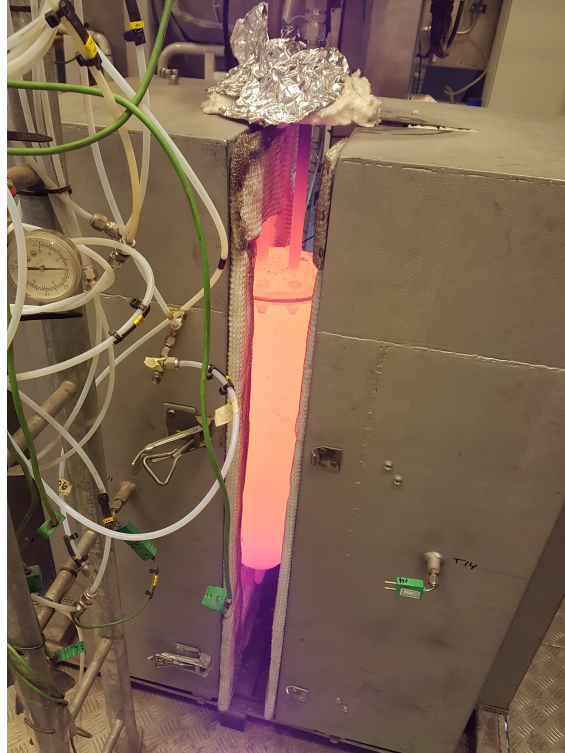




CHALMERS



Optimering av förgasare i syfte att producera biometan

Produktion av biometan för Chalmers EcoMarathon

Kandidatarbete inom Rymd-, Geo- och miljövetenskap

ÅSA ELIASSON
JOEY FREY
EMELIE GIEROW
OLLE JOHNSON
LINUS KRON
JULIA RITTFORS

KANDIDATARBETE SEEX15-18-12

Optimering av förgasare i syfte att producera biometan

Produktion av biometan för Chalmers EcoMarathon

ÅSA ELIASSON
JOEY FREY
EMELIE GIEROW
OLLE JOHNSON
LINUS KRON
JULIA RITTFORS



CHALMERS

Instituionen för Rymd-, Geo- och miljövetenskap
Avdelning för energiteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2018

Förord

Första och största tacket går till våra handledare; Martin Seemann och Jonas Sjöblom, utan vilkas hjälp detta arbete aldrig hade blivit färdigt. De har varit kunniga, hjälpsamma och alltid redo att diskutera även de konstigaste av frågor. Jonas med sin feedback på rapport och hjälp med styrsystem. Martin för all tid vi trots allt kunnat vara i KC, för att tålmodigt ha förklarat hur saker fungerar och felsökt tillsammans med oss. Tack till Esa Väänänen som svetsade och installerade komponenter, ett arbete som skulle tagit oss månader, på bara ett par timmar. Jesper Aronsson lånade ut sin forskningsutrustning och assisterade den något förvirrade gruppen vid de allra första fluidiseringstesterna. Tack vare hans engagemang och kunskap uppnåddes tillslut fungerande fluidisering.

Arbetet i KC var inte alltid det lättaste och tiden var ofta knapp. Men tack vare Johannes Öhlins problemlösning och alltid lika glada humör gjordes installationen oändligt mycket lättare. Projektet hade dock inte kunnat genomföras utan Jessica Bohwalli som gick igenom hur KC fungerade, kalibrerade GC och hjälpte till att hämta resultat. Stort tack går till Jelena Maric, utan hennes hjälp med impregneringen av bränslet hade resultatet varit så mycket tråkigare. Jelena hjälpte också till med val av bäddmaterial och bidrog med värdefull inspiration. Isabel Cañete Vela hjälpte till när det behövdes som mest och tiden började rinna ut för testerna. Outtröttligt noterades vattenmassor, koncept förklarades och nödvändig problemlösning utfördes. Slutligen riktas ett stort tack till alla andra som på något sätt har bidragit till detta kandidatarbete. Det har varit en mycket lärorik upplevelse som vi kommer att bära med oss länge.

Sammanfattning

Diskussionen om den globala uppvärmningen är mer aktuell än någonsin med ökande temperaturer och havsnivåer. Därför är det av intresse att hitta alternativa, mer hållbara sätt att lösa dagens bränsle- och energibehov. Ett intressant forskningsområde på vägen mot ett mer hållbart samhälle är ersättningen av fossila bränslen med biobränslen. Med målet att öka kunskapen och intresset för detta område har en serie kandidatarbeten erbjudits vid Chalmers Tekniska Högskola. Syftet är att konstruera en biometanprocess med förhoppningen att den metan som skapas ska kunna driva en Chalmers EcoMarathon-bil.

I detta kandidatarbete fortsätter utvecklingen av denna biometanprocess. Fokus ligger på att undersöka möjligheten att producera syngas i en redan designad förgasare. Arbetet delas in i tre delsteg: undersöka förgasarens funktionalitet, installera enheten i Chalmers Kraftcentral samt optimera bäddtemperatur och inflöde med avseende på utbyte och sammansättning. En utförlig testmatris konstruerades för att testa driftförhållanden. Som bränsle vid testerna valdes träkulor av bok, vilka matades via en kväveluss. Tio driftpunkter valdes för att testa driftförhållande, varav två punkter valdes för att utföra vidare tester under längre tid. Slutligen testades en punkt då träkulorna impregnerats med kaliumkarbonat.

Det bästa kolutbytet som uppnåddes under de tio ursprungliga testerna var 82,9%, vilket dock är lågt för denna process. Detta utbyte erhöles vid en temperatur av $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ samt ett ång- och kvävgasflöde på sex respektive fyra normalliter per minut. Kompositionen på utflödet påverkades endast marginellt av de olika driftförhållandena. De längre testerna gav däremot inga tydliga resultat. Testet med kalium gav ett bättre kolutbyte och högre andel H_2 än motsvarande test utan kalium.

Många felkällor och låga utbyten innebär dock att visst tvivel finns kring resultatets trovärdighet. Ingen slutsats kunde därför dras angående förgasarens prestanda. Fler tester samt eliminering av felkällor behövs. Resultatens karaktär korresponderar dock väl mot teorin där exempelvis ökat ångflöde, temperatur och tillsatts av kalium förbättrade prestandan.

Abstract

The discussion regarding global warming is more relevant than ever, with temperatures increasing and sea levels rising. It is therefore crucial to find alternative, more sustainable ways to satisfy the need of fuel and energy. An interesting field along the road to a more sustainable society is the replacement of fossil fuels with biofuel. With the goal to spread knowledge about this area, a series of Bachelor's theses has been offered at Chalmers University of Technology. With the intention to construct a bio methane process in the hope that the produced methane will power the car from Chalmers EcoMarathon.

In this Bachelor's thesis the development of this bio methane process continues. The aim is to investigate the possibility of producing synthesis gas from an already designed gasifier. The project will be divided into three steps: looking over the functionality of the gasifier, installing it in the Chalmers Power Central and finally optimization of operating parameters regarding yield and composition in the out-flow. A detailed model matrix to test the operating parameters was designed. The fuel of choice was beads of beech, which was fed into the gasifier through a sluice with nitrogen. Ten operating conditions were chosen to test the optimal operating parameters, from which two were chosen for further testing. Lastly a test where the beads were impregnated with potassium carbonate was executed.

The best carbon yield attained during the ten initial tests was 82,9 %, which is a quite poor result for this kind of process. That yield was achieved with an inflow consisting of six normal liters nitrogen gas per minute and four normal liters of steam in combination with a bed temperature in the gasifier of 870 °C. The composition of the out-flow was mostly unaffected by different operating parameters. The two test points chosen for further testing gave no conclusive results. The test with potassium, however, resulted in a larger carbon yield and a higher proportion of H₂ compared to tests without it.

Many sources of error and low yields means that no thorough conclusions could be drawn out of the results regarding the performance of the gasifier. More test and eliminations of error sources are needed in order to achieve that. The characteristics of the results does however correspond well with the theory. High temperatures and steam concentrations, as well as the adding of potassium, increases the performance.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	3
1.3	Avgränsningar	3
1.4	Förgasardesign och utgångspunkt för driftförhållanden	4
1.4.1	Design och konstruktion	4
1.4.2	Rekommenderade driftförhållanden	7
2	Teori	8
2.1	Biogas ur bioråvara	8
2.2	Förgasning	9
2.2.1	Reaktioner	9
2.2.2	Förgasningsprocessen	10
2.3	Fluidisering i förgasare	11
2.3.1	Minsta fluidiseringshastighet och tryckfall	13
2.4	Bäddmaterial	14
2.4.1	Aktivering	15
2.5	Separations- och analysmetoder	17
2.5.1	Gaskromatografi	17
2.5.2	Konduktivitetsdetektor	19
2.6	Försöksplanering och modellbeskrivning	19
2.6.1	Statistiska tester med linjär regression	20
2.6.2	Förfining av modell	22
2.6.3	Undersökning av residualer och nollnivåer	22
3	Inledande undersökningar och förberedelser	24
3.1	Test av dysor	24
3.2	Montering av förgasare	25
3.3	Fluidiseringstester	26
3.4	Val av bränsle	27
3.5	Analys av bränslets sammansättning	28
3.6	Verktyg för styrsystem	29
3.6.1	LabVIEW	30
4	Utförande av förgasningstester	31
4.1	Grundläggande förgasartester	31
4.2	Kompletterande förgasartester	32

5	Resultat och diskussion	33
5.1	Tester enligt testmatris	33
5.1.1	Resultat	33
5.1.2	Statistisk analys	35
5.1.3	Diskussion av resultat	37
5.1.4	Diskussion av felkällor	38
5.2	Tester vid stationärt tillstånd och kaliumimpregnering	39
5.2.1	Resultat för driftpunkt 6	39
5.2.2	Resultat för driftpunkt 1	40
5.2.3	Diskussion för driftpunkt 1 och 6	40
6	Slutsats	42
	Litteraturlista	43
	Bilaga A Test av dysor	I
	Bilaga B Ritningar över förgasaren	III
	Bilaga C Fluidiseringstester	VI
C.1	Kalltest i Kraftcentralen	VI
C.2	Varmtest i Kraftcentralen	VI
	Bilaga D Manual för temperaturövervakning med LabVIEW	VIII
D.1	Produkter	VIII
D.1.1	LabVIEW	VIII
D.1.2	CompactRIO, NI-9066	VIII
D.1.3	Termoelement, NI-9212	IX
D.2	Uppsättning	IX
D.3	Instruktioner	IX
D.4	Fortsatt arbete	XIII
	Bilaga E Testmatris och ventilinstruktioner	XIV
	Bilaga F Beräkningar	XV
	Bilaga G Planscher	XVIII

Nomenklatur

Variabler och konstanter

α	Signifikansnivån	
\hat{b}	Skattad respons	
$\hat{\mathbf{b}}$	Skattade parametrar	
\mathbf{b}	Sanna parametrar	
ΔP_h	Tryckfall över gasfördelaren	Pa
ΔP_{tot}	Totalt tryckfall	Pa
Δt_r	Skillnad i retentionstid för två toppar	s
ϵ	Residual	
μ	Viskositet	$Pa\ s$
ρ	Densitet	kg/m^3
τ	Observerat t-värde	
A	Area	m^2
C_D	Motståndskoefficient över förträngningen	
d_h	Diameter på förträngningshål	m
d_t	Förgasarens diameter	m
d_{sf}	Den diameter en sfärisk bäddpartikel hade haft	m
F	Bäddens tyngdkraft	N
g	Tyngdaccelerationen	m/s^2
n	Antal experiment	
N_h	Antal förträngningshål per kvadratmeter	förträngningshål/ m^2
p	Antal anpassade parametrar	

R_s	Upplösning	
s^2	Skattad varians	
$se(b_i)$	Standardfel	
SSE	Summan av resiudaler i kvadrat	
t	Student t-fördelning	
t_m	Tiden det tar för den mobila fasen att eluera	<i>s</i>
t_r	Retentionstid	<i>s</i>
U_h	Gashastigheten genom en förträngning	<i>m/s</i>
U_o	Gashastighet innan fördelaren	<i>m/s</i>
U_{mf}	Minsta fluidiseringshastighet för en bädd	<i>m/s</i>
v	Antalet frihetsgrader	
w_{av}	Genomsnittsbredd av två toppar	<i>m</i>
x	Skalad variabel	
z_i	Studentiserad residual	
t_r'	Justerad retentionstid	<i>s</i>
y	Uppmätt respons	

Dimensionslösa tal

Ar	Archimedes tal, se Ekvation 2.10
Re	Reynolds tal, se Ekvation 2.13

Förkortningar

BFB	Bubblande Fluidiserad Bädd
Bio-SNG	Bio-Substitute Natural Gas
CFB	Cirkulerande Fluidiserad Bädd
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GC	Gaskromatografi
GoBiGas	Gothenburg Biomass Gasification Project
HVO	Hydrerad Vegetabilisk Olja
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change

IR-spektrometer infraröd spektrometer

KC Chalmers Kraftcentral

LabVIEW Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench

TGA Thermal Gravimetric Analysis

Termer

Analyter Föreningar som ska analyseras

Dysa En dysa är ett mekaniskt don konstruerat för att kontrollera en fluids flöde, när den lämnar en stängd kammare ut i ett medium av något slag.

Eluerat Kommit ut ur kolonnen

Flykt Gas som lämnar bränslet vid höga temperaturer

Frihetsgrad Hur många oberoende variabler som behövs för att entydigt ange läget för ett system

Nivå Värdena variabler antar, (+), (-)

1. Inledning

I detta stycke presenteras en kort bakgrund till varför projektet är intressant utifrån ett större perspektiv. Därefter beskrivs syfte och avgränsningar utifrån vilka arbetet med förgasaren ska ta hänsyn till. Slutligen följer en kort sammanfattning utifrån de förutsättningar arbetet hade inledningsvis.

1.1 Bakgrund

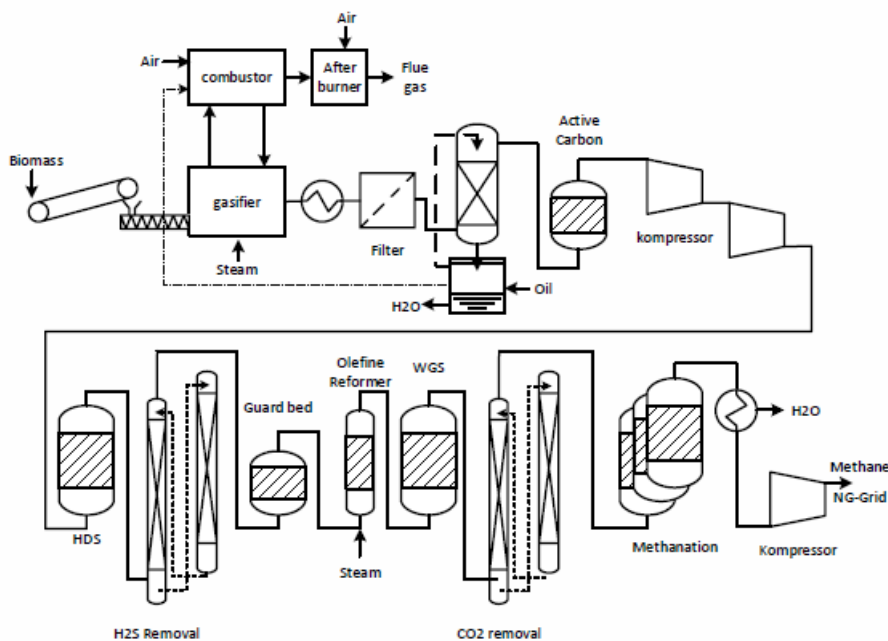
Klimatförändringar är en av vår tids största problem, med potentiellt katastrofala följder. En av de bidragande orsakerna till uppvärmning av jordklotet är halterna av koldioxid i atmosfären. Nivåerna har ökat stadigt från den pre-industriella nivån på 280 *ppm* till 2013 års 400 *ppm* [1]. Om inga åtgärder görs för att motverka utsläpp beräknar IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) att medeltemperaturen kommer att öka med minst 4 grader [2]. Exempel på problem en sådan temperaturökning kan leda till är bland annat smältande polarisar, höjda havsnivåer, frekventa oväder och miljontals klimatflyktingar. Utsläppen i storstäder leder dessutom till skador på den omgivande miljön och luft som är skadlig för både människor och djur.

För Sveriges del står transportsektorn för cirka 30% av de totala koldioxidutsläppen, vilket innebär att det finns stor förbättringspotential inom sektorn. För att motverka klimatförändringar och minska utsläppen har Sverige som mål att ha en koldioxidneutral energiproduktion 2050. Som ett delsteg på vägen är ambitionen att fordonsflottan ska vara fossilfri 2030 [3]. För att dessa mål ska uppnås i tid måste hållbara alternativ till de konventionella fossila bränslena finnas tillgängliga på marknaden.

Ett sådant alternativt bränsle är biometan, som kan användas som fordonsbränsle liknande hur naturgas används i dagsläget. Biogas har en hög energieffektivitet jämfört med övriga biodrivmedel [4]. Samtidigt avger förbränning av metan ytterst marginella utsläpp av kolmonoxid, kolväten, svavelförningar, kväveoxider och partiklar [4]. Detta kombinerat med en reduktion av koldioxidutsläpp på upp till 90% [4] jämfört med bensin innebär att biometan är en möjlig ersättning till fossila bränslen. En satsning på biogas inleddes av Göteborgs Energi 2010 då beslut om byggandet av en storskalig biogasanläggning fattades [5]. Anläggningen GoBi-Gas slog upp dörrarna 2014 och är en förgasningsanläggning där restprodukter från skogsbruk metaniseras genom termisk förgasning. När anläggningen går för fullt har

den kapacitet att producera 160 *GWh* per år [6]. Göteborg energi meddelade dock i slutet av Mars 2018 att projektet kommer att läggas ner [7].

Med GoBiGas-anläggningen som modell syftar serien med kandidatarbeten *Produktion av biobränsle till Chalmers EcoMarathon* att skapa en egen nedskalad modell för hur biometan kan produceras. Denna process innebär många olika steg, se Figur 1.1, och tar många år att färdigställa. Tidigare kandidatarbeten har fokuserat på senare steg i processen så som koldioxidavskiljning, vattengasskift och metanisering [8, 9, 10, 11]. Förhoppningen är att det biobränsle som produceras ska användas i fordon som tagits fram av Chalmers EcoMarathon.



Figur 1.1: Översiktsbild över de olika komponenterna som är en del av den modell serien av kandidatarbeten utgår ifrån. Återgiven med tillstånd [12].

Denna rapport kommer att ha fokus på förgasaren som är det första steget i processen och producerar den syngas som efterfrågas. Om förgasaren är optimerad kommer det ha positiva effekter i de senare stegen, bland annat i form av ett minskat processflöde och högre verkningsgrad. Arbetet med förgasaren inleddes av en annan kandidatgrupp 2017 då förgasaren dimensionerades, designades och konstruerades [13]. Förgasaren hann dock varken testas eller optimeras och sattes inte i drift. Förutom förgasaren utformades även en prototyp av ett bränsleinmatningssystem. En kort sammanfattning av utgångspunkten för årets kandidatarbete återfinns i Avsnitt 1.4. Årets kandidatarbete kommer att ta vid där förra året avslutades. Förgasaren ska installeras i en ugn i Chalmers Kraftcentral, testas, samt om möjligt optimeras med avseende på utflödets komposition. Målet är att uppnå ett högt utbyte av kol, samt att utflödet ska ha en hög andel syngas. De parametrar som kommer att testas är gasflöde, temperatur, koncentration av vattenånga på tillflödet samt förbehandling av bränsle.

Förgasaren kommer inte alltid att finnas i kraftcentralen då det långsiktiga målet är att hela processen ska vara portabel. De varnings-, kyl-, och reningssystem som finns att tillgå där kommer därför att behöva konstrueras. I detta arbete kommer grunden till ett sådant styr- och varningssystem att läggas.

1.2 Syfte

Syftet med detta kandidatarbete är att optimera det första steget i biometanprocessen. För att optimera förgasaren behöver tre delmål uppfyllas: att få förgasaren att fungera som det är tänkt, installera denna och slutligen att utföra experiment för att med avseende på utflödets komposition hitta de optimala processbetingelserna. Parallellt är målet att lägga en grund till vidare arbete med ett styrsystem som ska täcka hela den färdiga processen.

Det övergripande målet för denna serie av kandidatarbeten är att producera biometan genom en nedskalad version av den process som GoBioGas använder sig av i sin stora anläggning. Förhoppningen är att biometanen ska kunna användas som bränsle till de studentbyggda fordonen vid Chalmers EcoMarathon. Den nedskalade anläggningen kan dessutom användas i demonstrationssyfte och på så sätt bidra till ökad kunskap om biometan och biobränsle i allmänhet. Genom skapande av två planscher som ska visas upp vid en tävling i Paris, Shell Eco-marathon France, kommer information om processen att spridas ytterligare.

1.3 Avgränsningar

Eventuell uppskalning av processen kommer inte att behandlas i detta arbete då en sådan anläggning redan finns och inga planer finns på att skala upp just denna process. Hänsyn kommer därför inte att tas till eventuella ekonomiska konsekvenser eller optimeringar, då detta inte är relevant för den lilla skala arbetet utförs i.

Gruppen begränsar sig till att undersöka förgasaren och att räkna på de flöden som är direkt kopplade till denna. De processteg som är nedströms i den total processen kommer inte att tas upp i denna rapport. Förutsatt att förgasaren fungerar som tänkt kommer inga ytterligare förändringar eller analyser göras med avseende på designen. Optimeringen som utförs kommer endast att betrakta utbyte och komposition. Beslut har fattats kring att begränsa bränsle till tråkulator vars specifikationer återfinns i Avsnitt 3.4. Till den grad som är möjligt kommer montering, design och tester att ske i samarbete och rådgivning med yrkesprofessionella inom området.

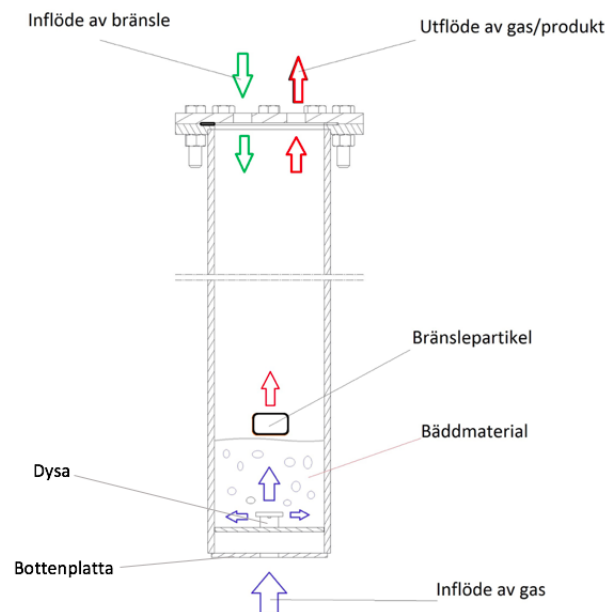
1.4 Förgasardesign och utgångspunkt för driftförhållanden

I detta stycke presenteras en kortfattad sammanfattning av vad som fanns att tillgå vid start av projektet. All information i detta avsnitt är hämtad direkt från Kandidatarbetet *Förgasning av träråvara för biometanproduktion* [13].

Utgångspunkten för design och konstruktion av förgasaren var följande produktionsmål: att producera tillräcklig mängd metangas för att fylla en tvåliterstank trycksatt till 70 bar på två timmar. Detta mål bestämdes utifrån specifikationerna för tävlingen Shell Eco-marathon. Samtliga delar till förgasaren presenteras i Avsnitt 1.4.1 nedan. De flesta delarna var lösa vid starten av årets kandidatarbete, förutom insatsplattan och underflänsen vilka redan hade svetsats fast i förgasarkammaren. I Avsnitt 1.4.2 presenteras rekommenderade förhållanden vid drift av den framtagna förgasaren.

1.4.1 Design och konstruktion

Förgasarens principiella funktion illustreras i Figur 1.2. Underifrån ska gas strömma genom en fluidiserad bädd. I toppen finns ett inflöde för bränsle och ett utflöde för produktgas. Förgasaren är ämnad att placeras i en ugn för att på så sätt tillföras den värme som är krävs för processen.



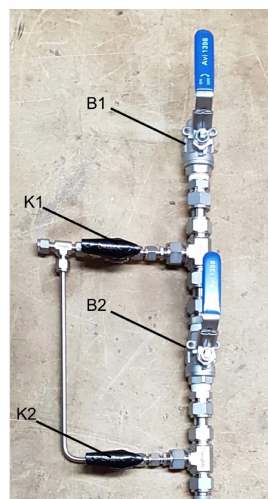
Figur 1.2: Principiell skiss över förgasaren. Underifrån flödar fluidiseringsgasen in och fördelas i bädden av gasfördelaren (blå pilar). Bränsle matas in ovanifrån (gröna pilar) och lägger sig på bädden för att sedan förgasas och föras ut genom produktflödet (röda pilar). Återgiven med tillstånd [13].

Förgasarkammaren utgörs av ett rör med höjden 600 mm , ytterdiametern $114,3\text{ mm}$ och innerdiametern $102,26\text{ mm}$. Kammaren är tillverkad i stål av typen 253-MA. Förslutningen i toppen utgörs av ett flänsförband, det vill säga en undre och en övre fläns med en kopparpackning emellan, se Figur 1.3. I toppen återfinns både bränsleinmatningssystem och gasutflödesrör med plats för ett så kallat termoelement, som används för att mäta temperaturen i förgasaren.



Figur 1.3: Till vänster: överfläns inklusive kopparpackning. De två hålen i mitten är till för bränsleinmatningssystem och gasutflödesrör. Till höger: underfläns fastsvetsad på förgasarkammarens topp. Vid montering sätts under- och överfläns ihop med bultar genom de tio hålen i ytterkant. Återgiven med tillstånd [13].

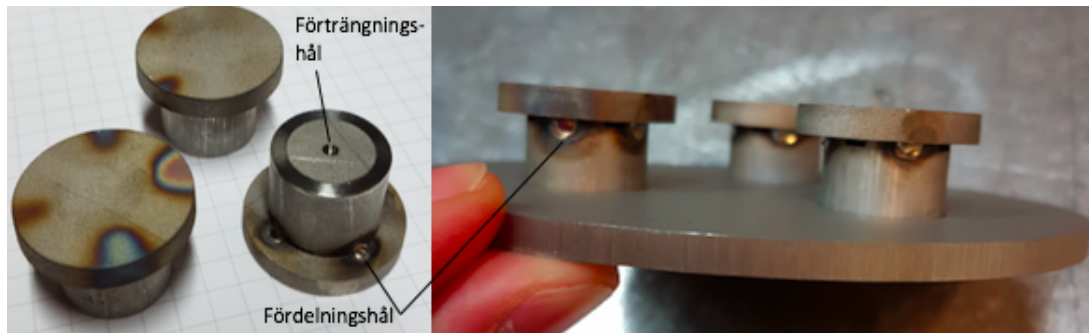
Bränsleinmatningssystemet, vilket illustreras i Figur 1.4, utgörs av två manuellt manövrerade hydraulventiler (B1 och B2) genom vilka bränslet slussas samt en kvävesluss (K1 och K2) som används för att undvika syretillförsel i matningen.



Figur 1.4: Bränsleinmatningssystem till förgasaren. Ventilerna B1 och B2 är bränsleventiler vars funktion är att slussa bränslet, som matas ovanifrån, ner till förgasaren. Ventilerna K1 och K2 är kväveslussventiler, dessa används för att tränga ut eventuellt syre som kommer in i systemet vid matning. Återgiven med tillstånd [13].

I botten av kammaren finns inflödesrör för fluidiseringsgasen samt en bottenplatta, vilken är fastsvetsad i förgasarkammarens botten. 20 mm ovanför bottenplattan

sitter en gasfördelare som består av en insatsplatta med tre fastsvetsade dysor, se Figur 1.5. I botten av varje dysa finns ett gasinflödeshål, eller förträngningshål, med en diameter på 1 mm . Tanken är att gasen ska färdas upp genom den ihåliga dysan och fördelas genom de fyra fördelningshålen, vars diameter också är 1 mm , som finns på sidorna av dysan. Avståndet mellan två dysor är 43 mm .



Figur 1.5: Till vänster: två stycken stående dysor och en uppochnedvänd dysa. På den uppochnedvända dysan ses två av fördelningshålen på dysans sida samt förträngningshålet i dysans botten. Till höger: Insatsplatta med dysor. Även här ses några av fördelningshålen medan förträngningshålen inte syns då de sitter undertill. Gasen färdas underifrån genom de ihåliga dysorna för att sedan fördelas i bädden genom fördelningshålen. Återgiven med tillstånd [13].

1.4.2 Rekommenderade driftförhållanden

I Tabell 1.1 presenteras olika uppskattade parametrar, varav de fem första har beräknats genom teoretiska samband. Massflödet bestämdes genom en molbalans över hela processen utifrån produktionsmålet. I molbalansen antogs bränslets sammansättning vara den för barkpellets, $\text{CH}_{1,28}\text{O}_{0,55}$, då detta bränsle avsågs att användas i processen. Det antogs också att varje barkpellets hade en massa av ungefär 1 g. Den ungefärliga uppehållstiden bestämdes genom förgasningsexperiment, där blomsterpinnar användes som bränsle, i en redan befintlig förgasare.

Tabell 1.1: Uppskattade parametrar [13].

Minsta fluidiseringshastighet [m/s]	0,002
Minsta fluidiseringsflöde [Nl/min]	0,3
Högsta fluidiseringsflöde [Nl/min]	113
Tryckfall över bädden [kPa]	1,5
Energiförbrukning [kW]	<2
Massflöde bränsle [kg/h]	0,14
Upphållstid [min]	ca 10

Genom molbalans och utförande av förgasningsexperiment togs rekommenderade driftförhållanden fram gällande temperatur, tryck, matningsfrekvens och flöden för den förgasare som designats. Dessa driftförhållanden presenteras i Tabell 1.2 nedan.

Tabell 1.2: Rekommenderade driftförhållanden [13].

Temperatur [$^{\circ}C$]	920
Tryck [atm]	1
Tillflöde vattenånga [Nl/min]	2,2
Matningsfrekvens [$pellets/s$]	1/30
Fluidiseringsflöde [Nl/min]	> 5,60

2. Teori

I detta avsnitt behandlas teori kring förgasning av biomassa, en förgasares funktion och hur en fluidiserad bädd kan påverka prestandan. Utöver detta beskrivs teori gällande hur en gas kan analyseras samt hur en försöksplanering genomförs.

2.1 Biogas ur bioråvara

Biobränslen kan produceras av många olika råvaror och processer. Utsläpp och effektivitet vid förbränning av biobränsle kan därför variera. I Sverige är rötning den vanligaste metoden för att producera biogas, där organismer bryter ner organiska ämnen i en anaerob miljö. Den resulterande gasen har då en metanhalt på ungefär 55% [14], resten är mest koldioxid med lite vatten och restprodukter. Innan gasen kan användas till bränsle ökas energivärdet genom att koldioxiden tas bort. De råvaror som används vid rötning är till exempel matavfall, gödsel, jordbruksprodukter eller slam från reningsverk. I Sverige stod så kallade samröttningsanläggningar och avloppsreningsverk för sammanlagt 82% av produktionen av biogas 2016 [15]. Majoriteten av biogasen, ungefär 64%, användes sedan till fordonsbränsle [15].

Detta kandidatarbete har fokus på första steget i en biometanprocess som kallas termisk förgasning. Termisk förgasning inleds med att råvaran förgasas till vätgas, kolmonoxid, metan, koldioxid, vatten och högre kolväten. Efter den termiska förgasningen måste gasen renas och metaniseras för att få tillräckligt högt energivärde. Den slutgiltiga produkten kallas biometan eller Bio-SNG (*Substitute Natural Gas*). Denna gas kan sedan distribueras och användas i samma nätverk som naturgas används idag.

Vid produktion av råvara i syftet att tillverka bioenergi är det många parametrar som bör tas i beaktning. Energi och markanvändning inom jordbruket är ett par av de viktiga parametrar som lyfts av Sveriges lantbruksuniversitet i rapporten *Ekologisk produktion och klimatpåverkan - En sammanställning av kunskapsläge och framtida forskningsbehov* [16]. Det krävs energi för att producera de grödor från vilka man kan utvinna energi, till exempel på grund av användande av bevattningsanläggningar, traktorer och liknande maskiner. För att produktionen av bioenergi ska vara nettopositiv krävs därför att dessa maskiner är relativt energisnåla. I USA krävs det till exempel energi motsvarande nio liter etanol för att producera 10 liter etanol från grödor [17]. Det gäller också att vara lite försiktig gällande vilket

bränsle maskinerna drivs på. Om dessa drivs av fossila bränslen blir minskningen av koldioxid mindre än om de drivs på biodrivmedel. Skogsråvaror kräver generellt sätt mindre användning av maskiner under tillväxten och innebär mindre utsläpp av koldioxid under produktion [18].

I samband med diskussion om odling av grödor i syfte att producera bränsle är det relevant att lyfta frågan om matbrist i världen. Det beräknades att drygt 800 miljoner människor var kroniskt undernärda 2017 [19], men att producera mer mat är kanske inte en lösning. FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) uppskattade i sin rapport *Global food losses and food waste - Extent, causes and prevention* från 2011 att 1,3 biljoner (10^{12}) ton mat slängs varje år [20]. Samtidigt har antalet människor som lever med fetma nästan tredubblats sedan 1975 [21]. Detta tyder på att det rör sig om en sned fördelning av resurser snarare än brist på dem. Det finns dock studier som tyder på att en ökad produktion av etanol i USA leder till ökade matpriser i fattigare delar av världen [22].

Vilka råvaror som används kan ha stor betydelse för slutproduktens miljöbelastning. Att använda restprodukter som råvara kan till exempel vid vissa metoder för livscykelanalys beräknas ge negativa koldioxidutsläpp [4]. Överlag är bibränslen som baseras på skogsråvara eller restprodukter miljövänligare än de som produceras av grödor [18]. Produktion av HVO (*Hydrerad Vegetabilisk Olja*) tillverkad av raps släpper till exempel ut nio gånger mer koldioxid än produktion av HVO tillverkad av tallolja [18]. Huruvida användningen av grödor till att producera bibränslen är något att fokusera på är alltså en mycket komplicerad fråga utan entydigt svar. Det tycks dock vara bra att satsa på restprodukter från skogsindustrin utifrån samtliga perspektiv.

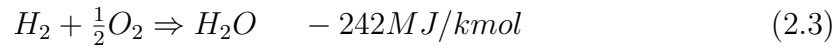
2.2 Förgasning

Förgasning definieras enligt Nationalencyklopedin som "*överföring till gasform av framför allt fast material, men även vätskor, med eller utan kemisk förändring av ingående ämnen.*" [23]. Som Higman och Burgt påpekar i *Gasification (2nd Edition)* [24] brukar det dock mer specifikt handla om produktion av gas med bättre värmevärde än den kolhaltiga råvaran som användes som bränsle. Att omvandla ett bulkigt fast bränsle likt ved och pellets till gasform gör det dessutom mer lätthanterligt och användbart i processer.

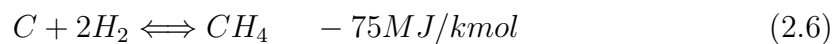
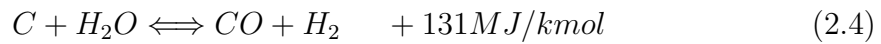
Nedan presenteras de reaktioner som är typiska för en förgasningsprocess, med dessa reaktioner som grund presenteras sedan själva förgasningsprocessen.

2.2.1 Reaktioner

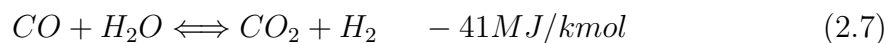
Reaktionerna 2.1 - 2.3 nedan är förbänningsreaktioner där alla är kraftigt exoterma. Förbränning är den process där syre reagerar med ett brännbart ämne och frigör energi.



De reaktioner där det kolhaltiga kokset reagerar och bildar gas kallas för förgasningsreaktioner. De viktigaste förgasningsreaktionerna i detta arbete är listade i Reaktion 2.4 - 2.6 nedan. Till dessa förgasningsreaktioner bör även Reaktion 2.1 läggas då det är både en förgasningsreaktion och en förbränningsreaktion.



Reaktion 2.7 -2.8 nedan är viktiga och har stor påverkan på gasens slutliga sammansättning. Reaktion 2.4 - 2.8 är huvudsakligen endoterma vilket innebär att en extern värmekälla krävs och en god värmeöverföring är av stor vikt.



2.2.2 Förgasningsprocessen

När ett kolhaltigt ämne introduceras i en förgasningsprocess kommer det att gå igenom olika steg allt eftersom att materialet hettas upp. Först kommer all fukt i biomassan att förångas, vilket inte nämnvärt påverkar sammansättningen på biomassan. Efter det börjar pyrolysen, också kallat torrdestillationen. Här börjar biomassan brytas ner och flykt släpps ut i gasfas. Flykten består huvudsakligen av CO_2 , CO , CH_4 och H_2 samt mindre mängder av andra ämnen som till exempel NH_3 och N_2O . Under pyrolysen sker den största minskningen av fast biomassa. Störst del av pyrolysen sker vid temperaturer runt 200-430 °C, men den försätter i mindre utsträckning vid högre temperaturer [25].

Efter pyrolysen kan förgasningsreaktionerna (Reaktion 2.1 samt 2.4 - 2.6) påbörjas förutsatt att de nödvändiga reaktanterna finns tillgängliga. I förgasningsreaktionerna tillåts koksen reagera och här genomgår biomassan sin sista viktminskning. Den biomassa som inte reagerat är aska och kan motsvara allt mellan 1% och 16% av den totala biomassan [25].

Vanligtvis brukar förgasning vara en av två typer: ren pyrolysis eller partiell förbränning. Vid ren pyrolysis sker inga förgasningsreaktioner utan endast flykten extraheras. Det blir då kvar koks efter att pyrolysen avslutats och mindre av råvarans energivärde används jämfört med vid partiell förbränning. Pyrolysis sker under avsaknad av syre vilket gör att ingen exoterm förbränning sker och det behövs därför en ugn som tillför värme för att driva processen.

Partiell förbränning sker vid ett underskott av syre för att få till en ofullständig förbränning av kolet enligt Reaktion 2.1 - 2.3. Samtliga av dessa reaktioner är exoterma vilket hjälper till att driva förgasningsreaktionen framåt utan något behov av en ugn. I partiell förbränning används koksen på så sätt upp i både förbrännings- och förgasningsreaktioner. Ofta används kvävgas som bärgas och måste då renas bort efteråt. Resultatet av partiell förbränning är CO, H₂ och CO₂ där i princip all energi i råvaran använts. Dock har en del av råvarans energin förlorats för att brännas och hålla processen varm.

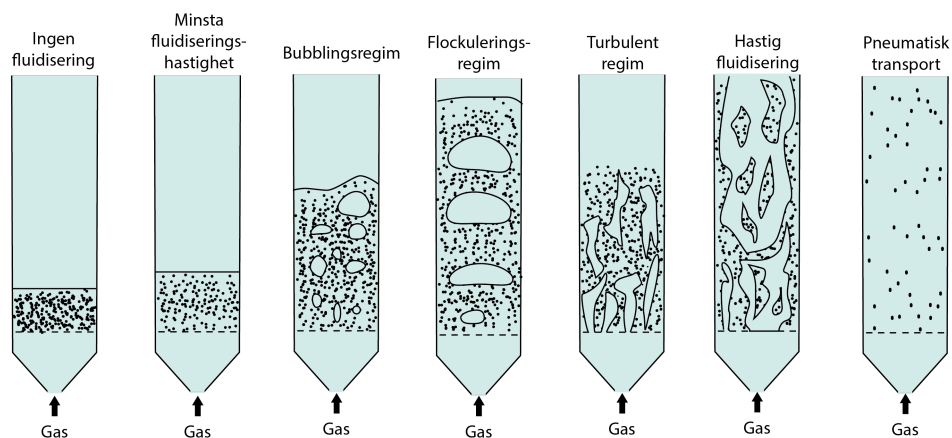
I detta arbete följer processen varken ren pyrolysis eller partiell förbränning utan är snarare en kombination av båda. Reaktionerna i förgasaren sker utan någon syrgas närvarande och måste därför drivas av en ugn likt fallet med ren pyrolysis. Samtidigt tillåts alla kolhaltiga ämnen oxideras likt fallet med partiell förbränning. Oxidationen sker då endast med hjälp av Reaktionerna 2.4 - 2.6. Eftersom oxidationen sker utan syre kommer ingen koldioxid skapas vid förgasningsreaktionerna, dock kan koldioxid fortfarande skapas via pyrolysis eller Reaktion 2.7.

I processen tillsätts mycket vatten för att ge hög selektivitet av Reaktion 2.4 som är den viktigaste. Ett tecken på att Reaktion 2.4 fått gå långt är en hög halt av kolmonoxid och vätgas vilket är de önskade produkterna i detta förgasningssteg. Dessa två komponenter kommer i ett senare steg kunna reagera vidare till den önskade slutprodukten metan genom Reaktion 2.8. För detta krävs ett förhållande på 3:1 mellan vätgas och kolmonoxid. Koldioxid är en oönskad produkt och därför skall helst inte Reaktion 2.7 ske alls.

2.3 Fluidisering i förgasare

För att i förgasningsprocessen uppnå god omrörning, en jämn temperaturprofil och därmed en mer energieffektiv process, kan förgasare som innehar en så kallad fluidiserad bädd användas [26]. En fluidiserad bädd skapas då en gas eller vätska underifrån flödar genom en bädd av fasta partiklar. Vid en viss hastighet, kallad minsta fluidiseringshastighet, blir lyftkraften från den strömmande fluiden större än tyngd-

kraften från de fasta partiklarna. Detta gör att de fasta partiklarna lyfter och får fluidliknande egenskaper. Beroende på hur hög hastigheten är kommer bädden befinna sig i olika så kallade fluidiseringsregimer, vilka presenteras i Figur 2.1. Vid låg hastighet expanderar bädden, för att sedan gå över i olika bubblande regimer efter minsta fluidiseringshastighet. Då hastigheten höjs ytterligare kommer den tillslut bli tillräckligt stor för att de minsta bäddpartiklarna ska följa med gasströmmen ut ur förgasaren. Detta sker i hastig fluidiserings-regimen. Vid ännu högre hastighet kommer även de större bäddpartiklarna följa med gasströmmen vilket resulterar i att allt bäddmaterial lämnar förgasaren genom så kallad pneumatisk transport [27].



Figur 2.1: Schematisk bild över olika fluidiseringsregimer med ökande fluidiseringshastighet åt höger. Längst åt vänster är bädden fortfarande fix då hastigheten är låg. I nästa pelare har minsta fluidiseringshastighet uppnåtts och bädden har börjat fluidisera, vilket följs av bubblingsregimen och därefter flockuleringsregimen där den högre hastigheten gör att bubblorna blir större och strömmar mer symmetriskt genom bädden. I den turbulenta regimen är hastigheten nästan så hög att de minsta bäddpartiklarna följer med ut ur förgasaren. Då hastigheten ökas ytterligare uppnås just detta i hastig fluidiserings-regimen, vilket följs av regimen av pneumatisk transport där allt bäddmaterial lämnar förgasaren.

I förgasare som har fluidiserade bäddar används gas som fluidiseringsmedium. Det finns huvudsakligen två olika typer av sådana förgasare: Bubblande Fluidiserad Bädd (BFB) och Cirkulerande Fluidiserad Bädd (CFB) [28]. I en CFB befinner sig bädden i hastig fluidiserings-regimen vilket innebär att en viss andel bäddmaterial följer med gasströmmen ut ur förgasaren och cirkuleras i en cyklon för att sedan återvända till bädden. I en BFB är gashastigheten lägre, där befinner sig bädden i någon av regimerna mellan minsta fluidiseringshastighet och turbulent fluidisering. Fördelarna med en CFB jämfört med en BFB är att den medför bättre omsättningsgrad av kolbränslet då omrörningen, och därmed värmeöverföringen, är bättre. Den förgasare som i detta kandidatarbete ska optimeras är dock av BFB-typ med anledning av att en BFB har betydligt enklare design än en CFB. Utöver den enkla designen är fördelen med en BFB att den inte kräver lika höga gasflöden

som en CFB samtidigt som den fortfarande har god värmeöverföring och omrörning.

För att eventuella tryckskillnader i bädden inte ska påverka gasflödet samt för att undvika stagnanta, det vill säga stillastående, zoner i bädden är det viktigt att er-hålla en jämn fluidisering. Detta uppnås genom att ha en gasfördelare med förträngningar i botten av förgasaren. Gasfördelaren distribuerar gasflödet jämnt i bädden samtidigt som den skapar ett tillräckligt stort tryckfall för att motverka ovan nämnda effekter. För en förgasare i industriell skala ska tryckfallet över förträngningarna enligt P. Basu vara 15-30% av det totala tryckfallet över bädden [29]. För en förgasare i labbskala anser däremot Bo Leckner att tryckfallet över förträngningarna ska vara lika stort som tryckfallet över bädden [13].

För att experimentellt kunna undersöka huruvida bädden är fluidiserad så kan en graf över tryckfall mot flödes hastighet konstrueras. Då bädden ännu ej har fluidiserats ökar tryckfallet med flödes hastigheten i ett nära linjärt samband. Då minsta fluidiseringshastighet har uppnåtts kommer tryckfallet plötsligt minska. Vid fortsatt fluidisering ökar trycket återigen, dock är ökningen mycket långsammare än innan fluidisering [30].

2.3.1 Minsta fluidiseringshastighet och tryckfall

För att dimensionera förträngningshålen i gasfördelaren behövs kännedom om bäddens minsta fluidiseringshastighet, U_{mf} , bäddens totala tryckfall, ΔP_{tot} , samt tryckfallet över förträngningarna, ΔP_h . U_{mf} kan uppskattas genom sambandet i Ekvation 2.9 [30]. μ är fluidens viskositet, ρ_g är dess densitet och d_{sf} är den diameter bäddpartikeln skulle haft om den vore en sfär med samma volym.

$$U_{mf} = \frac{\mu}{\rho_g d_{sf}} (\sqrt{33.7^2 + 0.0408 Ar} - 33.7) \quad (2.9)$$

Ar är Archimedes tal och definieras enligt Ekvation 2.10, där ρ_p är bäddpartiklarnas densitet och g är tyngdaccelerationen.

$$Ar = \frac{\rho_g d_{sf}^3 (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (2.10)$$

ΔP_{tot} kan bestämmas genom Ekvation 2.11, där F är bäddens tyngdkraft och A är tvärsnittsarean mot vilken bädden vilar. Detta samband gäller under antagande att tryckfallet över en bädd som precis har börjat fluidisera är lika stort som tryckfallet över en löst packad icke-fluidiserad bädd [26].

$$\Delta P_{tot} = \frac{F}{A} \quad (2.11)$$

För att bestämma hastigheten genom förträngningarna, U_h , i gasfördelaren kan Ekvation 2.12 användas [31]. ΔP_h är tryckfallet över gasfördelaren och C_D är förträngningarnas motståndskoefficient.

$$U_h = C_D \left(\frac{2 \Delta P_h}{\rho_g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

Motståndskoefficienten C_D kan bestämmas som funktion av Reynoldstalet, Re_t , för gasen innan gasfördelaren enligt Tabell 2.1.

Tabell 2.1: Motståndskoefficient som funktion av Reynoldstal [32].

Re_t	100	300	500	1000	2000	>3000
C_D	0,68	0,70	0,68	0,64	0,61	0,60

Re_t beräknas genom Ekvation 2.13, där d_t är förgasarens diameter. U_o är gashastigheten innan gasfördelaren och behöver vara minst lika stor som U_{mf} för att bädden ska fluidiseras.

$$Re_t = \frac{d_t U_o \rho_g}{\mu} \quad (2.13)$$

Slutligen kan sedan diametern på förträngningshålen, d_h , bestämmas genom Ekvation 2.14, där \mathbf{N}_h är antal förträngningshål per kvadratmeter.

$$d_h = \left(\frac{4U_o}{\pi U_h \mathbf{N}_h} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

2.4 Bäddmaterial

De partiklar som finns i en fluidiserad bädd kallas för bäddmaterial och består oftast av mineral. Vilken typ av bäddmaterial som väljs kan ha stor betydelse för processbetingelser och utflödeskomposition. Storlek, form och densitet på partiklarna kan till exempel påverka minsta fluidiseringshastighet enligt Ekvation 2.9. Beroende på dess kemiska egenskaper kan partiklarna även ha katalytiska egenskaper som påverkar kompositionen på utflödet. Att välja rätt bäddmaterial kan därför ha påverkan på effektiviteten i förgasningen. Bäddmaterial bör väljas baserat på önskvärda mekaniska, kemiska och ekonomiska egenskaper [33].

Mekaniskt önskvärda egenskaper är till exempel att bäddmaterialet ska klara de höga temperaturer och stora temperaturförändringar vid start och stopp som ofta finns i en förgasare. För att inte bäddmaterialet ska behöva bytas ut mer än nödvändigt är det även bra att använda sig av ett slitstarkt material som klarar av fluidiseringen. De kemiska och katalytiska egenskaperna kan öka utbytet av önskvärda produkter och minska mängden tjära som bildas [33]. Små partiklar innebär att fluidisering kan ske med lägre hastighet, nackdelen är dock att de lättare kan följa med gasströmmen ut ur förgasaren. Ekonomiska egenskaper handlar om att materialet ska vara lätt att utvinna och finnas i stora mängder för att driva ner priserna.

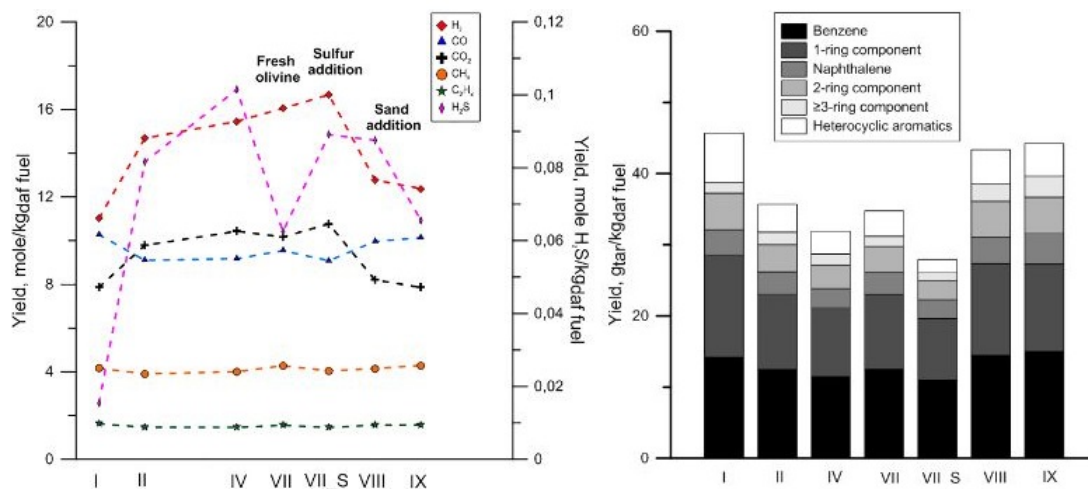
I detta arbete kommer olivin att användas som bäddmaterial. Detta material bedömdes lämpligt då det klarar av de temperaturer som krävs samtidigt som det fanns tillgängligt i passande partikelstorlekar. Olivin är ett naturligt förekommande, grönfärgat och slitstarkt material. De katalytiska egenskaperna minskar bildandet

av tjära och påverkar sammansättningen av utflödet. Dessa katalytiska egenskaper behöver dock aktivieras till exempel genom tillsättning av kaliumsalter eller genom åldring i bädden.

2.4.1 Aktivering

Aktivering av bäddmaterial kan ske på två sätt: genom åldring i förgasaren eller direkt aktivering genom tillsatser. Åldring innebär att bäddmaterialet anrikas av oorganiska ämnen, framförallt kalcium och kalium, allteftersom förgasaren är i drift. Aktivering genom tillsatser sker oftast med alkalialter och innebär en mer direkt påverkan.

Hur olivins katalytiska egenskaper förändras efter aktivering undersöks utförligt i i Jelena Maric's doktorsavhandling *Choice of bed material: a critical parameter in the optimization of dual fluidized bed systems* [33]. I avhandlingen noterades att åldrat bäddmaterial innebar en markant ökning av mängden producerad H_2 , se Figur 2.2. För övriga gaser som är intressanta i en metaniseringsprocess som CH_4 och CO_2 håller sig mängden relativt konstant medan CO minskar något. En markant skillnad noterades dock i mängden producerad tjära. Efter fyra dagar hade denna minskat med 30% [33].

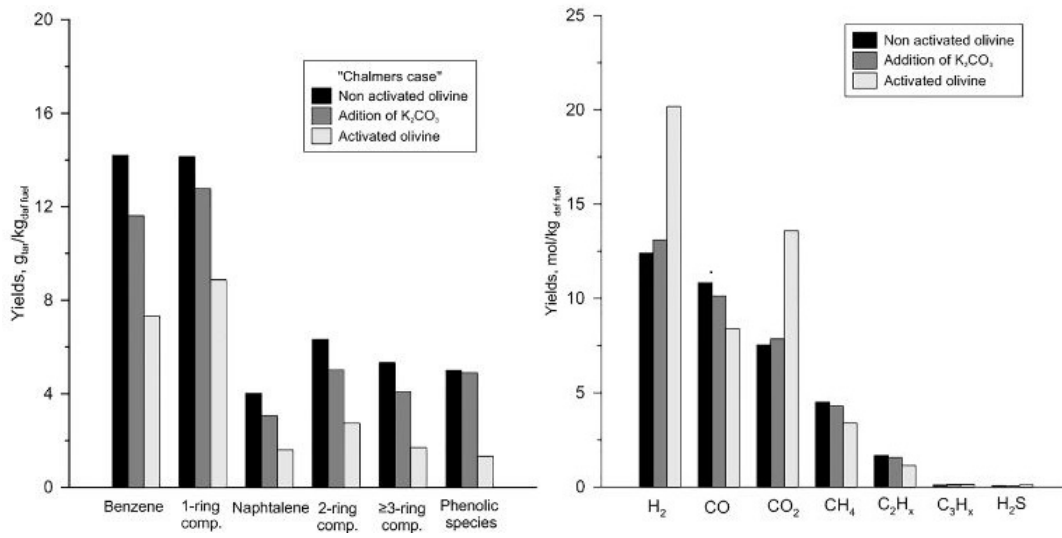


Figur 2.2: Testresultat från åldring av olivin över flera dagar. Till vänster presenteras komposition i utflöde, medan bilden till höger visar hur mängden olika tjäror förändrades. Vid punkt IV byttes delar av bäddmaterialet ut mot färsk olivin. Vid VII_S adderades svavel och vid VIII lades kiselsand till bädden. Den höga svavelhalten beror på fel i utrustningen och anses inte representativ. Återgiven med tillstånd [33].

Kalium som katalysator vid förgasning av biomassa är ett välstuderat fenomen. Genom att tillsätta kaliumkarbonat (K_2CO_3) uppnås i teorin direkt aktivering av bäddmaterialet. I Marics fall tillstattes även svavel, vilket benäms som "Activated olivine" i Figur 2.3. Svavlet tillsätts för att reducera halten KOH som skapas i Reaktion 2.16. KOH är nämligen väldigt flyktigt under förgasningsförhållanden, men

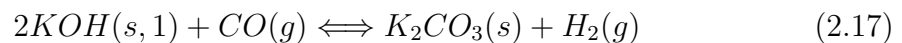
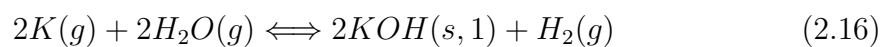
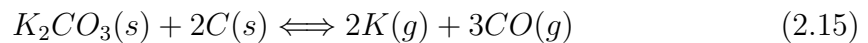
genom att tillsätta svavel skapas istället K_2SO_4 . Effekten av detta blir att kaliumet i K_2SO_4 -partiklarna bevaras i förgasaren och sönderfaller endast under väldigt reducerande förhållanden, vilket i förgasaren endast existerar nära bränslepartiklarna [12].

I sin avhandling noterar Maric tydliga skillnader före och efter aktiveringen av bäddmaterialet, se Figur 2.3. Redan efter en dag hade mängden producerad tjära minskat med 52% [33]. Markant skillnad märkes även i processflödet då mängden H_2 och CO_2 ökar. En viss minskning noterades dock i utbytet av CO .

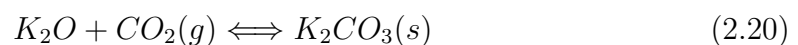
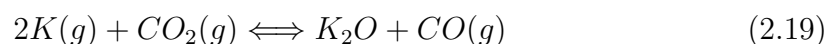
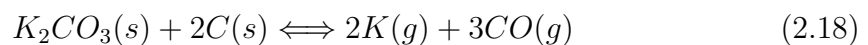


Figur 2.3: Testresultat från aktivering av olivin. Till vänster presenteras förändringen av tjärkompositionen, medan bilden till höger visar hur kompositionen i utflödet förändrades. Som kan ses så ökade mängden producerad H_2 och CO_2 markant, samtidigt som mängden tjäror minskade. Återgiven med tillstånd [33].

Dessa effekter kan beskrivas med kaliumkarbonatens katalyserande reaktionssteg för ånga:



Vätgas skapas som produkt i två utav reaktionsstegen, samtidigt som kolmonoxiden som bildas i första steget sedan kan reagera tillbaka till kaliumkarbonat i det sista [34]. Ökningen av koldioxid beror på den motsvarande reaktionväg som finns för koldioxid enligt följande:



Eftersom ovanstående reaktioner är jämviktsreaktioner, samt att systemet matas med ånga så sker Reaktion 2.20 och 2.19 åt vänster i större utsträckning vilket resulterar till en ökad produktion av koldioxid och minskad andel kolmonoxid [35].

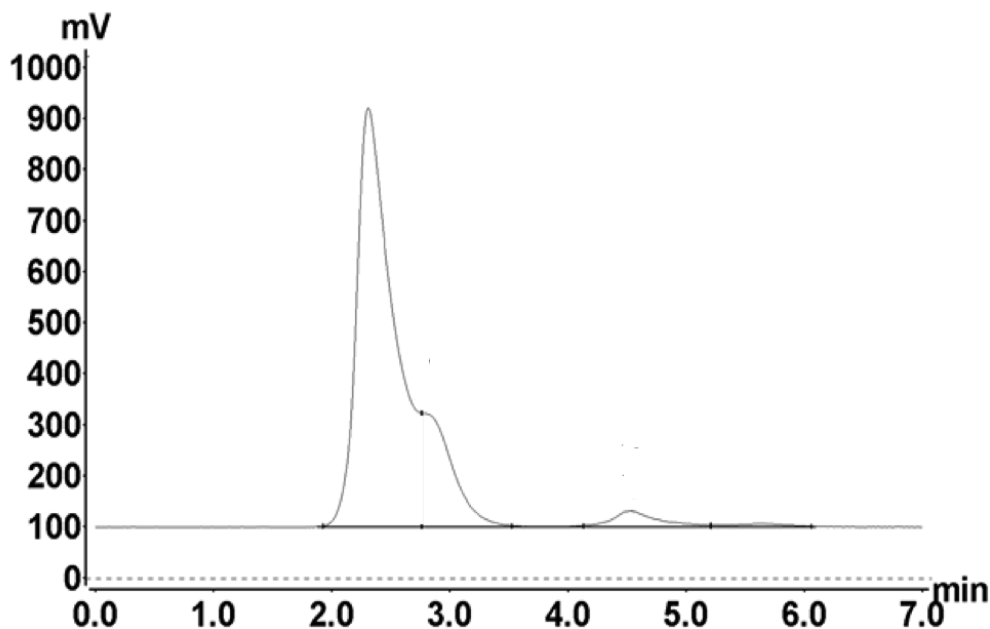
2.5 Separations- och analysmetoder

Det finns många metoder för att separera och detektera komponenter i gas- och vätskeprover, vilket kommer diskuteras i följande avsnitt. I Avsnitt 2.5.1 behandlas separationsmetoden gaskromatografi och i Avsnitt 2.5.2 behandlas konduktivitetsdetektion

2.5.1 Gaskromatografi

Kromatografi är inom den analytiska kemin en vanlig metod för att separera analyter, det vill säga föreningar som ska analyseras, i ett prov. Metoden bygger på att ämnena man vill separera har olika egenskaper, till exempel olika kokpunkt, polaritet, storlek eller laddning. Provet med analyterna löses i en så kallad mobilfas, som ofta är i gas- eller vätskefas. Denna transporteras sedan genom en stationärfas. På grund av att analyterna interagerar olika mycket med den mobila respektive stationära fasen kommer de att separeras från varandra [36].

Då de separerade analyterna har eluerat, alltså kommit ut ur kolonnen, observeras de av någon form av detektor. Detektorresponsen presenteras sedan i ett så kallat kromatogram där de olika analyterna visas som en topp vid den tiden de eluerat. Arean under toppen är proportionerlig mot halten av analyten, se Figur 2.4.



Figur 2.4: Exempel på ett kromatogram. På y-axeln visas detektorrespons i millivolt, mV och x-axeln visar tid i minuter.

Tiden det tar från det att ett ämne injicerats i kromatografen tills dess att det

eluerar kallas retentionstid, t_r . Den justerade retentionstiden, t_r' definieras enligt Ekvation 2.21, där t_m är tiden det tar för den mobila fasen att eluera.

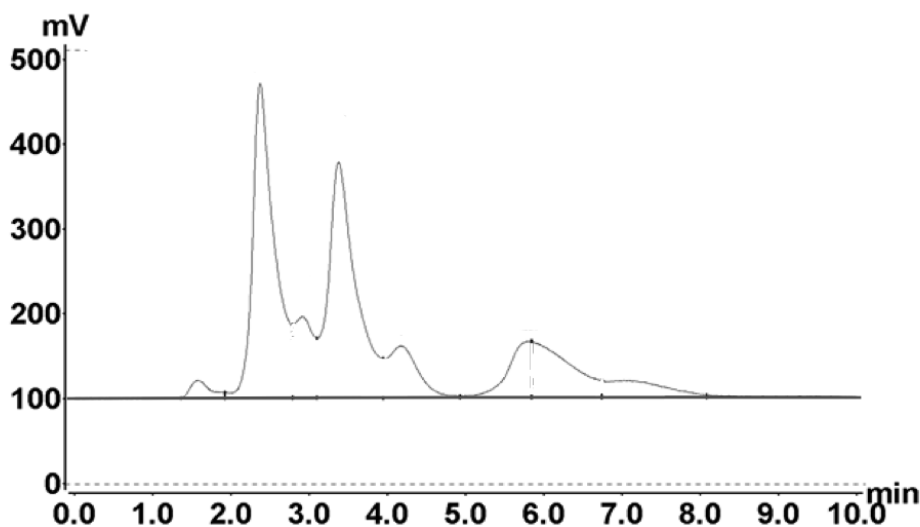
$$t_r' = t_r - t_m \quad (2.21)$$

Om retentionstiden för en viss analyt i en specifik stationärfas är känd kan okända analyter identifieras i ett prov, genom att jämföra de retentionstider som kan avläsas i kromatogrammet med kända retentionstider [36].

Hur effektiv separationen av analyter är beror på två parametrar, skillnad i elueringstid samt bredden på topparna i kromatogrammet [36]. Ett mått på effektivitet är upplösning, R_s , som definieras enligt Ekvation 2.22. Δt_r är skillnad i retentionstid för två toppar och w_{av} är genomsnittsbredden av de två topparna.

$$R_s = \frac{\Delta t_r}{w_{av}} \quad (2.22)$$

Om R_s inte är tillräckligt stor betyder det att topparna överlappar varandra, se Figur 2.5. Detta leder till problem att skilja topparna åt och det går inte att veta exakt hur stor arean under topparna som korresponderar till de olika analyterna. Halten av de olika ämnena blir då svår att beräkna. För att få fullständig separation bör $R_s \geq 1,5$ [36].



Figur 2.5: Kromatogram där flera av analyterna eluerat för nära varandra i tid, vilket leder till att de korresponderande topparna överlappar varandra.

En form av kromatografi är gaskromatografi, där provet förs fram med hjälp av den rörliga fasen genom en kolonn med stationär fas. Den mobila fasen är inertgas, vanligen Ne, N₂ eller H₂ och den stationära fasen varierar beroende på om kolonnen är av typen öppen kolonn eller packad kolonn. I en öppen kolonn är väggarna täckta av en tunn vätskefilm medan en packad kolonn är fylld med fina partiklar täckta av en

icke flyktig vätska [37]. Innan analyterna och den mobila fasen injiceras i kolonnen går de igenom en ugn så att provet förgasas. De krav som ställs på analyterna i en gaskromatograf är att de ska vara flyktiga och termiskt stabila.

I en öppen kolonn, även kallad kapillärkolonn, separeras ämnena med avseende på deras flyktighet. De som är mindre flyktiga hamnar i större utsträckning i den stationära fasen och eluerar då långsammare. I en packad kolonn separeras ämnena med avseende på polaritet. Om ämnena som ska separeras är polära ska polärt packningsmaterial väljas och om analyterna är opolära ska packningsmaterialet också vara det. De analyter vars polaritet är mest lik den stationära fasens kommer att interagera mest med denna och därför eluera långsammast [37].

En öppen och en packad kolonn skiljer sig åt med avseende på fleratalet egenskaper. En kapillärkolonn är dyrare och kan hantera en mindre provvolym jämfört med en packad kolonn. Den är även längre än packade kolonner, vilket leder till ett högre upplösning. En packad kolonn har dessutom längre analysid än en kapillärkolonn [37].

Elueringsstyrkan i gaskromatografi, alltså det som påverkar hur snabbt elueringen sker, är kolonntemperaturen. Genom att ha en högre temperatur kommer topparna att eluera snabbare, nackdelen är att topparna blir sämre separerade och alltså svårare att skilja ifrån varandra. Vid lägre temperatur går elueringen långsammare och topparna blir breda, vilket gör dem svårare att analysera [37]. För att förkorta elueringstiden och samtidigt erhålla smala, separerade toppar kan så kallad gradient eluering användas, vilket innebär att elueringstemperaturen höjs efter hand.

2.5.2 Konduktivitetsdetektor

Då analyterna eluerat finns flera metoder för att både kvalitativt och kvantitativt undersöka provet, en av dessa metoder är termisk konduktivitetsdetektor. Man utnyttjar då att konduktiviteten hos samtliga analyter är lägre än den hos bärgasen. Vid eluering kommer detektorn alltså känna av en minskning i konduktivitet.

Denna typ av detektion lämpar sig bäst för packade kolonner och är en så kallad universell metod, vilket innebär att den kan detektera alla typer av analyter. Nackdelen med en konduktivitetsdetektor är att känsligheten är något lägre jämfört med andra metoder [37].

2.6 Försöksplanering och modellbeskrivning

Försöksplanering används för att på ett strukturerat sätt ställa upp och utföra experiment. Detta krävs för att kunna utläsa önskvärda resultat, eftersom slumpvisa försök leder till slumpvisa mätningar, och således slumpvisa resultat. För de undersökningar som utförs i detta projekt kommer en så kallad 2^k *Factorial Design* att

användas. I detta tillvägagångssätt undersöks k stycken olika variabler, så som temperatur och tryck. Varje variabel undersöks vid två olika värden, exempelvis 300 och 400 K respektive 1 och 10 bar . Värdena variablerna antar kommer fortsättningsvis kallas dess nivåer. I boken *Design and Analysis of experiments* anges proceduren presenterad i Tabell 2.2 som lämplig att använda vid *Factorial Design* [38].

Tabell 2.2: Procedur för analys av 2^k design.

1. Bestäm variabler som ska undersökas och dess nivåer
2. Formulera en första modell
3. Utför statistiska tester på data
4. Förfina modellen
5. Undersök residualer
6. Tolka resultatet

När variablerna har bestämts sätts de två nivåerna till, för experimenten rimliga, övre och undre värden för vardera variabel. Nivåerna benämns plus (+) och minus (-) för den övre respektive undre nivån. Dessutom sätts en nollnivå, (0), vilken ges av medelvärdet av (+) och (-)-nivåerna. Nollnivåns syfte är att säkerställa att inga icke-linjära samband missas. Dessutom bidrar nollnivån med frihetsgrader vilket gynnar noggrannheten när konfidensintervall skapas.

När de olika nivåerna har bestämts ansätts en första modell enligt steg två i Tabell 2.2. Modeller kan vara både linjära och icke-linjära. För en första uppskattning av hur en process ser ut räcker dock en simpel linjär polynommodell [39]. Ekvation 2.23 beskriver en linjär, fullständig modell av hur en storhet y beror på tre olika variabler, x_1 , x_2 och x_3 .

$$y = b_0I + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 + \epsilon \quad (2.23)$$

I Ekvation 2.23 avgör parametrarna \mathbf{b} , som bestäms med experimentell data, hur mycket varje variabel \mathbf{x} påverkar resultatet y . Ju större värde på b_i (eller lägre om b_i är negativ) desto mer kommer ändringar i den korresponderande variabeln x_i påverka y . Felet, även kallat residual, i modellen ges av ϵ och antas vara normalfördelat. En metod för att säkerställa detta presenteras i Avsnitt 2.6.3.

2.6.1 Statistiska tester med linjär regression

För att bestämma \mathbf{b} kommer det krävas 2^3 unika försök. Med (+) och (-)-notationen ges nivåerna för x_i i de 8 unika försöken i Tabell 2.3. Parametrarna \mathbf{b} kan sedan uppskattas med linjär regression.

Tabell 2.3: Teckenmatris för tredje ordningens försöksmodell.

<i>Experiment</i>	<i>I</i>	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	<i>Resultat</i>
1	+	+	+	-	+	-	-	-	y_1
2	+	-	+	-	-	+	-	+	y_2
3	+	+	-	-	-	-	+	+	y_3
4	+	-	-	-	+	+	+	-	y_4
5	+	+	+	+	+	+	+	+	y_5
6	+	-	+	+	-	-	+	-	y_6
7	+	+	-	+	-	+	-	-	y_7
8	+	-	-	+	+	-	-	+	y_8

För enkelhetens skull kan en omskrivning göras av de termer i Ekvation 2.23 som har att göra med interaktion mellan två eller fler variabler, det vill säga termerna på formen $x_i x_j$ och $x_i x_j x_k$.

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_6 x_6 + b_7 x_7 + \epsilon \quad (2.24)$$

Ekvation 2.24 med n experiment och p anpassade parametrar kan skrivas mer generell.

$$\mathbf{y} = \mathbf{x}\mathbf{b} + \boldsymbol{\epsilon}$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{np} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_0 \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix}, \quad \text{och } \boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

De skattade parametrarna betecknas $\hat{\mathbf{b}}$ och svarar mot de sanna parametrarna \mathbf{b} . På samma sätt betecknas den skattade responsen $\hat{\mathbf{y}}$. För att beräkna $\hat{\mathbf{b}}$ används i detta arbete *minsta kvadratmetoden*. Det innebär att $\hat{\mathbf{b}}$ bestäms så de minimerar summan av resiudalerna i kvadrat (SSE), det vill säga minimerar uttrycket i Ekvation 2.26.

$$SSE = \sum_{i=1}^n \epsilon^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.26)$$

Det går att visa att SSE minimeras när Ekvation 2.27 är uppfylld.

$$\hat{\mathbf{b}} = (\mathbf{x}'\mathbf{x})^{-1} \mathbf{x}'\mathbf{y} \quad (2.27)$$

För en *Factorial design* med två nivåer, det vill säga på formen 2^k , kommer de skattade $\hat{\mathbf{b}}$ även ges av ett viktat medelvärde av utfallen \mathbf{y} , enligt Ekvation 2.28.

$$\begin{bmatrix} \hat{b}_1 \\ \vdots \\ \hat{b}_p \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} \chi_{11} & \dots & \chi_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \chi_{1p} & \dots & \chi_{np} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad \hat{b}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_n}{n} \quad (2.28)$$

I Ekvation 2.28 är $\chi_{ij} = \pm 1$ beroende på nivån hos x_j i experiment nr i .

2.6.2 Förfining av modell

För att förfina modellen enligt punkt 4 i Tabell 2.2 kan de beräknade parameterarna $\hat{\mathbf{b}}$ som ej är signifikanta tas bort. Eftersom varje bestämd parameter dessutom kräver en frihetsgrad så kommer en modell med färre parametrar lämna kvar fler frihetsgrader. Detta gynnar feluppskattningen av modellen. För att bestämma vilka av $\hat{\mathbf{b}}$ som är signifikanta kan ett så kallat *student t-test* användas [40]. Denna metod är ett hypotestest av varje enskild parameter, där en parameter \hat{b}_i förkastas om olikheten i Ekvation 2.29 uppfylls. Konstanten τ_i ges längre ner av Ekvation 2.32. Konstanten t är en student-t fördelning i givet konfidensintervall och med $v = n - p$ frihetsgrader. Student-t-fördelningen är en utökad normalfördelning som tar hänsyn till osäkerheten i det skattade värdet av standardavvikelsen som uppstår då det inte finns ett stort antal mätpunkter.

$$\tau_i < t(v, \alpha/2) \quad (2.29)$$

För beräkning av τ krävs först att en skattad varians, s^2 , för varje parameter \hat{b}_i beräknas enligt Ekvation 2.30. Med variansen kan sedan standardfelet, $se(\hat{b}_i)$ beräknas enligt Ekvation 2.31.

$$s^2 = \frac{SSE}{v} \quad (2.30)$$

$$se(\hat{b}_i) = s\sqrt{[(\mathbf{x}'\mathbf{x})^{-1}]_{ii}} \quad (2.31)$$

Med standardfelet kan sedan τ beräknas.

$$\tau_i = \frac{|\hat{b}_i|}{se(\hat{b}_i)} \quad (2.32)$$

När en insignifikant parameter har förkastats kan en ny modell med färre termer x_i sättas upp, och Ekvation 2.27 kan användas igen. Hela processen upprepas med Student-t-test tills alla kvarvarande parametrar är signifikanta och den slutgiltiga modellen har reducerats.

2.6.3 Undersökning av residualer och nollnivåer

När den ursprungliga modellen förfinats och en slutgiltig uppsättning parametrar $\hat{\mathbf{b}}$ har bestämts undersöks residualer enligt punkt 5 i Tabell 2.2. Detta för att säkerställa att residualerna i den beräknade modellen är normalfördelade, vilket modellen beskriven i Avsnitt 2.6.1 kräver att de ska vara. För detta är det lämpligt att använda en *Studentized residuals plot* [41]. I denna metod plottas den studentiserade residualen z_i , vilken ges i Ekvation 2.33, mot de skattade mätvärdena \hat{y}_i .

$$z_i = \frac{y_i - \hat{y}_i}{s\sqrt{1 - \mathbf{h}_{ii}}}, \quad \text{där } \mathbf{h} = \mathbf{x}(\mathbf{x}'\mathbf{x})^{-1}\mathbf{x}' \quad (2.33)$$

I den resulterande grafen ska lika stor procentsats av mätpunkterna som konfidensnivån ligga inom korresponderande området som ges av student-t-fördelningen. För exempelvis 5 frihetsgrader ska 95% av mätpunkterna ligga inom intervallet

$\pm t(5, \frac{1-95\%}{2}) = \pm 2,57$. Om för många mätpunkter avviker tyder detta på att modellen är otillräcklig och missar att beskriva något, till exempel en icke linjär term. Om en modell missar signifikanta icke linjära termer kommer dessutom medelvärdet av nollnivåernas resultat skilja sig markant från den beräknade b_0 .

Under punkt 6 i Tabell 2.2 kan exempelvis konturgrafer för den slutgiltiga modellen skapas. Med dessa kan optimala driftförhållanden utläsas grafiskt. Detta är dock inget som kommer utföras i denna rapport.

3. Inledande undersökningar och förberedelser

I detta avsnitt presenteras de förberedande tester som var nödvändiga att utföra innan förgasaren var redo för experiment, samt specifikationer av bränsle och verktyg för utvecklande av ett styrsystem. Förberedelser inleddes med tester i kall labbskala för att säkerställa att dysorna fungerade, dessa presenteras först i avsnittet. Detta följs av en genomgång om hur installationen av förgasaren i Kraftcentralen gick till och vilken apparatur som fanns att tillgå. Sedan ligger fokus på de tester i varm ugn som utfördes för att säkerställa att fluidiseringen fungerade. Därefter presenteras bränslespecifikationer samt TGA-analys av bränslet. Slutligen följer en kort presentation av de verktyg som användes vid arbetet med styrsystem.

3.1 Test av dysor

För att undersöka hur väl dysorna fluidiserar bädden utfördes inledande tester i labbmiljö. Uppställningen bestod av en cylinder i plexiglas med en diameter på cirka 12 cm, öppen mot atmosfären. Under cylindern fästes en platta med, till design och positionering, tre dysor identiska till dem i reaktorn i Figur 1.5. Bädden var cirka 5 cm hög och bestod av olivinsand med en genomsnittlig partikeldiameter på 288 μm . Trycket mättes precis innan dysorna så att tryckfallet över dysorna kunde loggas. Det fluidiserande mediet var rumstempererad tryckluft. Det minsta flöde som kunde levereras var 5 l/min och det högsta flödet som testades var 20 l/min. Resultatet visade att tryckfallet över dysorna var cirka fem gånger högre än vad de var designade att ge, se Bilaga A. Detta ledde till att flöden över 20 l/min ej gick att testa. Testerna fick därför avbrytas utan att fluidisering uppnåtts.

För att minska tryckfallet över dysorna ökades diametern på förträngningshålen under dysorna. Att det var förträngningshålen som justerades berodde på att de är designade att ge det största bidraget till dysornas totala tryckfall. Till beräkning av en ny diameter användes Ekvation 2.12 och 2.14, vilka gav förhållandet $\Delta P_h \propto d_h^{-4}$. En minskning av tryckfallet med en faktor 5 krävde en diameterökning med cirka 50%. Detta resulterade i en slutlig diameter på 1,5 mm. När förträngningshålen borrats upp till önskad diameter utfördes en andra omgång fluidiseringstester enligt samma uppställning. Resultatet gav denna gång tryckfall på cirka 1,3 kPa, vilket ligger nära de 1,5 kPa som dysorna designats för. Efter dessa resultat utfördes inga

ytterligare förändringar av dysorna. Fluidisering uppnåddes under dessa förhållanden vid cirka 50 l/min , vilket är cirka fem gånger högre än det tänkta driftflödet.

Med Ekvation 2.9 samt 2.10 beräknades att minsta fluidiseringshastigheten skulle vara cirka hälften så stor vid de varma processbetingelserna vid cirka 850 °C. Denna minskning beräknades dock inte vara tillräckligt stor för att fluidisera en bädd med 288 μm i genomsnittlig partikeldiameter, det skulle fortfarande krävas cirka 25 l/min . Ett sådant flöde var inte möjligt i Kraftcentralen, vilket innebar att en förändring var nödvändig. För att undersöka om fluidisering vid lägre flöden kunde uppnås utfördes därför nya försök. Återigen användes samma uppställning, men med olivinsand med en partikeldiameter på 125 μm . Detta resulterade i fluidisering redan vid 5 l/min , det vill säga vid minsta flödet som testades. På grund av praktiska skäl valdes dock den slutgiltiga partikelstorleken till 136 μm .

3.2 Montering av förgasare

Testerna av förgasaren utfördes i en ugn av typen *VSTF 110/11* från Entech som var installerad i Kraftcentralen. Förgasaren monterades med ett klämdon i det rör som satt ovanför ugnen. På detta sätt hängde förgasaren fritt inne i ugnen, se Bilaga B. Eftersom hela förgasaren placerats inuti ugnen ersattes kopparringen med glim-packning av typen Thermiculite 815, från Loctech. Detta då kopparpackningen hade smält av de höga temperaturer som råder i ugnen. I hålen i locket monterades bränsleinmatningssystemet och rör för produktutflödet. Till produktutflödet kopplades även ett termoelement för att kunna mäta temperaturen i bädden.

Till inflödet under förgasaren kopplades det lokala kvävgassystemet samt en ånggenerator av typen *Precision Evaporator E-1000* från Cellkraft. Kvävgasflödet reglerades med en massflödesregulator, och mättes i normalliter per minut. Ånggeneratoren angav i teorin flödet i l/min , men uppvisade en viss tryckkänslighet. Detta innebar att komplementär mätningar var nödvändiga för att säkerställa att flödet var konstant. Ånggeneratoren pumpade destillerat vatten från en burk under vilken en våg placerades. Genom att undersöka hur mycket massa som försvunnit under en tidsperiod och omvandla detta till volym per tidsenhet kunde ett konstant flöde konstateras.

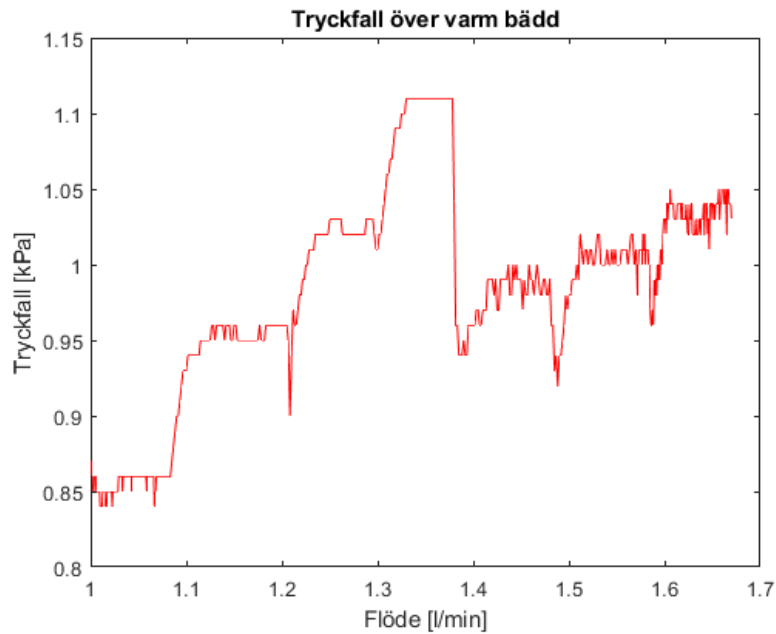
Produktutflödet var kopplat till den analysutrustning som fanns i Kraftcentralen. Denna analysutrustning bestod av två gaskromatografer och en infraröd spektrometer (*IR-spektrometer*). IR-spektrometer ger en analys av utflödet i realtid genom att mäta det spektrogram som uppstår när gasen bestrålas med IR-strålning. IR användes endast under experiment för att säkerställa stationärt tillstånd och kommer inte att förklaras mer ingående i denna rapport. GC användes vid vidare analys av resultaten, och teorin beskrivs ingående i Avsnitt 2.5.1. Proverna kommer till GC genom att systemet tar stickprover från utflödet var tredje minut. Provets leds sedan in i ett tvättsteg med isopropanol där ånga separeras. Därefter går flödet vidare till GC:n för analys och resultaten loggas automatiskt. Det är viktigt att trycket i

systemet ligger över 2 kPa för att stickprovet inte skall bli för litet. Om stickprovet blir för litet fylls den saknade volymen ut med luft. Då luft har en komposition som skiljer sig markant från utflödet kan inga slutsatser dras från analysen. Då förgasaren var placerad i Kraftcentralen användes de säkerhets- och varningssystem som redan fanns på plats.

3.3 Fluidiseringstester

Även om fluidisering uppnåtts vid ett viss flöde i kalltesterna i labbmiljö var det viktigt att bekräfta fluidisering även på plats i Kraftcentralen. Detta eftersom förgasaren har en mindre snittarea än cylindern i Avsnitt 3.1, större bäddmaterial användes samt att fluids egenskaper förändras markant vid varma flöden. Tryckmätarna placerades efter dysorna, det vill säga under bädden, samt vid utflödet ur reaktorn. Denna uppsättning möjliggjorde mätning av tryckfallet över bädden. Bädden var 10 cm hög och bestod av olivinsand med en partikeldiameter på $136\ \mu\text{m}$. Förgasaren värmdes med hjälp av ugnen upp till en temperatur på cirka $870\text{ }^\circ\text{C}$. Som fluidiseringsmedium användes tryckluft, vilken förvärmades med hjälp av elslingor till cirka $250\text{ }^\circ\text{C}$ innan den fördes in till förgasaren.

Det antogs att fluidisering uppnådes då tryckfallet över bädden inte ökade med en ökning av inflödet i enighet med teori. Vid inledande tester visade det sig att fluidisering skedde vid ett lägre flöde än det som förväntats baserat på teorin, se Bilaga C. Flödet stegades därför från 1 till $1,6\text{ Nl/min}$ i steg om $0,1$. Resultatet av denna stegning presenteras i Figur 3.1. En tydlig skillnad i hur tryckfallet relaterar till flödet sker mellan $1,3$ och $1,4\text{ Nl/min}$. Det antogs därefter att detta är minsta fluidiseringshastigheten vid temperaturer runt $870\text{ }^\circ\text{C}$.



Figur 3.1: Tryckfall över bädden som funktion av diskreta ändringar av inflödet.

3.4 Val av bränsle

Vid projektets början var tanken att använda barkpellets som bränsle då förgasaren var designad för detta [13]. Vid tester på bränslematningssystemet framgick det dock att detta inte var möjligt. Det upptäcktes att de cylinderformade barkpelletsen, med en diameter på cirka 6 mm, fastnade i röret. Detta troddes bero på att matningsrörets insida inte var helt slät utan hade utbuktande kanter vid ventiler-na. Längden på barkpelletsen varierades mellan cirka 10 och 35 mm, dock fastnade bränslet oavsett längd. Det konstaterades därför att barkpellets ej var ett lämpligt bränsleval vid användande av nuvarande inmatningssystem.

Istället för barkpellets valdes då svarvade, sfäriska träkulor av bok med en diameter på 8 mm. Dess molära sammansättning antogs vara $\text{CH}_{1,45}\text{O}_{0,72}$ [42]. Även för detta bränsle testades hur väl inmatningen fungerade och det upptäcktes att vid kontinuerlig matning av en kula åt gången fungerade inmatningssystemet som tänkt. Dock upptäcktes även att en matning av flera kulor åt gången gjorde att bränslet fastnade. Det bestämdes därför att matningen under de kontinuerliga förgasartesterna skulle ske med en kula åt gången var 15:e sekund.

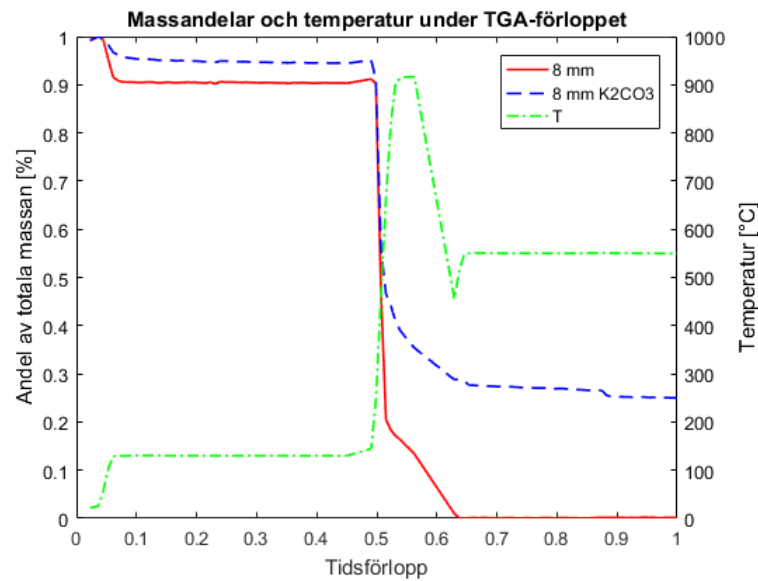
Då det var av intresse att kunna undersöka de katalytiska effekter som kalium kan ha på förgasarförloppet impregnerades vissa av kulorna med kaliumkarbonat. Impregneringen genomfördes genom att placera kulorna i en lösning mättad med K_2CO_3 . Lösningen med kulorna i placerades sedan i en ugn för att torkas 24 h. Därefter sköljdes kulorna av för att få bort överflödigt K_2CO_3 från kulornas yta och de pla-

cerades återigen i ugnen för att torkas, denna gång utan lösningen.

3.5 Analys av bränslets sammansättning

Den molära sammansättning som antogs gälla för träkulorna var angiven för torrt bränsle. Då den uppmätta massan för kulorna var för fuktigt bränsle behövde andelen fukt i bränslet bestämmas. För att undersöka bränslesammansättningen av de vanliga kulorna och de impregnerade kulorna utfördes en TGA-analys (*Thermal Gravimetric Analysis*). Sex stycken prover av respektive bränsle förbereddes och placerades i analysatorn, varpå startvikten för respektive prov uppmättes. Under analysen vägdes proverna kontinuerligt samtidigt som temperaturen varierades i tre olika steg; fukt-, pyrolys- och asksteget, vilka höll temperaturerna 130, 915 respektive 550 °C. I fuktsteget vägdes samtliga prover i tur och ordning tills viktminskningen för respektive prov var mindre än en viss toleransnivå. Då antogs all fukt ha evaporerat och pyrolysstegets inleddes. Pyrolysstegets var tidsbestämt och avslutades efter 7 min, varpå all flykt antogs ha lämnat bränslet. I det avslutande asksteget vägdes återigen varje prov tills dess att massan var konstant. Under asksteget tillfördes syrgas vilket innebar att koksen förbrändes och endast askan återstod då TGA-analysen avslutades.

I Figur 3.2 nedan presenteras massornas och temperaturens variation mot analysens tidsförlopp, vilket inte motsvarar exakt tid utan är en linjär fördelning av datapunkterna. Massans variation i de olika stegen beräknades genom att ta medelvärdet för de sex träkulorna samt de sex impregnerade kulorna. Temperaturens variation beräknades genom att ta medelvärdet över samtliga provers temperaturer.



Figur 3.2: Medelvärde av provernas massor samt temperaturen mot analysens tidsförlopp. Den röda (heldragna) linjen visar viktminskningen för de vanliga träkulorna. Den blå (streckade) linjen visar viktminskningen för de kaliumimpregnerade kulorna. Den gröna (streckade/prickade) linjen visar temperaturens variation under tidsförloppet.

Utifrån massorna som loggades under tidsförloppet beräknades de genomsnittliga andelarna fukt, flykt, koks och aska för träkulorna och de impregnerade kulorna, se Tabell 3.1.

Tabell 3.1: Bränslesammansättning av träkulor och impregnerade kulor

Bränsletyp	Träkulor	Träkulor impregnerade med K_2CO_3
Total massa [g]	0,187	0,249
Fukt [%]	8,17	4,02
Flykt [%]	78,36	60,28
Koks [%]	13,30	10,43
Aska [%]	0,19	25,27

3.6 Verktyg för styrsystem

Förgasaren kommer att vara en del av en större process enligt Figur 1.1. Vid utveckling och drift av förbränningsprocesser finns ett behov av att kunna logga och övervaka driftparametrar kontinuerligt. Delvis handlar det om att driva processen så effektivt som möjligt, men det är också viktigt utifrån ett säkerhetsperspektiv. Kategorin biobränsleprocesser som behandlas här är ofta unika i sin lösning. Detta skapar en efterfrågan på att kunna skraddarsy en mjukvara som styr hur processenheterna förhåller sig till varandra och deras parametrar. Målet är att bibehålla så effektiva driftförhållanden som möjligt, samt att om parametrar börjar skena iväg någonstans i processen skall ett larm slås på alternativt säkerhetsåtgärder aktiveras.

3.6.1 LabVIEW

Ett program som låter användaren bygga denna typ av mjukvara är LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*), ett grafiskt programmeringsspråk som är framtaget av National Instruments. Programmets syfte är att automatisera och mäta olika processer i en laborativ miljö [43].

LabVIEW kan användas för att kontrollera driften av en förgasare. National instruments har även produktion av hårdvaror som öppnar möjligheten att mäta verkliga parametrar för att sedan skicka signalen till mjukvaran. Genom att förse systemet med tillfredställande moduler, som kan mäta till exempel temperatur, tryck och flöden är det möjligt att med kort fördröjningstid kunna analysera, kontrollera och övervaka systemet. Det arbete som genomförts i utveckling av styrsystem under detta kandidatarbete presenteras i Bilaga D.

4. Utförande av förgasningstester

Nedan presenteras kronologiskt den metodik som applicerades under de centrala experimenten. Inledningsvis behandlas upplägget av testmatris följt av genomförande av tester med träkulor. Slutligen redovisas arbetet där effekten av kaliumimpregnerade träkulor studeras.

4.1 Grundläggande förgasartester

För att systematisera undersökningarna upprättades en försöksmall enligt *Factorial Design*. I enlighet med Avsnitt 1.4.2 valdes tre parametrar som relevanta för optimering av processen: flödes hastighet, förhållandet mellan kvävgas och ånga i inflödet samt reaktortemperatur. Dessa parametrar presenteras tillsammans med sina respektive (+), (-) samt 0-nivåer i Tabell 4.1. Testparametrarna är satta efter kraftcentralens övre begränsningar med avseende på temperatur och flöden.

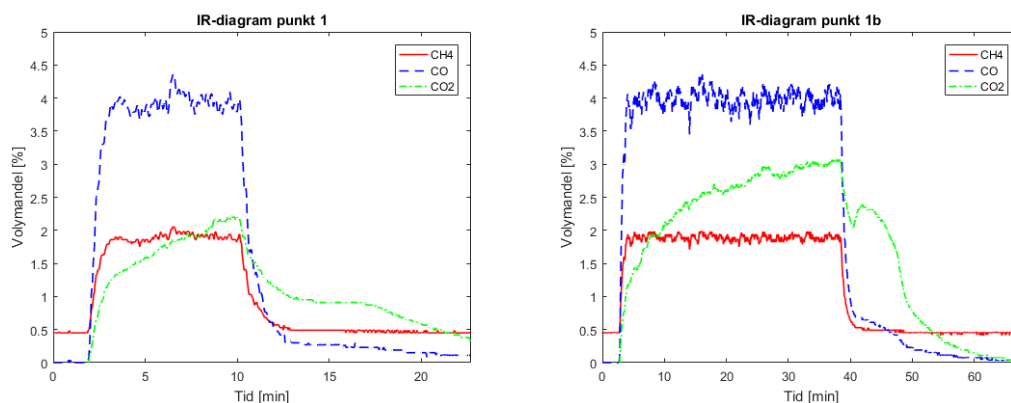
Försöken utfördes enligt Tabell 2.3, dessutom utfördes två tester på 0-nivån, ett i mitten och ett i slutet av försöksmallen. Den slutgiltiga ordningen presenteras i Tabell E.1 i Bilaga E. Testerna inleddes med de låga temperaturerna, och fortsatte med de höga i syfte att ändra temperaturen så lite som möjligt.

Tabell 4.1: Testparametrar och dess (+),(-) och 0-nivåer.

Värde	Koncentration [Volym%]	Flödes hastighet [l/min]	Temperatur [°C]
(-)	20	5	810
0	40	7,5	840
(+)	60	10	870

Testproceduren för förgasaren inleddes med att sätta börvärdet på ugnstemperaturen till önskat värde. Under tiden ugnen värmdes tillfördes ett luftflöde på två *Nl/min* genom systemet. När temperaturen på bädden nått det önskade värdet reglerades kvävgas- och ångflödet för att åstadkomma önskad inflödeskomposition. Viktminskningen i vattenbehållaren loggades en gång per minut och konverterades till *Nl/min* tills det gick att verifiera ett stabilt önskat flöde. När driftparametrarna ställts in påbörjades bränslematningsprocessen. För att förhindra att luft kommer med i matningen av bränslet användes den sluss med kvävgas som presenteras i

Figur 1.4. Matningsproceduren för kävelslussen genomfördes enligt Bilaga E. Matningen var en kula var 15:e sekund under sex till åtta minuter. Matningen avslutades då det tycktes att stationärt tillstånd uppnåtts i IR-spektrometern. Ett exempel på hur IR-diagrammet såg ut vid en sådan tid återfinns i Figur 4.1a. Då testerna för en punkt avslutats upprepades proceduren för nästa punkt.



(a) IR-diagram för driftpunkt 1 vid de första testerna

(b) IR-diagram för utökade tester för driftpunkt 1b.

Figur 4.1: Jämförelse mellan ursprungliga tester och de utökade. Som kan ses i de utökade testerna börjar CO₂ plana ut.

Utbytet av kol beräknades för samtliga punkter då detta indikerar rimligheten på resultaten. Dessa beräkningar presenteras i Bilaga F. För att utvärdera kvalitén på utflödet med avseende på syntesgas beräknades även erhållen mängd kolmonoxid och vätgas. Utifrån GC-resultaten jämfördes även ämneskompositionen i utflödet. Det upptäcktes att syre hade kommit in i vissa testpunkter för GC varefter vissa experiment behövdes upprepas en andra gång.

4.2 Kompletterande förgasartester

Då resultaten från de grundläggande testerna i förgasaren analyserats fattades beslut om vidare tester. Det framgick att stationärt tillstånd inte nödvändigtvis hade uppnåtts under de sex minuterna, vilket kan ses i Figur 4.1a. Detta indikerade ett behov av att utföra tester under längre tid. Det beslutades att utföra de förlängda testerna på de bäst presterande driftpunkterna, 1 och 6. Proceduren var identisk med den som beskrivs i Avsnitt 4.1, med undantag för att matningen skedde i ungefär 20 minuter. Ett exempel på IR-grafen för en sån mätning återfinns i Figur 4.1b.

Slutligen utfördes ytterligare ett test med kaliumimpregnerade kulor under samma driftbetingelser som testpunkt 1. Detta skedde genom att oimpregnerade kulor matades till förgasaren med samma frekvens som tidigare. När det utifrån IR-diagram verkade som att stationärt tillstånd infunnit sig i förgasaren började istället kaliumkulor matas. Testet förlöpte tills nytt stationärt tillstånd uppnåddes.

5. Resultat och diskussion

I följande avsnitt presenteras de resultat som erhöles vid tester enligt testmatrisen, tester med förlängd körtid samt matning med kaliumimpregnerade kulor. Vidare diskuteras resultatens trovärdighet utifrån möjliga felkällor samt förslag på åtgärder.

5.1 Tester enligt testmatris

I detta avsnitt presenteras resultat för de tio ursprungliga tester som utfördes en kortare period i mellan sex och åtta minuter. Detta görs med tabeller över utbytet och en graf över kompositionen vid olika driftpunkter. Målet är att åstadkomma ett högt utbyte och en så stor mängd syngas som möjligt.

5.1.1 Resultat

Testmatrisen med de tilltänkta värdena på temperatur, totalflöde och ångkoncentration kunde inte följas helt och hållet. Detta berodde bland annat på grund av problem med att kontrollera det exakta ångflödet. Dessa problem diskuteras i större detalj i Avsnitt 5.1.3. En testmatris med de exakta driftförhållanden som rådde under försöken presenteras i Tabell 5.1.

Tabell 5.1: Testmatris med sanna värden på parametrar.

Experiment	Koncentration [Volym%]	Flöde [l/min]	Temperatur [$^{\circ}C$]	y
1	61,2	10,3	810	y_1
2	21,6	10,2	810	y_2
3	61,5	5,2	810	y_3
4	20,0	5,0	810	y_4
5	41,6	7,7	840	y_5
6	60,0	10,5	870	y_6
7	19,2	9,9	870	y_7
8	60,8	5,1	870	y_8
9	20,0	5,0	870	y_9
10	39,2	7,4	838	y_{10}

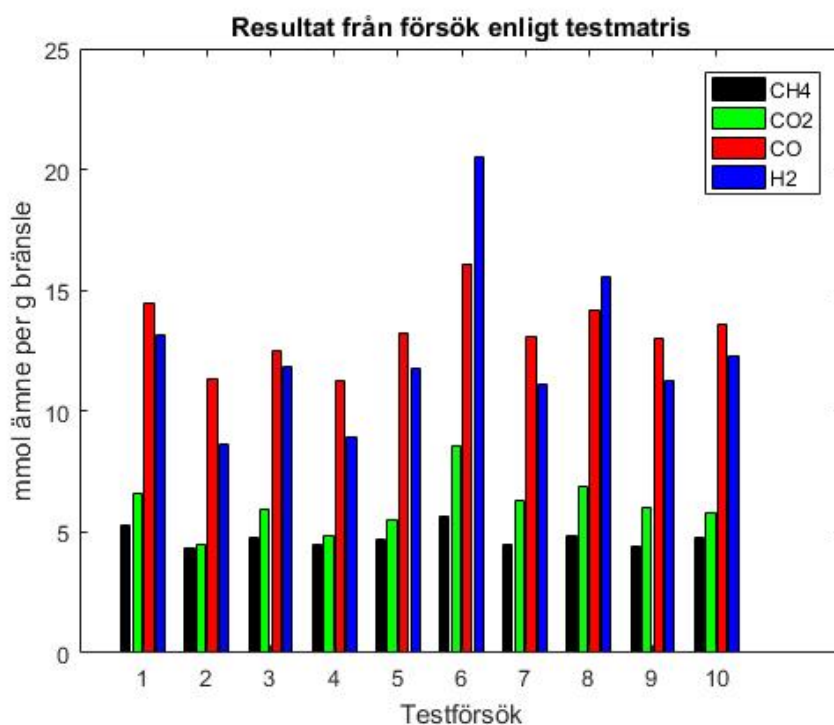
I Tabell 5.2 nedan presenteras det erhållna kolutbytet och den producerade mängden CO, H₂, CO₂ och CH₄ för testerna utförda enligt testmatrisen.

Tabell 5.2: Kolutbytet samt den producerade mängden CO, H₂, CO₂ och CH₄.

Testpunkt	Kolutbyte	CO	H ₂	CO ₂	CH ₄
	<i>mol%</i>	<i>[mmol/g bränsle]</i>	<i>[mmol/g bränsle]</i>	<i>[mmol/g bränsle]</i>	<i>[mmol/g bränsle]</i>
1	74,1	14,5	13,2	6,6	5,3
2	57,7	11,3	8,6	4,5	4,3
3	65,5	12,5	11,8	6,0	4,8
4	58,4	11,2	8,9	4,8	4,5
5	65,7	13,2	11,7	5,5	4,7
6	82,9	16,2	20,5	8,6	5,6
7	65,6	13,1	11,1	6,3	4,5
8	69,8	14,2	15,5	6,9	4,9
9	63,5	13,2	11,3	6,0	4,4
10	67,5	13,6	12,3	5,8	4,8

Som kan ses i Tabell 5.2 är utbytet av kol lågt för många av testpunkterna. För att ge perspektiv så har förgasaren i GoBiGas anläggning ett utbyte på över 90% [12]. Det bästa utbytet gav punkt 1 och 6, vilket är de punkterna med högst totalflöde och koncentration av ånga. Allra sämst utbyte gav punkt 2 och 4 där både ångkoncentration och bäddtemperatur var låg.

I Figur 5.1 nedan visas hur kompositionen av den producerade gasen såg ut för de tio testpunkterna. Sammansättningen på den producerade gasen varierade inte markant för testpunkterna, med undantag för testpunkt 6 och 8 där produktionen av H₂ är högre jämfört med de andra punkterna.

**Figur 5.1:** Halter av CH₄, CO₂, H₂ och CO för de tio olika testpunkterna.

5.1.2 Statistisk analys

I den statistiska analysen som utfördes anpassades initialt mätvärdena i Tabell 5.2 till en fullständig tredje ordningens linjär modell enligt Ekvation 2.23. De skattade parametrarna $\hat{\mathbf{b}}$ beräknas med Ekvation 2.27, dessa presenteras i Tabell 5.3. Därefter utfördes ett student-t-test för att förfina modellen. De motsvarande värdena på τ , med korresponderande t-värde presenteras i Tabell 5.4. I tabellerna anger indexet C koncentration av ånga i flödet, F storleken på flödet och T temperatur.

Tabell 5.3: Skattade parametrar för fem olika uppmätta responser.

$\hat{\mathbf{b}}$	Totalt utbyte [mol %]	Utbyte CO [mmol/g bränsle]	Utbyte H ₂ [mmol/g bränsle]	Utbyte CO ₂ [mmol/g bränsle]	Utbyte CH ₄ [mmol/g bränsle]
\hat{b}_0	0,6674	13,2134	12,3904	6,0564	4,7539
\hat{b}_C	0,0550	1,0085	2,5010	0,7494	0,3320
\hat{b}_F	0,0268	0,4593	0,6702	0,2612	0,1399
\hat{b}_T	0,0337	0,8855	1,9829	0,7473	0,0789
\hat{b}_{CF}	0,0241	0,4443	0,7913	0,2871	0,1615
\hat{b}_{CT}	-0,0013	-0,0363	0,6858	-0,0438	0,0398
\hat{b}_{FT}	0,0098	0,0119	0,4682	0,2096	0,0726
\hat{b}_{CFT}	0,0003	-0,0363	0,3577	0,0355	-0,0099

Tabell 5.4: Beräknade värden på τ , korresponderande mot parametrar i Tabell 5.4.

τ	Totalt utbyte [mol %]	Utbyte CO [mmol/g bränsle]	Utbyte H ₂ [mmol/g bränsle]	Utbyte CO ₂ [mmol/g bränsle]	Utbyte CH ₄ [mmol/g bränsle]
τ_C	10,4753	7,4136	10,8093	4,3467	13,5201
τ_F	5,0773	3,3796	2,8849	1,5087	5,6750
τ_T	6,2534	6,3782	8,3555	4,2260	3,1342
τ_{CF}	4,6747	3,3492	3,4890	1,6990	6,7088
τ_{CT}	0,2389	0,2679	2,9629	0,2540	1,6215
τ_{FT}	1,8493	0,0877	2,0145	1,2104	2,9414
τ_{CFT}	0,0633	0,2732	1,5770	0,2101	0,4106
$t(v, \alpha/2)$	2,9200	2,9200	2,9200	2,9200	2,9200

Tabell 5.4 ger att flertalet parametrar verkar vara insignifikanta, det vill säga att flera τ är lägre än det givna t-värdet $t(v, \alpha/2) = 2,92$. Det innebär att den term x_i i Modellen 2.23 som motsvarar det τ med lägst värde ska uteslutas. För totalt utbyte av kol ska då det mista värdet på τ , nämligen $\tau_{CFT} = 0,0633$ uteslutas. Därefter bestämdes nya parametrar b_i och ett nytt t-test, resulterande i nya τ , utfördes. Återigen tas det lägsta värdet på $\tau < t(v, \alpha/2)$ bort. Denna processen upprepas sedan för samtliga kolumner tills hela matrisen gått igenom. Detta resulterar i en slutgiltig uppsättning av parametrar, vilka presenteras i Tabell 5.5. Där är $\hat{\mathbf{b}}_0$ medelvärdet av resultatet för samtliga testpunkter i Tabell 5.2.

Tabell 5.5 visar att alla tre variabler bidrar till ökade utbyten i samtliga fall, eftersom alla parametrar är positiva. För utbytet av CO ger till exempel både flödet, temperaturen och koncentrationen ett positivt bidrag till utbytet, men då värdet på

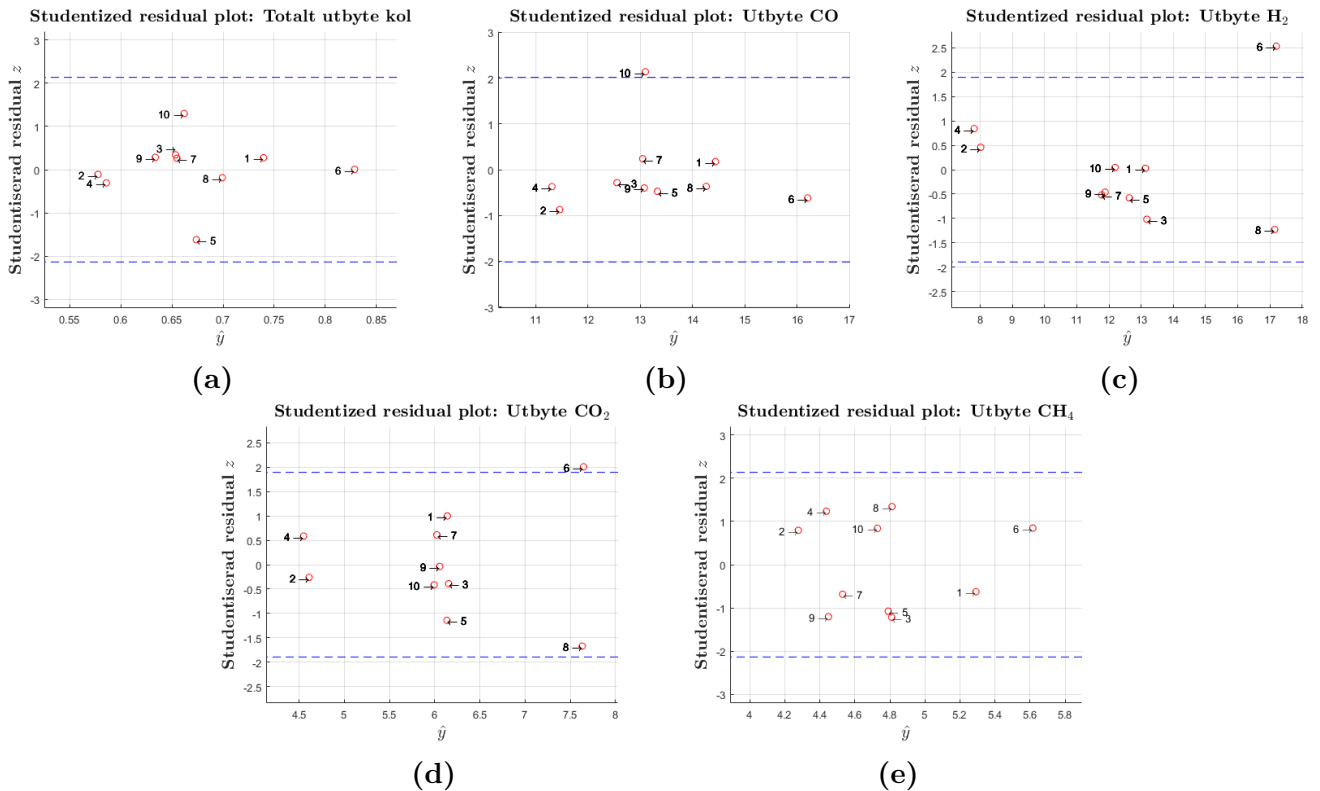
Tabell 5.5: Skattade parametrar för tre olika resultat.

\hat{b}	Totalt utbyte [mol %]	Utbyte CO [mmol/g bränsle]	Utbyte H ₂ [mmol/g bränsle]	Utbyte CO ₂ [mmol/g bränsle]	Utbyte CH ₄ [mmol/g bränsle]
\hat{b}_0	0,6673	13,2139	12,3709	6,0756	4,7532
\hat{b}_C	0,0550	1,0072	2,5843	0,7730	0,3325
\hat{b}_F	0,0268	0,4584	-	-	0,1397
\hat{b}_T	0,0337	0,8830	2,0346	0,7531	0,0797
\hat{b}_{CF}	0,0240	0,4439	-	-	0,1621
\hat{b}_{CT}	-	-	-	-	-
\hat{b}_{FT}	0,0097	-	-	-	0,0738
\hat{b}_{CFT}	-	-	-	-	-

\hat{b}_C är högst tycks koncentrationen bidra mest. En genomgående trend är att koncentration och temperatur verkar spela störst roll för ökat utbyte. Undantaget är för CH₄ där totalflödet tycks påverka mer än temperaturen. Det går även att utläsa att parametrarna \hat{b}_C och \hat{b}_T i snitt är cirka 5-15% av medelvärdet \hat{b}_0 . Exempelvis för utbyte CO₂ gäller att $\frac{\hat{b}_T}{\hat{b}_0} = 0,124$. Detta innebär att en ökning av temperaturen motsvarande en nivå (30 °C) kommer resultera i en ökning av utbytet CO₂ med 12,4%. Känsligast för ändring av förhållandena verkar utbyte av H₂ vara, där en ökning av koncentrationen resulterar i mer än 20% ökat utbyte.

I samtliga fall där interaktionstermen mellan koncentration och flöde är signifikant så är denna lika stor som motsvarande parameter för flödet. En anledning till detta skulle kunna vara att flödet av vattenånga beror både på koncentration och totalflöde. Således skulle det totala flödet vattenånga kunna vara den drivande kraften, och inte koncentrationen eller flödet processgas i sig. I övrigt verkar inga andra interaktionstermer påverka nämnvärt.

För att säkerställa modellens riktighet skapas sedan *studentized residual*-grafer, vilka presenteras i Figur 5.2. I Figur 5.2a och 5.2e ligger alla studentiserade residualer inom det blå (streckade) intervallet. Detta innebär att de ligger inom den godkända felmarginalen, eftersom 95% av punkterna ska ligga inom det givna intervallet. I fallet med Figur 5.2b, 5.2c och 5.2d ligger en mätpunkt vardera utom intervallet. Utöver detta går inga tydliga trender att avläsa mellan residualer och ökat värde på responsen, vilket tyder på att modellen inte har missat något viktigt.



Figur 5.2: *Studentized residual plot* över de skattade responserna för fem fall: a) totalt utbyte kol, b) Utbyte CO, c) Utbyte H₂, d) Utbyte CO₂ och e) Utbyte CH₄. Den streckade blå linjen anger ett 95% konfidensintervall för givna residualer. I tre av fallen är en mätpunkt vardera utanför det givna intervallet.

5.1.3 Diskussion av resultat

Resultatet i Tabell 5.1 och den statistiska analysen tydde båda på att högst utbyte för samtliga ämnen ges vid högsta möjliga nivå på alla tre variabler. Resultatet tyder alltså på att för att erhålla så högt utbyte av syntesgas per gram bränsle som möjligt vill man hålla högt flöde, koncentration och temperatur. Detta överensstämmer med teorin om att ökad temperatur ger ökad reaktionshastighet och att ett större flöde leder till bättre fluidisering. Bättre fluidisering innebär i sin tur att värmeöverföringen förbättras. En annan faktor som talar för att ökat flöde är gynnsamt är att risken för stagnanta zoner ökar vid låga flöden. Eftersom vatten är reaktant i bland annat Reaktion 2.4 är det även rimligt att ökad koncentration av vattenånga leder till ökat utbyte av syntesgas.

Från Tabell 5.5 tycks det att koncentrationen är den driftparameter med störst inverkan på utbytet. Även temperaturen har stor inverkan, med endast något lägre skattade parametrar än för koncentration. Att storleken på flödet hamnar lite i bakgrunden skulle kunna bero på att fullständig fluidisering uppnås tidigare, och således leder inte ökat flöde till markant bättre värmeöverföring.

I detta arbete undersöktes endast utbyte med hänsyn till förbrukat bränsle. Ett an-

nat relevant utbyte skulle kunna vara att hänsyn till hur mycket ånga som krävs då det är en reaktant i processen. Detta skulle kunna leda till att optimal ångkoncentration inte längre är högsta möjliga, utan kanske rentav lägsta möjliga. En annan relevant faktor som ej har tagits i beaktning i detta arbete är mängd producerade biprodukter. Till exempel så är CO_2 en önskad biprodukt som behöver separeras bort i ett senare processsteg och som dessutom har ett lågt ekonomiskt värde. En mer utförlig optimering skulle därför även kunna ta i beaktning att minimera koncentrationen CO_2 i utflödet.

Det bör dock noteras att det totala utbytet kol blev ovanligt långt. Resultatet ska därför tolkas med försiktighet då det inte går att säga med säkerhet att det handlar om optimala driftförhållanden. Möjliga orsaker till det dåliga utbytet av kol diskuteras i Avsnitt 5.1.4.

5.1.4 Diskussion av felkällor

Att totala kolutbytet blev lågt för flera av testpunkterna kan bero på flera faktorer. En sannolik sådan är att reaktionen aldrig uppnådde stationärt tillstånd. Figur 4.1a visar exempelvis hur halten CO_2 fortfarande tycks öka då testet avbryts. Detta tyder på att vid längre körtid kommer en högre halt CO_2 uppnås och således skulle även totala utbytet kunna öka. För att undersöka om så var fallet utfördes ytterligare två tester för att undersöka huruvida detta påverkar resultatet, se Avsnitt 5.2.1.

En annan möjlig felkälla är att en del CO_2 har löst sig i isopropanolen som användes i ett av tvättstegen. Denna CO_2 har alltså i så fall inte detekterats alls eftersom den tvättats bort på väg till analysutrustningen.

En tredje faktor som kan ha påverkat är att integreringen av topparna i kromatogrammen från inte utfördes GC:n manuellt, utan med hjälp av inbyggd mjukvara. Detta medför risken för fel i integrationen orsakat av dåligt separerade toppar eller att programmet satt felaktiga integrationsintervall. Konsekvensen blir i så fall att inkorrekta halter av de olika ämnena redovisas. Risken för detta minimerades dock då två olika gaskromatografer kördes samtidigt och båda gav liknande resultat. För att utesluta detta fel helt hade kromatogrammen behövt integreras manuellt. Detta utfördes dock bara för en av topparna, då tid och resurser för detta inte fanns.

Eftersom samtliga tre testade driftparametrar påverkade utbytet positivt skulle även ett alternativ för att öka utbytet kol vara att köra processen vid ännu högre temperatur, flöden och koncentrationer. Detta var dock inte möjligt då ugnen i kraftcentralen redan var inställd på sin maximala temperatur och analysutrustningen och röstsystem på platsen inte klarade av högre flöden. Om trenderna som sågs i resultatet av den statistiska analysen fortsätter över de testade nivåerna kommer det dock krävas en ökning motsvarande flera nivåer för att uppnå ett rimligt totalt utbyte av kol.

5.2 Tester vid stationärt tillstånd och kaliumimpregnering

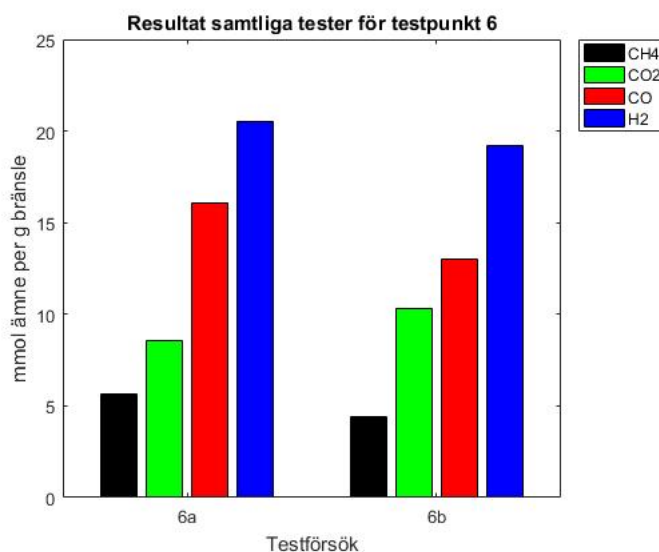
Då det visade sig att förgasningen kanske inte uppnått stationärt tillstånd utfördes ytterligare tester på två av punkterna. Då punkt 1 och 6 hade uppvisat det högsta utbytet kol valdes dessa för att undersökas vidare. Vid förlängda tester matades bränslet med samma frekvens som tidigare, men under en mycket längre period tills stationärt tillstånd tros ha infunnit sig. Driftpunkt 1 undersöktes även med kaliumimpregnerat bränsle.

Inledningvis kommer de förlängda resultaten från driftpunkt 6 att jämföras i tabell och graf med de ursprungliga resultaten från samma testpunkt. Sedan kommer samtliga tre tester som genomförts vid driftpunkt 1 att presenteras. Dessa resultat kommer att diskuteras gemensamt i den avslutande diskussionen.

5.2.1 Resultat för driftpunkt 6

Driftpunkt 6 uppvisade gott utbyte av kol i de ursprungliga testerna och valdes därför för vidare tester. Denna gång var målet att mäta tills dess att det i IR-grafen kunde utläsas att stationärt tillstånd hade uppnåtts. Detta kunde man se genom att kurvorna som representerade halten av de ämnen som detekterades hade planat ut, vilket tog ungefär 20 minuter.

Utbytet av kol minskade för driftpunkt 6 från 82,9% i de ursprungliga testerna till 75,6% i de förlängda. I Figur 5.3 visas sammansättningen på den producerade gasen för punkt 6a och 6b. 6a är det ursprungliga testet och 6b är det förlängda. Ur figuren kan det utläsas kompositionen vid de båda testerna är nästintill identisk. Det producerades dock lite mer CO₂ och lite mindre CO.



Figur 5.3: Halter av CH₄, CO₂, H₂ och CO för testpunkt 6a och 6b.

5.2.2 Resultat för driftpunkt 1

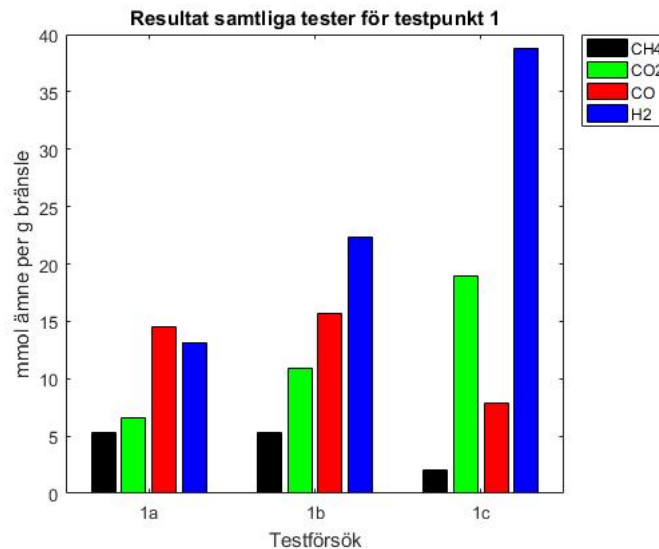
För driftpunkt 1 utfördes ett förlängt experiment i syfte att undersöka hur utbytet och komposition förändrades under stationära förhållande. Dessutom utfördes ett test med kaliumimpregnerade kulor. Det förlängda testet benämns 1b, och testet med kaliumimpregnerade kulor blir 1c.

I Tabell 5.6 presenteras resultaten från de tester som utförts vid driftpunkt 1. Kolutbytet ökade markant vid längre tester, och ytterligare lite till till 96,9% för tester med kaliumimpregnerat bränsle.

Tabell 5.6: Kolutbytet samt den producerade mängden H₂, CO, CO₂ och CH₄.

Testpunkt	Kolutbyte [mol%]	CO [mmol/g bränsle]	H ₂ [mmol/g bränsle]	CO ₂ [mmol/g bränsle]	CH ₄ [mmol/g bränsle]
1a	74,1	14,5	13,2	6,6	5,3
1b	87,8	15,7	22,3	10,9	5,3
1c	96,9	7,9	38,8	18,9	2,0

I Figur 5.4 illustreras kompositionen på utflödet för samtliga tester vid driftpunkt 1. Vid förlängda tester ökade mängden producerad CO₂ och H₂ markant. Att mängden CO₂ ökar är inte oväntat då det främst är det ämnet som inte uppnått stationära förhållanden. För testpunkt 1c förändras dock kompositionen markant. Mängden producerad H₂ var nästan tre gånger högre än för testpunkt 1a. Samtidigt minskade mängden producerad CH₄ och CO.



Figur 5.4: Halter av CH₄, CO₂, H₂ och CO för testpunkt 1.

5.2.3 Diskussion för driftpunkt 1 och 6

Resultaten från de förlängda testerna är motstridande då 6b visade på ett mindre utbyte, medan 1b visade på ett högre utbyte. Detta skulle kunna tyda på att de lå-

ga utbytena i de ursprungliga testerna beror på andra anledningar än att stationärt tillstånd inte infunnit sig. Att inget entydigt resultat erhöles kan då istället bero på de övriga felkällor som togs upp i Avsnitt 5.1.3. För att få ett mer tillförlitligt resultat hade fler tester med förlängd körtid behövt utföras. Vid undersökningen av 6b missades en kula vid matningen, vilket gav en tydlig dipp i IR-diagrammet. Det är möjligt att detta kan ha påverkat utbytet.

Upplösningen på IR-monitorn är inte den bästa, och när IR-graferna i Figur F.1 undersöks i efterhand tycks det att CO₂-kurvan inte riktigt planat ut än. För att säkerställa att stationärt tillstånd uppnås är det möjligt att matning hade behövt ske under ännu längre perioder. Det är dock inte möjligt att genomföra med det manuella bränsleinmatningssystemet.

Resultatet som presenteras i Figur 5.4 tyder på att kaliumimpregneringen har positiva effekter på förgasningen. Dessa resultat stämmer väl överens med teori och går att motivera med de två Reaktionsvägarna 2.15-2.17 samt 2.18-2.20 som presenterades i Avsnitt 2.4.1. Den stora ökningen av vätgas är ett resultat av kaliumkarbonatets katalyserande reaktioner med ånga. Den ökade mängden CO₂ och minskade mängden CO beror på dels på att CO reagerar tillbaka till K₂CO₃ samt deltar i en jämviktsreaktion med koldioxiden. Detta leder till att flykten avgår snabbare samt att utbytet blir bättre i koks förgasningen, något som ger utslag på det totala kolutbytet i förgasningsförloppet. Effekten av det ökade vätgasflödet är positivt i senare steg i processen. Optimal sammansättning av syntesgasen när det kommer till metanisering är ett förhållande mellan CO och H₂ på 1:3. Detta går inte att uppnå med vanliga tråkulor, vilket gör att den kvarvarande vätgasen behövs framställas på annat vis.

Då bränslet impregnerades i kalium behövde ingen svavel tillståttas till skillnad från Marics avhandling som nämns i Avsnitt 2.4.1. Eftersom kaliumet fanns precis där bränslet var behövde inte flyktigheten minskas. Detta innebar dock att allt kalium som tillsatts i någon form följde med produktgasen ut. Att impregnera bränslet med kalium är dessutom inte särskilt tidseffektivt. När kaliumimpregnering ska användas i större skala måste därför någon typ av cirkuleringsystem utvecklas.

6. Slutsats

Förutom själva förgasningstesterna har stor del av projektets tid gått åt till de förberedelser som behövde göras innan tester kunde utföras. Fluidisering och bränslematning har testats och justerats för att få processen att fungera som tänkt. Förgasaren har monterats och anpassats efter dess nuvarande testplats i Chalmers Kraftcentral.

De tester som utfördes tydde på att högre temperatur och högre koncentration av ånga i inflödet gav ett högre kolutbyte. Dock var även det högsta kolutbytet som erhölls lågt för denna typ av process. Dessutom uppstod tvetydighet kring resultaten då en testpunkt erhöll bättre utbyte vid längre tester, medan en annan testpunkt erhöll det motsatta. Då kaliumimpregnerat bränsle användes erhölls ett kolutbyte på cirka 90% vilket tyder på att K_2CO_3 har en positiv katalyserande effekt på förgasningen. Dock var CO_2 den kolprodukt som ökade mest medan den önskade produkten CO minskade något. Å andra sidan ökade även produktionen av H_2 , vilket skulle kunna bidra till att det 3:1-förhållande mellan H_2 och CO som är optimalt vid metaniseringen lättare uppnås.

Under projektets gång har två av tre delsteg i syftesbeskrivningen uppnåtts; förgasaren har installerats och dess funktion har testats. Det tredje delsteget har bara delvis uppfyllts. Experiment har utförts och utflödeskompositionen har kunnat analyseras. På grund av tidsbrist har inga ytterligare experiment kunnat utföras, vilket hade varit nödvändigt för att kunna säkerställa optimala driftförhållanden för förgasaren. Trots tvetydiga resultat kan det ändå konstateras att förgasning av biomassa har potential och är något som bör undersökas vidare i strävan mot en fossilfri framtid.

Att använda svarvade träkulor som bränsle är inte etiskt försvarbart i längden. För det ändamål som träkulorna användes i detta projekt har energiåtgången för svarvning av kulorna varit onödig. Dock utfördes projektet i så liten skala att användandet av träkulor inte anses ha påverkat miljön i någon stor utsträckning. Projektet anses ha varit av nytta då förhoppningen är att kunna sprida kunskap om biobränslen. Mycket tyder på att barkpellets, som från början var tänkt att användas som bränsle, verkar vara ett bra val av råvara för tillverkning av biobränslen. Barkpellets har som fördel över träkulorna att det är en restprodukt som i dagsläget inte utnyttjas till annat.

För vidare utveckling av processen behöver ett nytt bränsleinmatningssystem utvecklas, dels för att inte behöva sköta matningen manuellt och dels för att kunna använda barkpellets som bränsle.

Litteratur

- [1] Laurei.J Schmidt. *Climate Change: Vital Signs of the Planet: Satellite data confirm annual carbon dioxide minimum above 400 ppm*. Tekn. rapport. 2017. URL: <https://climate.nasa.gov/news/2535/satellite-data-confirm-annual-carbon-dioxide-minimum-above-400-ppm/>.
- [2] IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Tekn. rapport. Geneva, Switzerland, 2014, s. 151. URL: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR%7B%5C_%7DAR5%7B%5C_%7DFINAL%7B%5C_%7Dfull.pdf.
- [3] Regeringskansliet. *En sammanhållen klimat-och energipolitik*. 2008. URL: <https://data.riksdagen.se/fil/46BFDFC6-CA14-417B-A0BF-3A19A4120D06>.
- [4] Pål Börjesson, Linda Tufvesson och Mikael Lantz. *Livscykelanalys av svenska biodrivmedel*. Tekn. rapport. Lund: Miljö- och energisystem, Lunds Tekniska Högskola, 2010, s. 1–69. URL: <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC217.pdf>.
- [5] Göteborg Energi. *GoBiGas - anläggningen*. URL: https://gobigas.goteborgenergi.se/Svensk_version/Anlaggningen (hämtad 2018-03-23).
- [6] Göteborg Energi. *Om GoBiGas*. URL: https://gobigas.goteborgenergi.se/Svensk_version/Om_GoBiGas (hämtad 2018-03-23).
- [7] Anna-Karin Nils Andersson. *Göteborg Energis miljardprojekt läggs ner*. April 2018. URL: <http://www.gp.se/nyheter/g%7B%5C%22%7Bo%7D%7Dteborg-energis-miljardprojekt-1%C3%A4ggs-ner-1.5505921>.
- [8] Gustav Ferrand-Drake, Del Castillo, Andreas Gustavsson, Alexander Lindblom, Viktor Stenberg, Linda Tegehall och Kajsa Winberg. “Produktion av metangas till Chalmers Eco-marathon”. Göteborg, 2013. URL: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/179141/179141.pdf>.
- [9] Lukas Dahlgren, Sandra Jonsson, Linnea Jörgner, Felix Larsson, Erik Möller och Peter Tran. “Katalytisk framställning av biogas”. Göteborg, 2014. URL: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/203737/203737.pdf>.
- [10] Johanna Beiron, Krister Ekström, Isabell Jobson, Anna Mårtensson, Elin Olsson och Hilda Sandström. *Tillverkning och analys av Water-Gas Shift-reaktor för användning inom biometanproduktion*. Göteborg, 2015. URL: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/231608/231608.pdf>.

- [11] Hanna Bengtsson, Anton Deleskog, Joakim Ferring, Stefanus Ivarsson, Bergehjem Petrus Jakobsen och Lisa Winberg. "Kemisk absorption av koldioxid efter en Water-Gas Shift-reaktor". Göteborg, 2016. URL: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/241726/241726.pdf>.
- [12] Martin Seemann. Privat kommunikation. 2018.
- [13] Martin Andersson, Julia Hansson, Björck Leon, Hermansson Larsson, Ivar Petersson, Emil Thureborn och Linnéa Östlund. "Förgasning av träråvara för biometanproduktion". Göteborg, 2017. URL: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/250004/250004.pdf>.
- [14] Naturvårdsverket. *Biogas ur gödsel, avfall och restprodukter*. Tekn. rapport. Stockholm: Naturvårdsverket, 2012. URL: <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-6518-8.pdf>.
- [15] Energigas Sverige. *Statistik om biogas*. 2017. URL: <http://www.energigas.se/fakta-om-gas/biogas/statistik-om-biogas/> (hämtad 2018-05-06).
- [16] Elin Röös, Cecilia Sundberg, Eva Salomon och Maria Wivstad. *Ekologisk produktion och klimatpåverkan – En sammanställning av kunskapsläge och framtida forskningsbehov*. Tekn. rapport. Uppsala: SLU,EPOK, 2013, s. 47–49. DOI: 978-91-576-9159-0. URL: <https://www.slu.se/globalassets/ew/org/centrb/epok/dokument/eko-prod-o-klimatp-webb.pdf>.
- [17] Johan Falk. "Etanol – slöseri med resurser och energi". I: *Forskning och Framsteg* 7 (2007). URL: <https://fof.se/tidning/2007/7/etanol-sloseri-med-resurser-och-energi-0>.
- [18] Biogas väst. *Fakta om Biogas*. Tekn. rapport. Göteborg, 2015, s. 1–19. URL: https://alfresco.vgregion.se/alfresco/service/vgr/storage/node/content/workspace/SpacesStore/2a8b3c8c-2d7c-44a3-84f1-8e98c3a5d791/Fakta%20om%20biogas_150903_web.pdf?a=false&guest=true.
- [19] FAO, IFAD, UNICEF, WFP och WHO. *The State of Food Security and Nutrition in the World 2017. Building resilience for peace and food security*. Tekn. rapport. Rome: FAO, 2017. URL: <http://www.fao.org/3/a-I7787e.pdf>.
- [20] FAO. *Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention*. Tekn. rapport. Rome: FAO, 2011, s. v. URL: <http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e00.pdf>.
- [21] World Health Organization. *Obesity and overweight*. 2018. URL: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs311/en/> (hämtad 2018-03-03).
- [22] C. Ford Runge och Benjamin Senauer. "How Biofuels Could Starve the Poor". I: *Foreign Affairs* (maj 2007). URL: <https://www.foreignaffairs.com/articles/2007-05-01/how-biofuels-could-starve-poor>.
- [23] *NE.se [Förgasning]*. Malmö, 2018.
- [24] Chris Higman, Maarten v. d. Burgt, ScienceDirect (e-book collection), Ebook Central (e-book collection) och Knovel (e-book collection). *Gasification*. English. 2nd;2; Amsterdam;Boston; Gulf Professional Pub./Elsevier Science, 2008, s. 11–13. ISBN: 9780750685283;075068528X;

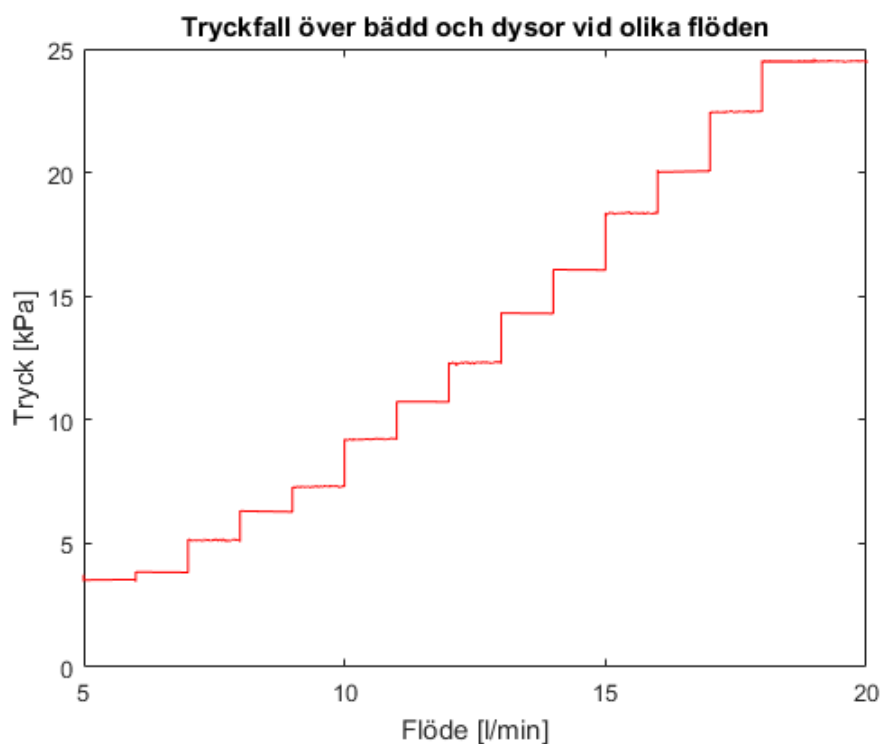
-
- [25] Shurong Wang och Zhongyang Luo. *Pyrolysis of Biomass*. Berlin, Boston: De Gruyter, jan. 2016, s. 193–196. ISBN: 9783110369632. DOI: 10.1515/9783110369632. URL: <https://www.degruyter.com/view/books/9783110369632/9783110369632/9783110369632.xml>.
- [26] Wen-Ching Yang. *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2003. Kap. 3, ss. 53–62.
- [27] Efstathios Michaelides, Clayton T. Crowe och John D. Schwarzkopf. *Multiphase Flow Handbook*. 2. utg. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016. Kap. 17, ss. 957–963.
- [28] Prabir Basu. *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006. Kap. 3, s. 62.
- [29] Prabir Basu. *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006. Kap. 11, s. 368.
- [30] Daizo Kunii och Octave Levenspiel. *Fluidization Engineering*. 2nd. Stoneham, MA, USA: Butterworth-Heinemann, 1991. Kap. 3, ss. 70–72.
- [31] Wen-Ching Yang. *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2003. Kap. 6, ss. 158–169.
- [32] Daizo Kunii och Octave Levenspiel. *Fluidization Engineering*. 2nd. Stoneham, MA, USA: Butterworth-Heinemann, 1991. Kap. 4, s. 105.
- [33] Jelena Marinkovic. “Choice of bed material: a critical parameter in the optimization of dual fluidized bed systems”. Diss. Chalmers University of Technology, 2016, s. 1–60. URL: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/229348/229348.pdf>.
- [34] Mohammad S. Masnadi, John R. Grace, Xiaotao T. Bi, C. Jim Lim, Naoko Ellis, Yong Hua Li och A. Paul Watkinson. “From coal towards renewables: Catalytic/synergistic effects during steam co-gasification of switchgrass and coal in a pilot-scale bubbling fluidized bed”. I: *Renewable Energy* 83 (2015), s. 918–930. ISSN: 18790682. DOI: 10.1016/j.renene.2015.05.044. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.044>.
- [35] Hepa Rasol och Tobias Richards. “Influence of potassium on gasification performance”. I: (2016), s. 32–33. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:946981/FULLTEXT01.pdf>.
- [36] Daniel C. Harris. *Quantitative Chemical Analysis*. 8th. W.H Freeman och Company, 2010. Kap. 22, s. 544–558. ISBN: 978-1-4292-1815-3.
- [37] Daniel C. Harris. *Quantitative Chemical Analysis*. 8th. W.H Freeman och Company, 2010. Kap. 23, s. 565–582. ISBN: 978-1-4292-1815-3.

- [38] Douglas C Montgomery. *Design and Analysis of Experiments*. 8. utg. John Wiley & Sons, 2013. Kap. 6, s. 253–292. ISBN: 978-1-118-14692-7. DOI: 10.1007/978-3-319-52250-0. URL: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpDAEE0013/viewerType:toc/root%7B%5C_%7Dslug:design-analysis-experiments?kpromoter=federation%7B%5C%7Dtoc-within=DOI%20papers3://publication/uuid/061B13EB-08D6-4119-9CD5-6BCFC76A92EB%20http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-52250-0.
- [39] T. Lundstedt, E. Seifert, L. Abramo, B. Thelin, A. Nyström, J. Pettersen och R. Bergman. “Experimental design and optimization”. I: *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 42.1-2 (1998), s. 3–8. DOI: 10.1016/S0169-7439(98)00065-3.
- [40] Douglas C Montgomery. *Design and Analysis of Experiments*. 8. utg. John Wiley & Sons, 2013. Kap. 10, s. 462–467. ISBN: 978-1-118-14692-7. DOI: 10.1007/978-3-319-52250-0. URL: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpDAEE0013/viewerType:toc/root%7B%5C_%7Dslug:design-analysis-experiments?kpromoter=federation%7B%5C%7Dtoc-within=DOI%20papers3://publication/uuid/061B13EB-08D6-4119-9CD5-6BCFC76A92EB%20http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-52250-0.
- [41] Anders Rasmuson, B Andersson, Louise Olsson och Ronnie Andersson. *Mathematical modeling in chemical engineering*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, s. 142–145. ISBN: 9781107279124 (ISBN); 9781107049697 (ISBN). DOI: 10.1017/CB09781107279124. arXiv: arXiv:1011.1669v3. URL: <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CB09781107279124%20http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84923965043%7B%5C%7DpartnerID=40%7B%5C%7Dmd5=>.
- [42] Gildas Nguila Inari, Mathieu Pétrissans, Anélie Pétrissans och Philippe Gérardin. “Elemental composition of wood as a potential marker to evaluate heat treatment intensity”. I: *Polymer Degradation and Stability* 94.3 (2009), s. 365–368. ISSN: 0141-3910. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2008.12.003>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391008004023>.
- [43] Rick Bitter, Taqi Mohiuddin och Matt Nawrocki. “Introduction to LabVIEW”. I: *LabVIEW: Advanced Programming Techniques* (2007), s. 1–67. ISSN: 1873-2518. DOI: 10.1080/13501780903129256. URL: <http://home.hit.no/%7B%7Dhansha/documents/labview/training/Introduction%20to%20LabVIEW/Introduction%20to%20LabVIEW.pdf>.
- [44] “NI cRIO-9066 Embedded Real-Time Controller with Reconfigurable FPGA for C Series Modules Operating System”. I: (2015). URL: http://www.ni.com/pdf/manuals/376186a_02.pdf.
- [45] “NI C Series Overview”. I: (2015). URL: http://www.ni.com/pdf/manuals/374358b_02.pdf.

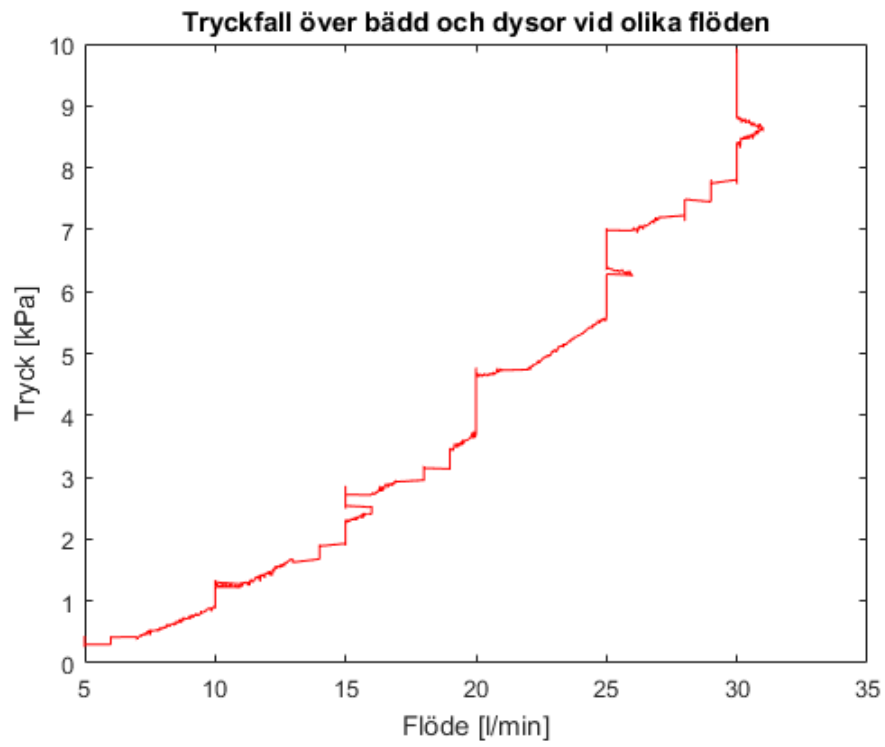
- [46] *Tutorial: State Machines*. 2015. URL: <http://www.ni.com/tutorial/7595/en/> (hämtad 2018-05-13).

A. Test av dysor

Figur A.1 visar hur tryckfallet över dysorna ökade med ökat flöde. Vid det tilltänkta driftflödet på cirka 10 l/min blev trycket cirka $7,5 \text{ kPa}$, det vill säga fem gånger högre än det designat att vara. I Figur A.2 redovisas tester på dysor där förträngningshålet borrats upp till $1,5 \text{ mm}$ i diameter. Här syns ett markant lägre tryckfall, med cirka $1,3 \text{ kPa}$ tryckfall vid cirka 10 l/min .



Figur A.1: Tryckfallet över dysor med förträngningshål på 1 mm .

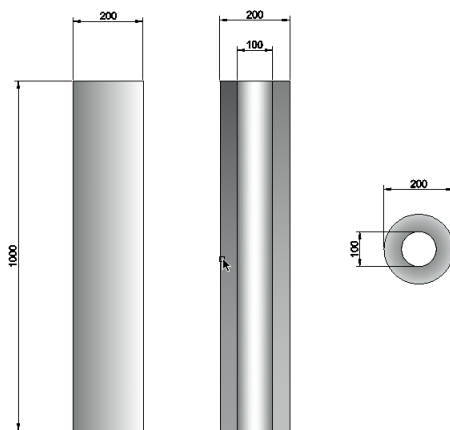


Figur A.2: Tryckfallet över dysor med förträngningshål på 1,5 mm.

B. Ritningar över förgasaren

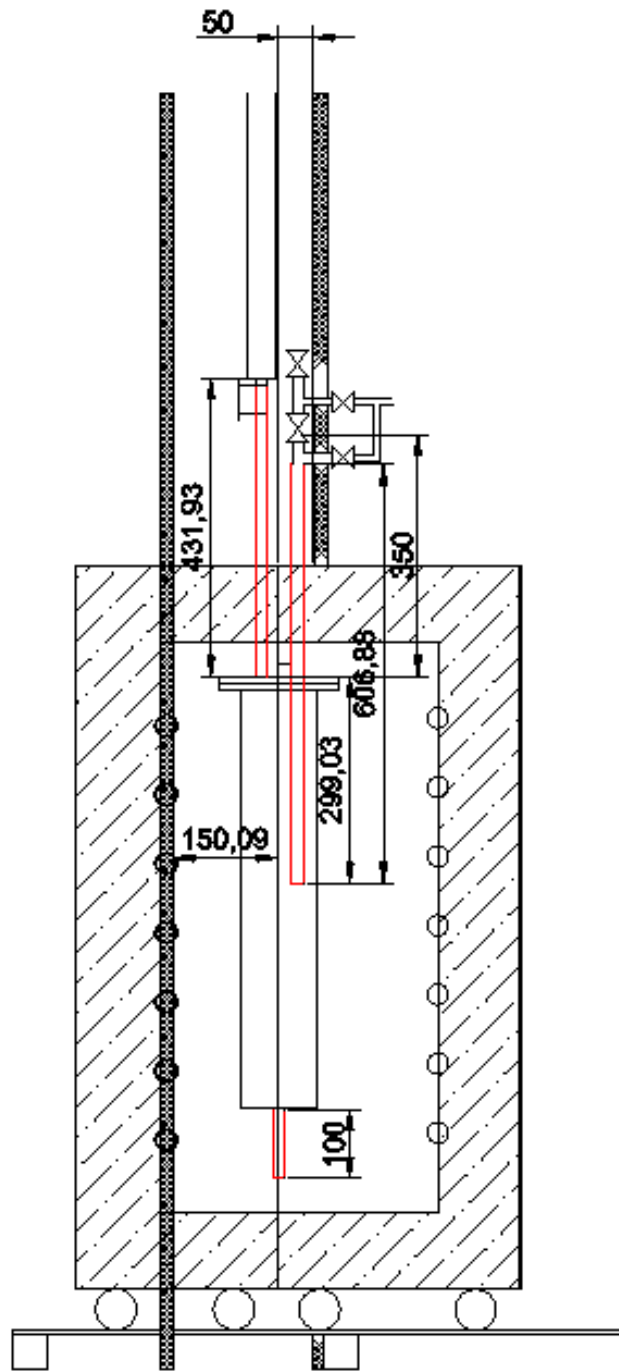
I designarbetet av en processenhet innefattas fler faktorer än driftparametrar för enhetens prestanda. Enheten skall installeras och implementeras, något som kan resultera i omgivningsrelaterade begränsningar. En detaljerad uppfattning av monteringsplatsen och desingmöjligheter kan därför vara av relevans. Ett verktyg för att illustrera detta är CAD-program (*Computer-Aided Design*). Syftet med dessa program är att koordinatbaserat rita skalenliga ritningar. Ett grundläggande CAD-program är DraftSigt som tillåter användaren göra skalenliga 2-dimensionella ritningar.

För att på ett överseeligt sätt kunna rita en 3D-struktur i ett 2D-program gäller det att göra bra *snitt*. Med detta menas att fiktivt ”dela” eller ”skära” enheten för att sedan rita den projicerade ytan, se Figur B.1.

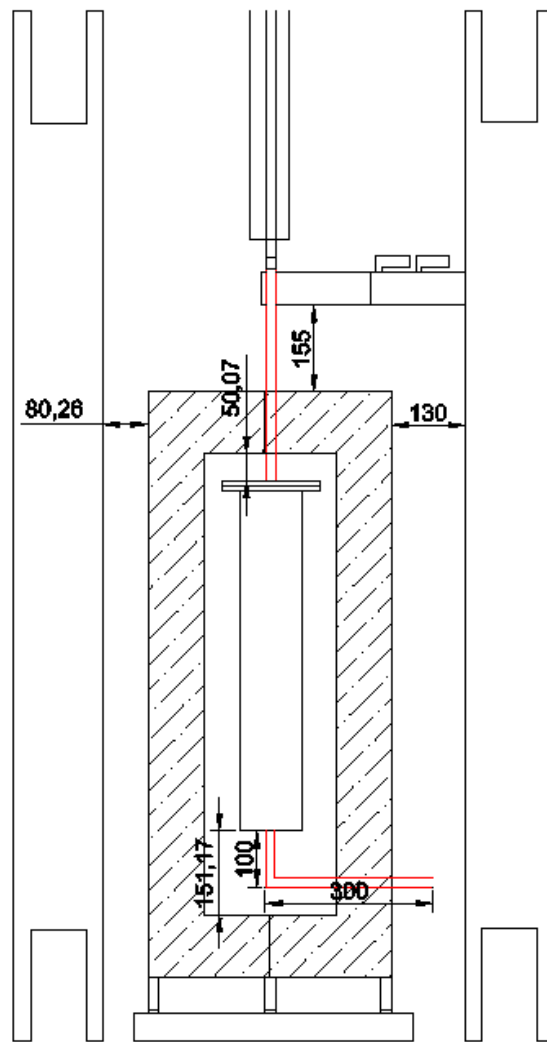


Figur B.1: Illustration av termen ”snitt” där ett enmetersrör delas längs med, och vilkelrätt relativt rörets riktning.

I figuren ovan ges exempel på hur snitt för att rita ett rör kan dras. Till vänster ges rörprofilen utan snitt, i mitten visas profilen med ett snitt genom centrum längs röret och till höger presenteras röret med ett vinkelrätt snitt tvärs igenom. Nedan presenteras de ritningar som skapades med DraftSigt i syfte att med tillräcklig precision kunna dimensionera nya rör för att anpassa förgasaren till ugnen i kraftcentralen. Rör som behövde tillverkas markerades med röda linjer.



Figur B.2: Förgasningssystemet sett vinkelrätt från ugnens delbara axel med snitt genom centrum.



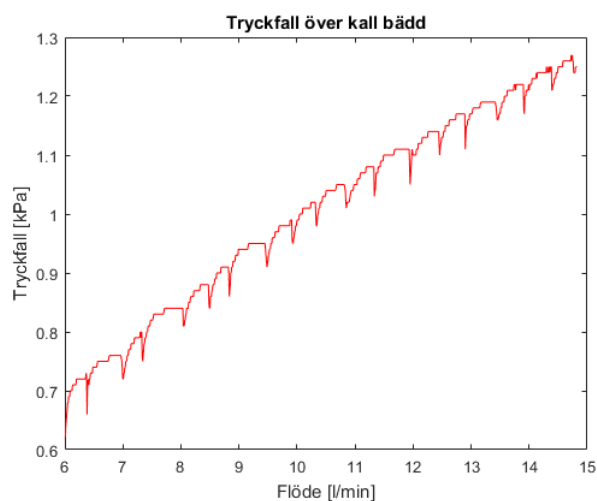
Figur B.3: Förgasningssystemet sett framifrån med snitt längs ugnens delbara axel. Stegarna på sidorna av ugnen illustrerar metallstolpar där mätinstrument kan fästas. Undertill visas spåret som ugnen står på samt ovan visas utflödes-röret som är anslutet till analysinstrumenten.

C. Fluidiseringstester

C.1 Kalltest i Kraftcentralen

Då fluidisering i testmiljö uppnått installerades förgasaren i Krafttcentralen för fortsatta fluidiseringstester på plats. Inledningsvis utfördes dessa tester i kall miljö, det vill säga ugnen var inte på. Fluidisering bedömdes visuellt ha uppnåtts vid ett flöde på ungefär 12 l/min .

När locket på förgasaren hade monterats kunde fluidisering inte längre upptäckas visuellt. Därför användes tryckmätare för att få fram en tryckkurva och på så sätt bekräfta fluidisering. I Figur C.1 presenteras ett typiskt resultat från dessa tester. Från figuren tycks fluidisering inte uppnås trots ett flöde på upp till 15 l/min , vilket var det högsta flödet som kunde erhållas. Ingen fluidisering lyckades uppnås vid kalltester.

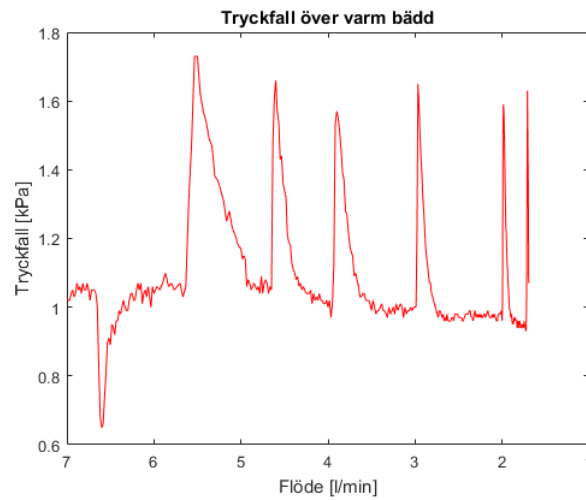


Figur C.1: Typisk graf över hur tryckfallet varierade vid de kalla testerna. Som kan ses i grafen så ökar tryckfallet stadigt med flödet.

C.2 Varmtest i Kraftcentralen

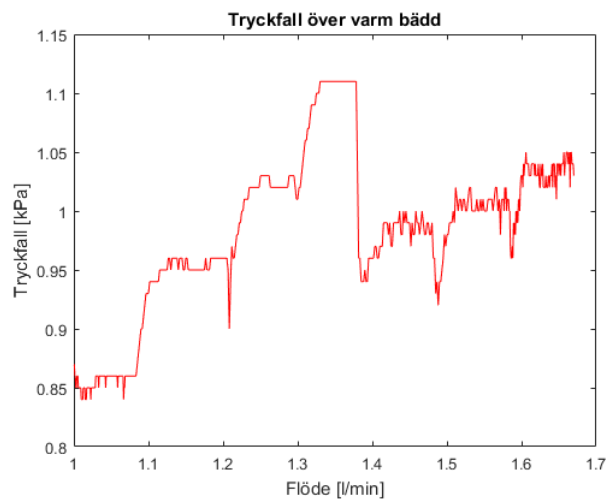
Utifrån teorin att det var något i analysystemen i Kraftcentralen som orsakade fel vid mätningar vid höga flöden fortskred testerna. Ugnen vämdes upp till ungefär 870 °C och flödet sattes till 7 l/min . Som kan ses i Figur C.2 så varierade tryckfallet

på ett annorlunda sätt än i Figur C.1. Tryckfallet stabiliserades inte utan oscillerade runt ett visst värde. Detta väckte misstanke om att fluidisering uppnåtts.



Figur C.2: Den tryckkurva som erhöles vid varma fluidiseringstester medan flödet sänktes stegvis från 7 till 2 l/min .

Vidare undersökningar utfördes på intervall mellan 1 och 1,7 l/min i steg om 0,1. Dessa resultat presenteras i Figur C.3. Här var det tydligt att tryckfallet avtog då flödet översteg 1,3 l/min , samt att tryckkurvan återigen oscillerade. Minsta fluidiseringshastighet antogs därför vara ungefär 1,3 l/min .



Figur C.3: Tryckkurva erhållen vid stegvis ökning av varmt flöde från 1 till 1,7 l/min .

D. Manual för temperaturövervakning med LabVIEW

För att garantera effektiv drift och god säkerhet är det av intresse att kunna ha översikt och logga driftparametrar. I denna bilaga beskrivs uppsättning, funktion och instruktioner för hur temperaturer kan kontrolleras i en processenhet, exempelvis en förgasare.

D.1 Produkter

För att erhålla en fungerande temperaturövervakning krävs ett antal mjuk- och hårdvaror. Ett termoelement som kan mäta temperaturen, en modul som processerar signalen från termoelementet och kommunicerar med en dator samt en mjukvara där signalen kan bearbetas. Nedan presenteras de komponenter som ingår i detta arbetes uppsättning.

D.1.1 LabVIEW

LabVIEW är ett grafiskt programmeringsspråk utvecklat av National Instruments. Mjukvaran är ett väl använt verktyg för att automatisera och mäta processer i en laborativ miljö. Inom kemitekniken är processlösningar ofta unika och kräver ett styr- och övervakningssystem specifikt för processen i fråga. LabVIEW är en mjukvara som ger möjligheten att skraddarsy denna form av kod [43].

D.1.2 CompactRIO, NI-9066

CompactRIO är en kontroller med en processor och FPGA (*Field-Programmable Gate Array*) som är programmerbar för användaren med LabVIEW. Enheten öppnar möjligheten att behandla en eller flera olika signaler från input/output-moduler och kommunicerar med datorer. I förgasarsystemet är det av intresse att kunna övervaka flöden, tryck och temperaturer. En cRIO NI-9066 med utrymme för 8 input/output-moduler bör dessa krav tillfredsställas med marginal. Enheten kan kommunicera med datorer via USB eller ethernet [44].

D.1.3 Termoelement, NI-9212

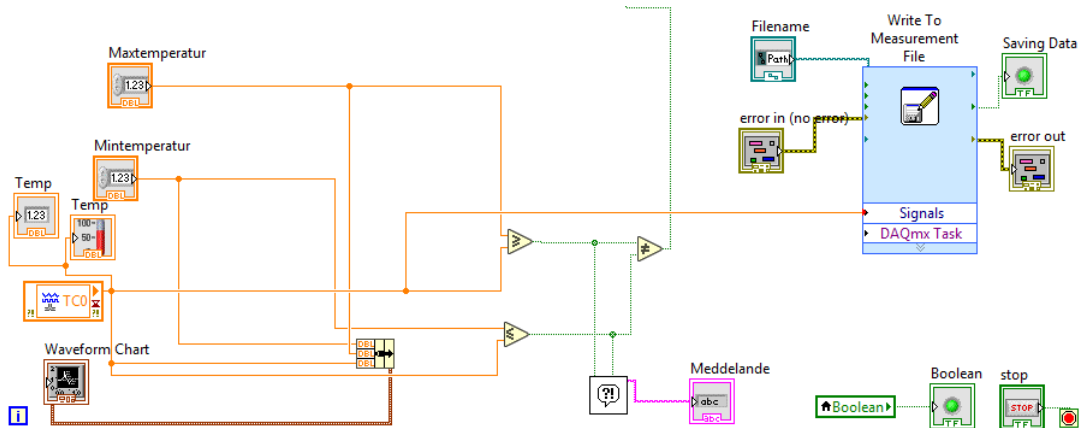
Vid temperaturmätningar plockar termoelementen upp svaga signaler i storleksordningen millivolt (mV). För att med god precision kunna övervaka temperaturen krävs ett högkvalitativt termoelement som kan reducera brus och stör signaler. National Instruments termoelement NI-9212 ger möjligheten att mäta åtta olika temperaturer med en precision på $\pm 0,39^\circ C$. Maximal samplingshastighet är 95 punkter per sekund och kanal. Genom att välja tillvalet *Therminal Block* levereras termoelementet med dragna sladdar, komplett för användning. Termoelementet är kompatibelt med cRIO och LabVIEW [45].

D.2 Uppsättning

I uppsättning av systemet finns ett par restriktioner. Systemet kan ta skada av magnetfält och bör därför inte förvaras eller monteras i utrymmen där starka magnetfält kan uppstå. Termoelementet levererades monterad i cRIO:n och behöver inte tas bort när systemet plockas isär. Skruvar på cRIO:n är dragna med specifika vridmoment och bör därför inte röras. Strömkoppling till cRIO:n skall ske innan sladd kopplas till vägguttag. Positiv (vit) sladd till V-terminalen, negativ (svart) sladd till C-terminalen. Hårdvarorna kopplas sedan via USB eller ethernet till PC med LabVIEW och installerade drivrutiner. Manualer, guider och information för systemet finns i en pärm.

D.3 Instruktioner

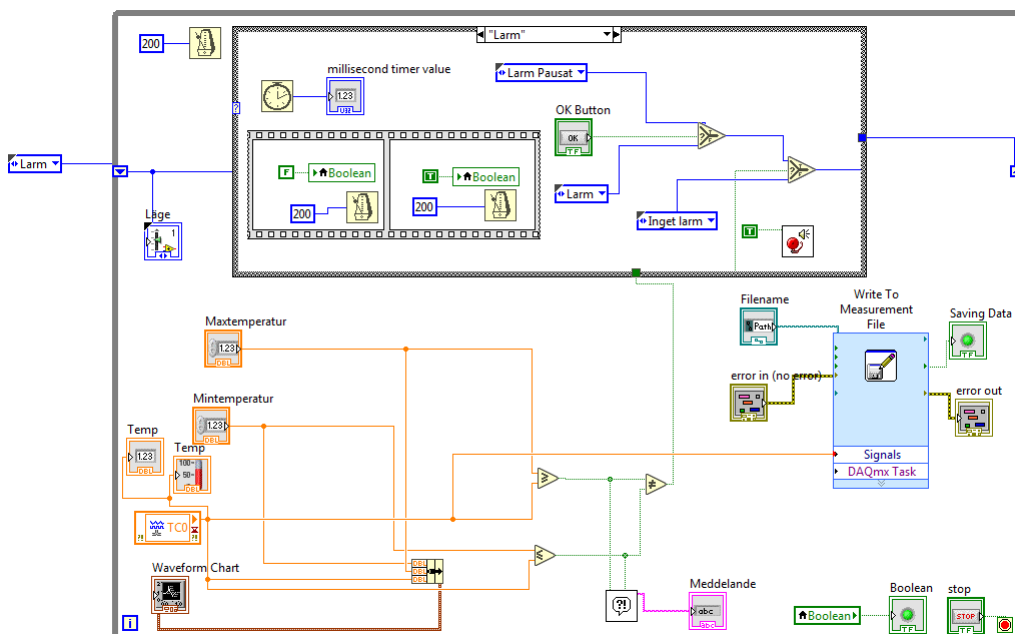
I Figur D.1 presenteras den framtagna koden. Tre signaler i form av temperatur från termoelement samt max- och minimumtemperaturer skickas in till systemet. Signalerna packteras med en "Array" och genererar med en "Waveform Chart" ett direkt diagram på temperaturförloppet. Signalerna passerar också genom en serie logiska funktioner där fallet då in signalen från termoelementet hamnar utanför det satta temperaturintervallet genererar ett felmeddelande. Slutligen matas signalen från termoelementet till programmets "Write to Measurement File"-funktion som gör att varje mätpunkt sparas i en vald excel-fil.



Figur D.1: Blockdiagram över LabVIEW-kod för temperaturloggning.

Koden för temperaturstyrningen är uppbyggd med hjälp av en så kallad "State Machine". Det går att läsa mer om sådana här system på National Instruments egna guider [46]. Tanken med sådana system är att de har olika lägen eller "States" som de hoppar mellan då vissa krav uppfyllts. De tre lägen som används i denna koden är "Inget Larm", "Larm" och "Larm Pausat". I alla lägen loggar systemet temperatur och plottar det kontinuerligt.

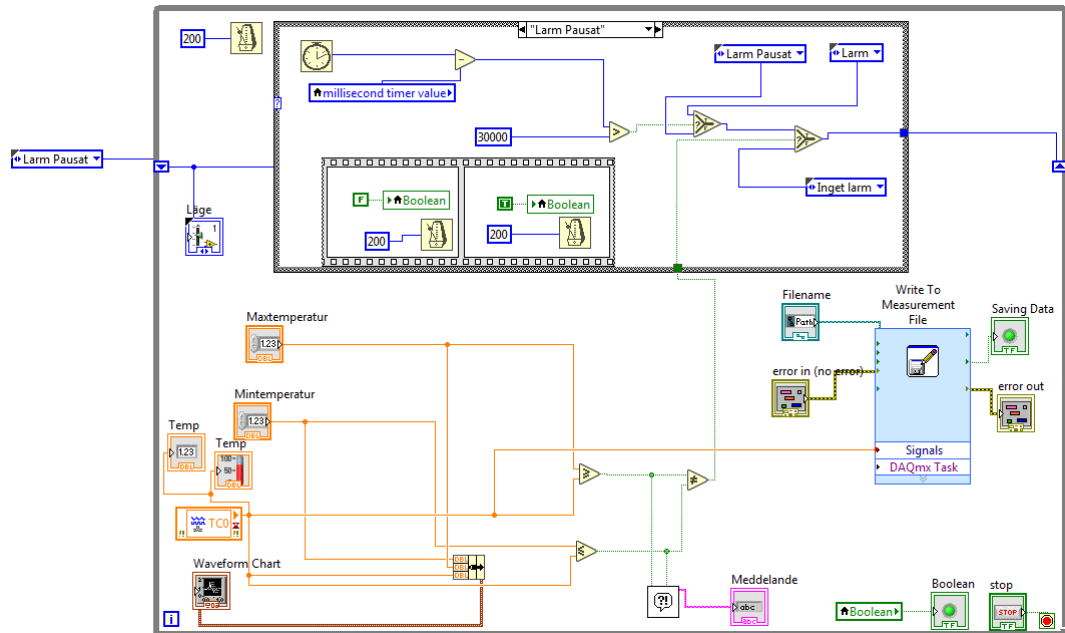
Läget "Inget Larm" är ett standbyläge som väntar på en signal som från temperaturgivaren när temperaturen passerar min eller max då den byter till läget "Larm". Blockdiagrammet när systemet är i detta läget går att se i Figur D.2.



Figur D.2: Hur blockdiagrammet ser ut vid läget "Larm".

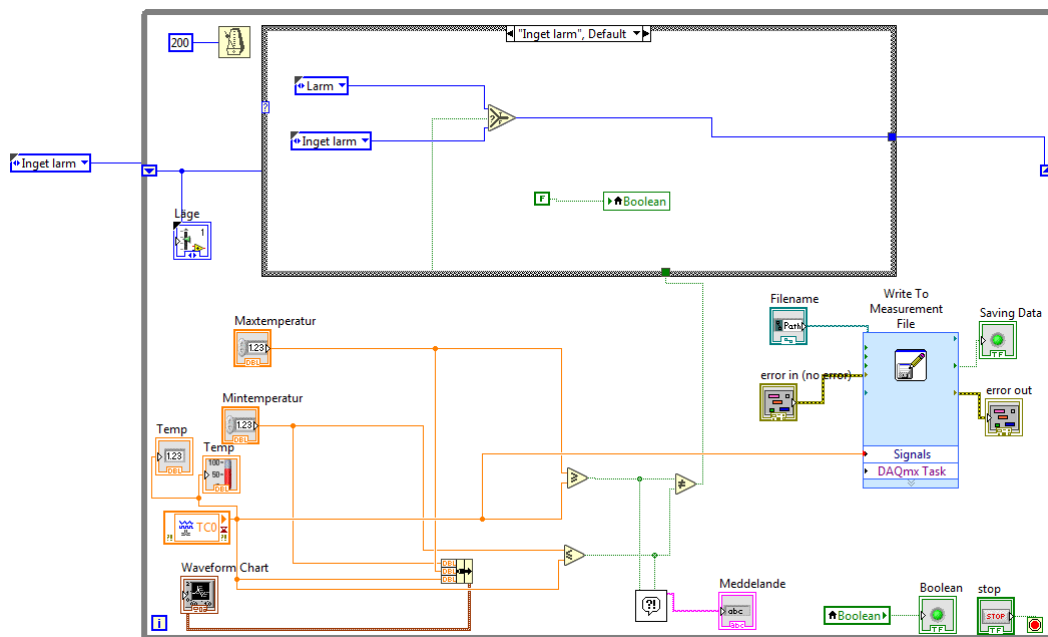
Vid läget "Larm" kommer en larmsignal att upprepas och en varningslampa kommer att blinka på instrumentbrädan. Det dyker också upp ett meddelande som säger

ifall temperaturen är för hög eller för låg. "Larm" kommer att fortsätta fram tills temperaturen återgår till ett säkert värde eller att man klickar på Kvitтера larm-knappen på instrumentbrädan. Blockdiagrammet när systemet är i detta läget går att se i Figur D.3.



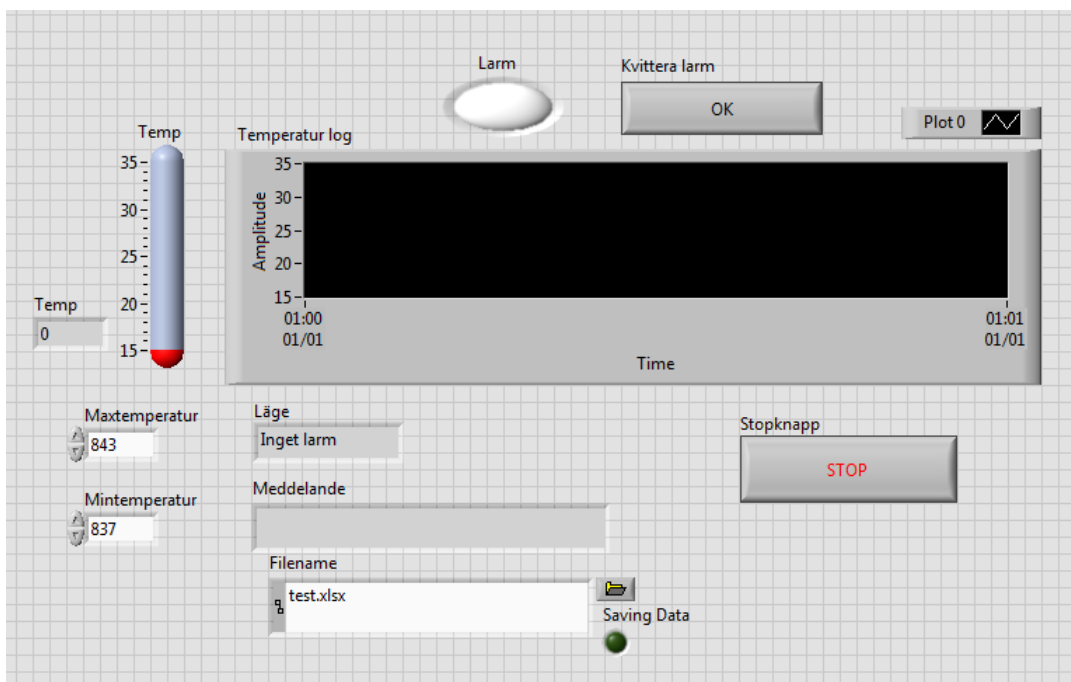
Figur D.3: Hur blockdiagrammet ser ut vid läget "Larm Pausat".

Efter man klickat på Kvitтера larm-knappen går systemet in i läget "Larm Pausat". I detta läget kommer lampan på instrumentbrädan fortfarande att blinka men larmsignalen kommer att vara avstängd i 30 sekunder. Efter att 30 sekunder passerat återgår systemet till läget "Larm" och larmsignalen börjar låta igen. Återgår temperaturen till ett bra värde kommer systemet gå till läget "Inget larm" även om 30 sekunder inte passerat. Blockdiagrammet när systemet är i detta läget går att se i Figur D.4.



Figur D.4: Hur blockdiagrammet ser ut vid läget "Inget Larm".

I Figur D.5 visas instrumentpanelen. Det är från detta fönster systemet körs med ansatta värden. På instrumentpanelen anges även larm och felmeddelanden samt temperaturförloppet.



Figur D.5: Instrumentpanel för temperatursystemet.

D.4 Fortsatt arbete

Fortsatt arbete på koden är att ange tolererad max- och minimumtemperatur som funktion av satt börvärde för termoelementet. Detta för att effektivisera omställningen till ny testpunkt med annan temperatur. Utöver detta behöver exporteringen till excel kompletteras så att datum och tid anges för respektive mätpunkt. När detta är genomfört bör systemet utökas med tryck- och flödesmoduler.

E. Testmatris och ventilinstruktioner

Nedan visas den framtagna testmatrisen som förgasartesterna utgick ifrån. Notera att dessa värden i praktiken ej erhöles exakt.

u

Tabell E.1: Försöksmodell för tre parametrar.

Experiment	Koncentration [Vol%]	Flöde [l/min]	Temperatur [°C]	y
1	60	10,0	810	y ₁
2	20	10,0	810	y ₂
3	60	5,0	810	y ₃
4	20	5,0	810	y ₄
5 (0)	40	7,5	840	y ₅
6	60	10,0	870	y ₆
7	20	10,0	870	y ₇
8	60	5,0	870	y ₈
9	20	5,0	870	y ₉
10 (0)	40	7,5	840	y ₁₀

Vid tester följdes en matningsprocedur för att minimera mängden luft som följer med tråkulorna vid inmatningen. Proceduren kan sammanfattas i följande sju steg:

1. Ventil K1 och B2 hålls stängda, B1 och K2 öppna
2. Bränslet släpps ner genom B1, varpå B1 stängs
3. Ventil K1 öppnas
4. Ventil B2 öppnas samtidigt som K2 stängs
5. Öppna K2 och stäng B2 samtidigt
6. Stäng K1
7. Återgå till steg 1

F. Beräkningar

I denna bilaga redogörs för de beräkningar som utfördes för att beräkna kolutbyte och halten av H₂, CO, CO₂ och CH₄ i utflödesgasen. Beräkningarna är baserade på resultaten från de två analysystemen, GC och IR, kopplade till förgasaren.

Första steget i beräkningarna var att beräkna det molflöde av träkulor som förgasaren matades med. I dessa beräkningar antogs att träkulorna hade samma molära sammansättning som torrt trä, CH_{1,45}O_{0,72} [42]. Massan av kulorna, inklusive innehållande fukt uppmättes. Därefter subtraherades mängden fukt i bränslet, vilken var känd från TGA-analysen (Avsnitt 3.5), och den torra massan beräknas. De impregnerade kulorna antogs bestå av två komponenter: den torra vikten av icke-impregnerade träkulor samt den pålagda vikten av kaliumkarbonat. Då matningsfrekvensen som användes i testerna var en kula var 15:e sekund kunde massflödet av träkulor, $\dot{m}_{bränsle,in}$, bestämmas. Utifrån massflödet bestämdes sedan molflödet $\dot{n}_{bränsle,in}$ genom Ekvation F.1, där $M_{bränsle}$ är molmassan för kulorna.

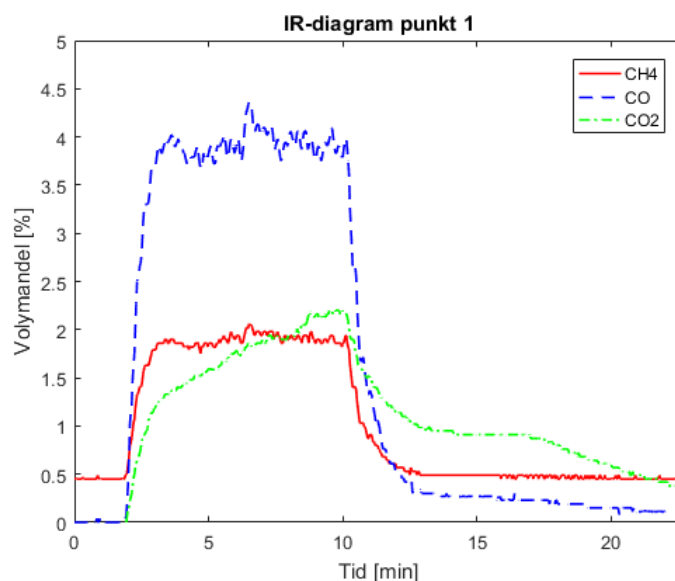
$$\dot{n}_{bränsle,in} = \frac{\dot{m}_{bränsle,in}}{M_{bränsle}} \quad (\text{F.1})$$

De beräknade massflödena och molflödena presenteras i Tabell F.1 nedan tillsammans med massa och molmassa för vanliga respektive impregnerade kulor. Kolet stod i ett 1:1-förhållande till det totala molflödet, det vill säga $\dot{n}_{bränsle,in} = \dot{n}_{kol,in}$.

Tabell F.1: Specifikationer för bränsleflödet.

Bränsletyp	Träkulor	Träkulor impregnerade med K ₂ CO ₃
Massa [g]	0,187	0,249
Molmassa [g/mol]	24,97	32,39
Fuktandel [%]	8,17	4,02
Massflöde [g/min]	0,682	0,947
Molflöde [mmol/min]	27,31	29,23

För beräkningar gällande utflödet användes först en IR-graf för att utläsa vid vilken tidpunkt processen hade nått stationärt tillstånd. Exempel på IR-graf ses i Figur F.1 nedan, där mängden CO, CO₂ och CH₄ i utflödet ansågs ha stabiliserats efter cirka 10 minuter.



Figur F.1: Exempel på IR-graf där y-axeln är volymandel av utflödet och x-axeln är tid i minuter. Den röda (heldragna) linjen visar CH₄, den blå (streckade) linjen visar CO och den gröna (streckade/prickiga) linjen visar CO₂.

Den tidpunkt som motsvarade stationärt tillstånd letades sedan upp i ett dokument med datapunkter från GC:n. Ett exempel på hur datapunkterna från GC:n presenterades kan ses i Tabell F.2, där den gråmarkerade kolumnen är den tidpunkt som motsvarade stationärt tillstånd i Figur F.1.

Tabell F.2: Datapunkter från GC:n.

Klockslag	13:01:21	13:02:35	13:05:14	13:06:33	13:09:08
mol% H ₂	2,73	3,04	3,85	4,24	2,87
mol% O ₂	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01
mol% N ₂	88,14	86,68	86,13	84,94	93,24
mol% CH ₄	1,28	1,43	1,54	1,38	0,03
mol% CO	3,95	4,31	4,23	4,14	0,91
mol% CO ₂	1,45	1,71	1,93	2,13	1,23
mol% C ₂ H ₄	0,37	0,4	0,4	0,4	0,03
mol% C ₂ H ₂	0,09	0,09	0,09	0,08	0,01
mol% C ₂ H ₆	0,01	0,01	0,01	0,01	-

För att bestämma det totala molutflödet, $\dot{n}_{produktgas}$, användes det faktum att kvävgasen var inert. Då volymsinflödet av kvävgas, $\dot{V}_{N_2,in}$, var känt kunde $\dot{n}_{produktgas}$ bestämmas med Ekvation F.2. y_{N_2} är molfraktionen av N₂ hämtad från Tabell F.2, P är totaltrycket, T är temperaturen och R är allmänna gaskonstanten.

$$\dot{n}_{produktgas} = \frac{P\dot{V}_{N_2,in}}{RTy_{N_2}} \quad (F.2)$$

Utifrån $\dot{n}_{produktgas}$ kunde sedan molutflödet för respektive komponent bestämmas då också molfraktionerna var kända (Tabell F.2). Det totala kolutbytet, X_{kol} , beräknades genom att summera allt kol i utflödet och jämföra med kolet i inflödet, se Ekvation F.3.


$$X_{kol} = \frac{(y_{CH_4} + y_{CO} + y_{CO_2} + 2(y_{C_2H_4} + y_{C_2H_2} + y_{C_2H_6}))\dot{n}_{produktgas}}{\dot{n}_{kol,in}} \quad (F.3)$$

Förutom kolutbytet beräknades också halterna av H_2 , CO , CO_2 och CH_4 i utflödet. Dessa halter jämfördes med massinflödet och resultatet av dessa beräkningar presenteras som "*mmol* av en viss komponent i utflödet dividerat med g bränsle i inflödet".

G. Planscher

BIOMETHANE
A WAY TO COMBAT CLIMATE CHANGE


CLIMATE CHANGE
Climate change and global warming is an increasingly relevant problem today. The search for a good substitute for fossil fuel is ongoing and this is where biomethane could be the savior.



THE ECOFRIENDLY CHOICE
Biomethane produce a lower net increase in carbon dioxide gases instead of fossil based fuels. The process to produce biomethane is a very flexible one which can use most biomass as raw material even waste parts such as branches from other forest industries.

CHALMERS AND BIOMETHANE
Since 2013 there has been a series of bachelor theses studying different units to a miniature biomethane factory were being studied and put together. The end goal would be a functioning process that produces methane for Chalmers Shell Ecomarathon car.

BIOMASS
↓
GASIFICATION
↓
SYNGAS TO METHANE
↓
USAGE IN SHELL ECOMARTHON CAR



Åsa Eliasson, Joey Frey, Emelie Gierow, Olle Johnsson, Linus Kron and Julia Rittfors.
B.Sc. Thesis carried out at Departments of Space, Earth and Environment.
Chalmers University of Technology, Sweden.

GASIFIER

CREATING SYNTHESIS GAS FROM WOOD

GASIFICATION REACTION

With gasification it is possible to produce methane gas from biomass. By adding water the following reactions will occur:

$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$$

$$C + CO_2 \rightarrow 2CO$$

$$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$$

REACTOR

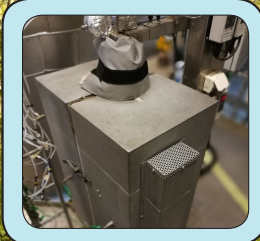
The reactor is placed in an oven so that the required temperature of 700-900 degrees celsius is reached.

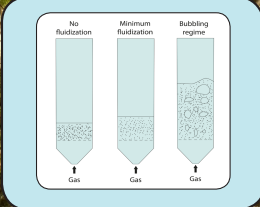
FLUIDIZED BED


The reactor uses a fluidised bed where water vapor and nitrogen gas flows through a small particle system. This makes the system behave as a liquid which increases the heat transfer to the biomass and speeds up the process.

TESTING CONDITIONS

After setting up the system the team tested different operating conditions to find the optimal ones. Different settings for in-flow, temperature and steam content were tested. The group also tested pellets impregnated with potassium which is said to give a better exchange.







Åsa Eliasson, Joey Frey, Emelie Gierow, Olle Johnsson, Linus Kron and Julia Rittfors.
B.Sc. Thesis carried out at Departments of Space, Earth and Environment.
Chalmers University of Technology, Sweden.