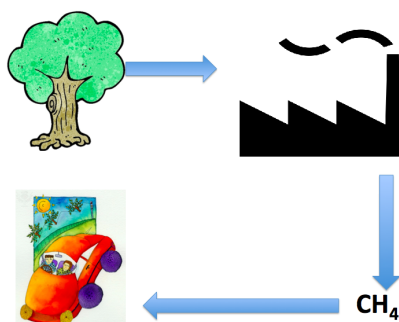
## Biomethane – a way to combat climate change

Martin Andersson, Julia Hansson Björck, Leon Hermansson Larsson, Ivar Petersson  
Emil Thureborn and Linnéa Östlund  
B.Sc. Thesis carried out at  
Departments of Applied Mechanics, Energy and Environment,  
Chemistry and Chemical Engineering at Chalmers University of Technology, Sweden

### Why biomethane?

- Climate change and global warming are results of extensive use of fossil fuels.
- The leaders of the world have decided that the global warming shall be held to well below 2 °C. Therefore, fossil fuels need to be replaced with alternative, climate neutral fuels before the end of this century. [1]
- Can biomethane be an alternative fuel?

### From tree to fuel



### Biomethane at Chalmers

- Chalmers has a power plant with a gasifier where heat is supplied to the University's premises, using only biomass as raw material.
- This is a smaller version of the gasifier that Göteborg Energi uses to supply Gothenburg with biomethane and heat.
- Several bachelor theses at Chalmers have studied the different process units of biomethane production through thermal gasification since 2013.
- By creating one unit at a time, a lab scale prototype of the biomethane production process will soon be complete. Methane could then be produced by students and used as a fuel in the Shell Eco-marathon car.

### Biomethane

- Biomethane could be an important alternative to fossil fuels. Although combustion of biomethane also emits greenhouse gases, the emissions can be reduced by up to 80 % when using biomethane instead of fossil based fuels. Since biomethane is produced with biomass as raw material, these emissions do not increase the net concentration of carbon dioxide in the atmosphere.



- Biomethane can be produced using branches or other waste from the forest industry, which is gasified and processed, yielding methane as a final product.
- The produced methane can be used as fuel for transportation vehicles.
- Biomethane can be distributed using existing pipelines used for natural gas, facilitating the transition. [2]

Overall, biomethane is not just an emerging fuel, it is a fuel ready to compete with fossil fuels today!

### References

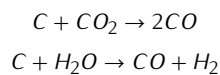
- [1] Naturvårdsverket. Miljömal.se-Begränsad klimatpåverkan.  
<http://www.miljomal.se/sv/Miljomalen/1-Begransad-klimatpaverkan/>.
- [2] Anderson S., Einebrant E. Fakta om biogas.  
[http://www.biogasvast.se/upload/biogas\\_Vast/Fakta\\_om\\_biogas\\_150903\\_web.pdf](http://www.biogasvast.se/upload/biogas_Vast/Fakta_om_biogas_150903_web.pdf).  
Template created by: Lena Botoeva [botoeva@inf.unibz.it], June 2012 Taken from:  
<http://www.inf.unibz.it/~ebotoeva/fancytikzposter.html>

# Gasifier - creating synthesis gas from wood

Martin Andersson, Julia Hansson Björck, Leon Hermansson Larsson, Ivar Peterson  
Emil Thureborn and Linnéa Östlund  
B.Sc. Thesis carried out at  
Departments of Applied Mechanics, Energy and Environment,  
Chemistry and Chemical Engineering at Chalmers University of Technology, Sweden

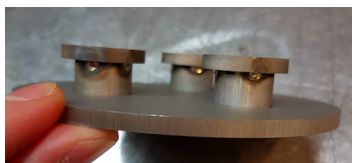
## Gasification

- The first step in creating methane from biomass is gasification of raw material. Gasification occurs when fuel is heated in an oxygen-free environment with water vapour present.
- By heating the fuel to 700-900°C, the fuel's hydrocarbons react with water vapour to form synthesis gas (carbon monoxide, CO, and hydrogen, H<sub>2</sub>) and carbon dioxide, CO<sub>2</sub>. The synthesis gas can be converted to methane in succeeding process steps. [1]
- During gasification, the following reactions occur:



## Gasifier designed and built by students

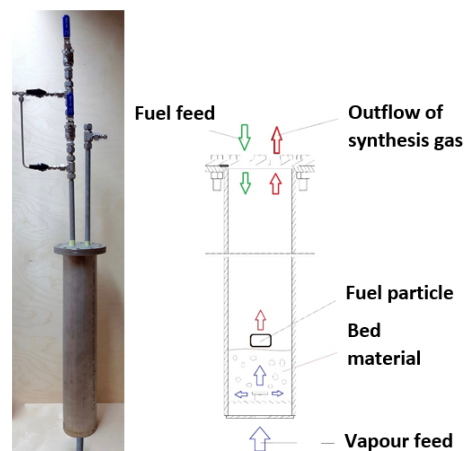
- This bachelor thesis aimed to design and build a lab scale gasifier.
- Theoretical calculations and experiments on a lab scale gasifier were the starting point when dimensions and design of the gasifier were to be determined.
- One important aspect in designing a gasifier is to ensure that there is an even heat distribution to the fuel particles. To achieve this, a fluidized bed is used. Fluidization occurs when sand particles are lifted by a gas flow which causes the sand to act like a fluid.
- In the gasifier, the gas is introduced through three gas distributors at the bottom. These distributors have four small holes where gas passes through which results in a fluidization of the sand.



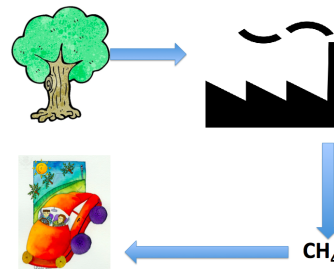
- Another important aspect when designing a gasifier is the operating conditions. These were used in order to choose the appropriate materials and to ensure that high concentrations of the desirable products, H<sub>2</sub> and CO, are obtained.

## The Gasifier

- The gasifier is put in an oven in order to reach the high temperatures needed for thermal gasification.



- The fuel drops into the gasifier from the top. Water vapour is fed from the bottom, fluidizing the bed. The synthesis gas leaves the gasifier at the top and can be fed to other process units creating the desired methane gas.



## References

[1] Thunman, H. Combustion Engineering. 2016. Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology.

Template created by: Lena Botoeva [botoeva@inf.unibz.it], June 2012 Taken from: <http://www.inf.unibz.it/~ebotoeva/fancytikzposter.html>



# H Bränsleanalys av barkpellets

## RAPPORT

utfärdad av ackrediterat laboratorium  
REPORT issued by an Accredited Laboratory

Handläggare, enhet  
Jolanta Franke, sh  
Kemi och Materialteknik  
010-516 52 14, jolanta.franke@sp.se

Datum 2009-02-24 Beteckning F9 02675 Sida 1 (4)



Chalmers Tekniska Högskola  
Fredrik Lind  
Energiteknik  
412 96 Göteborg

### Analys av bäddprov och barkpellets

(1 bilaga)

#### Föremål

Tre bäddprov och ett prov barkpellets insända av uppdragsgivaren.

Provmärkning: 1) Bäddprov, Förgasare, H1-3 08.12.19 kl 14:20  
2) Bäddprov, cyklonben, Barkpellets 08.12.19 kl 14:10  
3) Bäddprov, H2, Barkpellets 08.12.19 kl 13:58  
4) Barkpellets, 08.12.19 kl 13:40  
Provmängd: Bäddprov-ca 250g av varje, Barkpellets-0,5 kg  
Förpackning: Plastburkar  
Ankom SP: 2009-02-02  
Provningsdatum: Vecka 5-9, 2009

#### Uppdrag - Bäddprov

Bestämning av huvudelement, svavel och lakbart klorid.

#### Uppdrag - Barkpellets

Bestämning av fukt, aska, kol, väte, kväve, syre, svavel, klor, huvudelement, kalorimetriskt värmevärde samt beräkning av effektivt värmevärde.

#### Metod Bäddprov

Klorid: Kvantifierat med jonkromatograf.  
Svavel: SP 0658 (SS 18 71 86)  
Huvudelement: mod. ASTM D 3682  
- Al, Si, Fe, Mn, Ti, Ca, Mg, Ba, Na,  
- K, P

#### Metod - Barkpellets

Total fukt: CEN/TS 14774-2  
Aska: mod. SS 18 71 71  
Svavel: CEN/TS 15289 (svavelanalysator)  
Klor: CEN/TS 15289 A (jonkromatografi)  
Kol, väte, kväve: CEN/TS 15104  
Värmevärde: CEN/TS 14918 (likvärdig med ISO 1928)  
Syre: Beräknat

#### SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Postadress	Besöksadress	Telefon / Fax / E-post
SP	Västeråsen	010-516 50 00
Box 857	Brinellgatan 4	033-43 55 02
501 15 Borås	504 62 Borås	info@sp.se

Laboratorier ackrediteras av Styrelsen för ackreditering och teknisk kontroll (SWEDAC) enligt svensk lag. Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat.

# RAPPORT

Datum  
2009-02-24

Beteckning  
F9 02675

Sida  
2 (4)

## Resultat - Bäddprov

### På prov i inlämningstillstånd

	1	2	3
Svavel, S, vikt-%	0,16	0,13	0,15
Klorid, Cl, vikt-%	<0,01	<0,01	<0,01
Aluminium, Al, vikt-%	1,43	1,01	1,19
Kisel, Si, vikt-%	35,4	38,0	37,3
Järn, Fe, vikt-%	0,59	0,45	0,52
Titan, Ti, vikt-%	0,13	0,09	0,10
Mangan, Mn, vikt-%	0,53	0,37	0,46
Magnesium, Mg, vikt-%	0,85	0,59	0,72
Kalcium, Ca, vikt-%	8,80	6,48	8,04
Barium, Ba, vikt-%	0,15	0,11	0,13
Natrium, Na, vikt-%	0,64	0,73	0,57
Kalium, K, vikt-%	3,83	2,86	3,28
Fosfor, P, vikt-%	0,46	0,33	0,42

# RAPPORT

Datum  
2009-02-24

Bezeichnung  
F9 02675

Sida  
3 (4)

## Resultat - Barkpellets

### På prov i inlämningstillstånd

Total fukt, vikt-%	0,3
Aska, vikt-%	4,0
Svavel, S, vikt-%	0,03
Klor, Cl, vikt-%	0,02

Kalorimetriskt värmevärde vid konstant volym, MJ/kg	20,59
Effektivt värmevärde vid konstant tryck, MJ/kg	19,37

### På torrt prov

Aska, vikt-%	4,0
Svavel, S, vikt-%	0,03
Klor, Cl, vikt-%	0,02
Kol, C, vikt-%	52,0
Väte, H, vikt-%	5,6
Kväve, N, vikt-%	0,38
Syre, O, (diff.), vikt-%	38,0

Kalorimetriskt värmevärde vid konstant volym, MJ/kg	20,65
Effektivt värmevärde vid konstant tryck, MJ/kg	19,44

forts. resultat

**På torrt prov**

4

Aluminium, Al, vikt-%	0,11
Kisel, Si, vikt-%	0,50
Järn, Fe, vikt-%	0,06
Titan, Ti, vikt-%	<0,05
Mangan, Mn, vikt-%	0,06
Magnesium, Mg, vikt-%	0,08
Kalcium, Ca, vikt-%	0,96
Barium, Ba, vikt-%	0,01
Natrium, Na, vikt-%	0,05
Kalium, K, vikt-%	0,23
Fosfor, P, vikt-%	0,05

**På inaskat prov vid 500 °C**

Aluminium, Al, vikt-%	2,58
Kisel, Si, vikt-%	11,5
Järn, Fe, vikt-%	1,40
Titan, Ti, vikt-%	0,10
Mangan, Mn, vikt-%	1,27
Magnesium, Mg, vikt-%	1,81
Kalcium, Ca, vikt-%	21,7
Barium, Ba, vikt-%	0,30
Natrium, Na, vikt-%	1,06
Kalium, K, vikt-%	5,14
Fosfor, P, vikt-%	1,08

**SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut**  
**Kemi och Materialteknik - Oorganisk analytisk kemi**Conny Haraldsson  
Tekniskt ansvarigJolanta Franke  
Teknisk handläggare**Bilaga**  
Mätosäkerhet

