

# Woord vooraf

Een thesis schrijven is de ideale manier om 4 jaar van zwoegen en zweten af te sluiten. Met dit onderzoek over biogasinstallaties werd niet enkel onze opgedane kennis getest maar ook onze creativiteit. Verschillende aspecten van de wetenschap kwamen binnen dit onderzoek aanbod, hierbij willen we onze collega van master elektronica, ondertussen kameraad, Sebastiaan Bosmans van harte bedanken voor alle bijdragen die hij geleverd heeft aan dit onderzoek. We hebben samen dikwijls in de *shit* gezeten, zowel letterlijk als figuurlijk. Maar achteraf was het altijd weer leut en hebben we er veel van opgestoken. Zonder hem zou de sturing van de biogasinstallatie nooit dezelfde zijn geweest, terwijl dit het kloppend hart is van de installatie.

Onze interne promotor Prof. dr. ir. Wim Deferme kunnen we zeker niet wegdenken uit dit onderzoek. Hij stond ons bij met raad en daad en wist ons altijd weer te stimuleren om net dat stapje meer te zetten. Daarnaast gaf hij ons de volledige vrijheid om er ons eigen ding van te maken. Bedankt voor de steun Wim!

Vervolgens willen we ook onze externe promotor Ing. Inge Verboven bedanken. Deze thesis is immers een voortvloeiende uit haar werk "Toepassing van anaerobe vergisting in Senegal" [1].

Voor de opstart van onze installatie konden we beroep doen op een kameraad Willem Theuwis. Hij bezorgde ons de nodige hoeveelheid koeienmest en gaf ons daarnaast een rondleiding met de nodige uitleg over hun biogasinstallatie. Bedankt Willem voor de hulp.

Verder willen we ook Jan Czech van de UHasselt bedanken. Hij heeft al de gasstalen geanalyseerd voor ons onderzoek. Hoewel de analyses tijdrovend waren en niet altijd evident, liet hij meteen al zijn werk vallen van zodra we door de deur kwamen. Zonder deze analyses waren we nergens geraakt, bedankt.

De bedrijfsbezoeken hebben ons een goed beeld gegeven over de werking van grote installaties. Hierbij willen we Laurens en Jean Scevenels bedanken voor het bedrijfsbezoek aan Molenheide en de biogasinstallatie van Piet Lavrijsen. Alsook het Varkens Innovatie Centrum willen we bedanken voor het bezoek aan hun installaties en de inzicht in de informatie over voorgaande onderzoeken.

Tot slot willen we nog alle personen bedanken die ons bijgestaan hebben bij ons onderzoek. Het zijn de mensen die ons materiaal hebben geschonken, keukenafval hebben bewaard voor de voeding en de thesis kritisch hebben nagelezen.



# Inhoudsopgave

## WOORD VOORAF

## ABSTRACT

## ABSTRACT IN ENGLISH

<b>1</b>	<b>INLEIDING .....</b>	<b>13</b>
1.1	SITUERING.....	13
1.2	PROBLEEMSTELLING .....	13
1.3	DOELSTELLINGEN.....	14
1.4	METHODE.....	14
<b>2</b>	<b>LITERATUURONDERZOEK .....</b>	<b>17</b>
2.1	ANAEROBE VERGISTING.....	17
2.1.1	Algemeen .....	17
2.1.2	Biomassa .....	18
2.1.3	Biogas .....	19
2.1.4	Digestaat .....	20
2.2	FACTOREN DIE DE ANAEROBE VERGISTING BEÏNVLOEDEN.....	21
2.2.1	Samenstelling .....	21
2.2.2	Temperatuur .....	22
2.2.3	pH .....	22
2.2.4	Types van voeding/gasproductie .....	22
2.2.5	Vorm vergister.....	23
2.2.6	Verblijftijd.....	23
2.3	VOORBEHANDELING.....	24
2.3.1	Mechanisch .....	24
2.3.2	Thermisch.....	25
2.3.3	Chemisch .....	26
2.3.4	Ultrasoon.....	26
2.3.5	Biologisch .....	27
2.4	MARKTONDERZOEK.....	28
2.4.1	VIVAM (India) .....	28
2.4.2	Biotech (India) .....	29
<b>3</b>	<b>MATERIAAL EN METHODEN .....</b>	<b>31</b>
3.1	OPSTELLING.....	31
3.1.1	Ontwerp .....	31
3.1.2	Vormgeving .....	32
3.1.3	In- en uitvoer.....	32
3.1.4	Verwarming.....	33
3.1.5	Isolatie .....	34
3.1.6	Menging .....	36
3.1.7	Gasafvoer en opslag .....	38
3.1.8	Aansturing & metingen .....	39
3.1.9	Kostenanalyse .....	40
<b>4</b>	<b>RESULTATEN EN DISCUSSIE .....</b>	<b>41</b>

4.1	RESULTATEN.....	41
4.1.1	Situering .....	41
4.1.2	Koeienmest als biomassa .....	41
4.1.2.1	Voeding .....	41
4.1.2.2	Temperatuur .....	42
4.1.2.3	Opbrengst.....	44
4.1.2.4	Gasanalyse.....	44
4.1.2.5	Rendabiliteit .....	45
4.1.3	keukenafval als biomassa .....	47
4.1.3.1	Voeding .....	47
4.1.3.2	Temperatuur .....	47
4.1.3.3	Druk.....	48
4.1.3.4	Opbrengst.....	49
4.1.3.5	Gasanalyse.....	50
4.1.3.6	Rendabiliteit .....	51
4.1.4	Besluit.....	53
4.2	ANALYSE VAN COMMERCIELE TOEPASBAARHEID .....	54
4.2.1	Situering .....	54
4.2.2	Ontwerp .....	54
4.2.3	Werking.....	55
4.2.3.1	Verwerking vaste biomassa .....	55
4.2.3.2	Verwerking vloeibare biomassa .....	56
4.2.3.3	Mengvat .....	57
4.2.3.4	Vergistingsvat .....	58
4.2.4	Ergonomie .....	59
4.2.5	Rendabiliteit .....	60
4.2.5.1	Kostenanalyse.....	60
4.2.5.2	Verbruik.....	61
4.2.5.3	Geschatte gasopbrengst.....	61
4.2.5.4	Rendabiliteit .....	62
<b>5</b>	<b>BESLUIT.....</b>	<b>63</b>
	<b>LITERATUURLIJST .....</b>	<b>65</b>
	<b>BIJLAGEN.....</b>	<b>67</b>

# Lijst van tabellen

Tabel 1: Samenstelling biogas [5] .....	19
Tabel 2: Invloed van een stof op vergisting bij een bepaalde concentraties [8].....	21
Tabel 3: Beschikbare modellen Vivam [13] .....	29
Tabel 4: Beschikbare modellen Biotech [14].....	29
Tabel 5: Berekening energieverlies in het ideale en werkelijke geval.....	35
Tabel 6: Kostenanalyse opstelling .....	40
Tabel 7: Resultaten gasanalyses koeienmest.....	44
Tabel 8: Resultaten gasanalyse keukenafval met lucht.....	50
Tabel 9: Resultaten gasanalyse keukenafval zonder lucht.....	50
Tabel 10: Berekeningen opgewekte energie .....	52
Tabel 11: Berekeningen energie winst .....	52
Tabel 12: Kostenanalyse concept.....	60
Tabel 13: Berekeningen warmteverlies concept .....	61
Tabel 14: Energieverbruik concept.....	61
Tabel 15: Energieopbrengst gasproductie concept.....	62
Tabel 16: Energieopbrengst concept.....	62



# Lijst van figuren

Figuur 1: Energieproductie België (15/12/2013) [2] .....	13
Figuur 2: Schematische voorstelling anaerobe vergisting [1].....	17
Figuur 3: Nabewerking digestaat [5] .....	20
Figuur 4: Verticale vergister (eentraps en tweetraps), horizontale vergister [9] .....	23
Figuur 5: Cumulatieve biogasproductie per dag [4].....	25
Figuur 6:VIVAM biogasinstallatie [13] .....	28
Figuur 7: Biogasinstallatie Biotech [14] .....	29
Figuur 8: Doorsnede vergistingsvat met nummering.....	31
Figuur 9 :Vergistingsvat .....	32
Figuur 10: Schematische voorstelling van dichtheidstest .....	33
Figuur 11: Verwarmingselement .....	33
Figuur 12: Overzicht temperatuur.....	34
Figuur 13: Schuimvorming in vergister.....	36
Figuur 14: Vervorming deksel door drukopbouw .....	36
Figuur 15: Mengstaaf.....	37
Figuur 16: Boormachine als menger.....	37
Figuur 17: Afzetting biomassa.....	37
Figuur 19: Afscherming gasconnectie .....	38
Figuur 18: Oude (links) en nieuwe (rechts) gasconnectie.....	38
Figuur 20: Gaszakje 5 liter.....	39
Figuur 21: Binnenband 570 liter .....	39
Figuur 22: Opslagkolom gasstaal.....	45
Figuur 23: Vermaalde biomassa na vleesmolen.....	47
Figuur 24: Overzicht concept.....	55
Figuur 25: Verwerking vaste biomassa .....	56
Figuur 26: Verwerking vloeibare biomassa.....	56
Figuur 27: Mengvat .....	57
Figuur 28: Vergistingsvat .....	58
Figuur 29: Ergonomische aspecten .....	59
Grafiek 1: Biogasopbrengst van verschillende inputstromen [3].....	18
Grafiek 2: Nieuwe opstart met lage temperatuur.....	42
Grafiek 3: Temperatuurverloop koeienmest.....	43
Grafiek 4: Gemiddeld verbruik van de verwarming per dag .....	46
Grafiek 5: Temperatuurverloop bij vergisting van keukenafval .....	48
Grafiek 6: Drukverloop & leegmaken gasopslag.....	48
Grafiek 7: Gasproductie bij keukenafval.....	49
Grafiek 8: Gemiddeld verbruik verwarming per dag bij keukenafval.....	51
Grafiek 9: Aantijd warmtelint .....	52





# Abstract

VZW “Students for energy in Africa”, kwam met het innovatieve idee om onderzoek te doen naar kleinschalige biogasinstallaties. Het probleem bij deze installaties is het warmteverlies omwille van de koudere omgevingstemperatuur. Daarom ligt de focus op het verbeteren van de rendabiliteit en het bepalen van de commerciële toepasbaarheid. De uitwerking gebeurt in 3 stappen, namelijk: opbouw van een testopstelling, analyse van koeienmest en keukenafval en conceptuitwerking voor commercieel gebruik.

De opbouw van de testopstelling gebeurt op basis van gekende principes die vervolgens herschaald zijn naar een vergister van 200 liter. De opstelling wordt gebruikt voor analyses met koeienmest en keukenafval als biomassa. Gedurende de analyses worden de temperatuur, druk en voeding bijgestuurd om zo de gasproductie te optimaliseren. Uit de gemeten waarden wordt dan de rendabiliteit en de commerciële toepasbaarheid bepaald.

Bij het analyseren van de resultaten blijkt dat het vergistingsproces van koeienmest nog in de opstartfase was. Hierdoor zijn de waarden niet representatief. De analyse van keukenafval is echter correct verlopen, waarbij een gasproductie van 300 liter per dag is behaald. Tijdens de metingen zijn er gasanalyses gedaan om een beter inzicht te krijgen in het proces. Na uitwerking van een commercieel concept blijkt de installatie energetisch rendabel. De installatie is echter niet geschikt voor commercieel gebruik door de lange terugverdientijd.



# Abstract in English

Non-profit organization "Students for energy in Africa", came up with the innovative idea to investigate small-scale biogas plants. The problem with these installations is the heat loss due to the colder environment temperature. Therefore, the focus is on improving the profitability and determine the commercial applicability. The development is done in three steps, namely: building a test setup, analysis of cow dung and kitchen waste and concept development for commercial use.

The structure of the test set-up is based on known principles, which will be scaled to a 200 liter digester. The test set-up is used for analyzes with cow dung and kitchen waste as biomass. During the analysis, the temperature, pressure and feeding will be adjusted to optimize the gas production. From the measured values, the profitability and the commercial applicability will be determined.

The results show that the fermentation of cow dung was still in the start-up phase during the analysis. Because of this, the results are not representative. The analysis of kitchen waste, however, is performed correctly, causing a gas production of 300 liters a day is achieved. During the measurements, gas analysis were performed to have better understanding of the process. After developing a commercial concept the installation turns energetically profitable. However, the installation is not suitable for commercial use due to the long payback time.



# 1 Inleiding

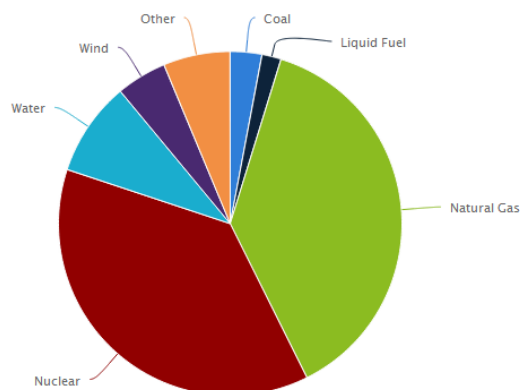
## 1.1 Situering

VZW “Students for energy in Africa” is een organisatie die in samenwerking met studenten energieproblemen oplost in Afrika. Hierbinnen heeft Inge Verboven de thesis “Toepassing van anaerobe vergisting in Senegal” uitgewerkt [1]. Voortvloeiend uit dat onderzoek ontstond onze masterproef “Optimalisatie van een biogasinstallatie voor kleinschalig gebruik”.

Omdat er tegenwoordig steeds meer aandacht wordt besteed aan hernieuwbare energiebronnen heeft Wim Deferme besloten om onderzoek te doen naar biogasinstallaties voor particulier gebruik. Er zal onderzocht worden of het mogelijk is om een biogasinstallatie te ontwikkelen voor thuisgebruik. Hierbij moet rekening worden gehouden met het Belgische klimaat. Er zijn reeds enkele grote biogasinstallaties in de agrarische sector die tot enkele megawatts aan energie opwekken. Deze installaties gebruiken meestal mest van koeien, varkens of kippen als biomassa. Ons onderzoek zal zich echter focussen op veel kleinere installaties en bovendien wordt er gebruik gemaakt van huis- en tuinafval.

## 1.2 Probleemstelling

Het is algemeen bekend dat er een energieprobleem is in de huidige maatschappij. Het merendeel van onze energie wordt opgewekt uit aardgas (37.86 %) of door middel van kernenergie (37,46 %) (Figuur 1). De nadelen van deze twee energievormen zijn dat aardgas een uitputtelijke bron is en kernenergie zeer schadelijk afval met zich mee brengt. Om deze redenen moet er gezocht worden naar alternatieve energiebronnen, een mogelijke oplossing is biogas. Het biogas wordt gewonnen uit organische afvalstromen, waardoor deze bron “onuitputtelijk” is. Op deze manier zou de afvalberg kleiner kunnen worden en zou er voorzien kunnen worden in onze eigen energiebehoefte. [2]



**Figuur 1: Energieproductie België (15/12/2013) [2]**

Er zijn al meerdere experimenten gedaan met kleine biogasinstallaties maar tot nu toe waren dergelijke installaties niet rendabel. Er diende meer energie toegevoegd te worden om de installatie voldoende warm te houden, dan er energie uit het biogas kon gewonnen worden. De eerste reden hiervoor is de slechte isolatie van het vergistingsvat. Het natuurlijke vergistingsproces

vindt immers plaats in een temperatuurbereik van 0 °C tot 70 °C. Aangezien de omgeving waarin het vat geplaatst wordt meestal kouder is treedt er warmteverlies op, waardoor het vat verwarmd moet worden. De tweede reden is de efficiëntie van de verwarming. Om het vat op temperatuur te houden, moet er een verwarming in worden geplaatst. De omzetting van elektriciteit (of eventueel van biogas) naar warmte moet samen met de overdracht van warmte naar het vergistingsvat op een efficiënte manier verlopen.

## 1.3 Doelstellingen

De hoofddoelstelling van het project is het rendabel maken van de biogasinstallatie. Hiervoor dient de toegevoegde energie zoveel mogelijk gereduceerd te worden, want de installatie zal enkel rendabel zijn als deze toegevoegde energie kleiner is dan de energie van het geproduceerde gas.

De tweede doelstelling is het automatiseren en visualiseren van de parameters van de biogasinstallatie zodat de gebruiker enkel moet zorgen voor de aanvoer van organisch afval. De onderdelen die geautomatiseerd moeten worden zijn:

- 1 invoer/dosering biomassa,
- 2 regeling/uitlezing temperatuur, druk en pH vergister,
- 3 verwerking/zuivering biogas.

De derde doelstelling houdt in dat de installatie gebruikt moet kunnen worden door één gezin. Dat wil zeggen dat het mogelijk moet zijn om met het afval van één gezin een biogasinstallatie te voeden. Indien het niet mogelijk is om dan nog rendabel te werken, kunnen er grotere clusters worden gevormd. Dat is bijvoorbeeld mogelijk bij een appartementsgebouw of in een straat met meerdere woningen.

De laatste doelstelling omvat de commercialisatie van de biogasinstallatie, deze is enkel van toepassing indien er besloten kan worden dat de installatie rendabel is. Bij de commercialisatie wordt er gekeken hoe deze installatie in een woning geïntegreerd kan worden, en welke materialen hiervoor geschikt zijn.

## 1.4 Methode

Om het onderzoek vlot te laten verlopen is er gebruik gemaakt van een stappenplan. In dit plan worden de belangrijkste stappen weergegeven om zo de gewenste doelstellingen te bereiken. Deze stappen zijn:

- 1 literatuurstudie, marktonderzoek en veldstudie,
- 2 ontwerp van opbouw en procesparameters,
- 3 analyseren opstelling,
- 4 ombouw opstelling en analyse,
- 5 commercialiseren.

In de eerste stap van het onderzoek wordt er opzoek gegaan naar informatie, wat op verschillende manieren zal gebeuren. Zo wordt er een literatuurstudie opgesteld over de algemene werking van biogasinstallaties. Op deze manier kan volledig doorgrond worden wat het proces precies inhoudt en wat de meest voorkomende problemen zijn. Daarnaast is een marktonderzoek van belang, waarin wordt gekeken of er al kleine biogasinstallaties op de markt bestaan en waar ze worden toegepast. Het klimaat waar de installaties worden toegepast is cruciaal, omdat dat in grote mate de rendabiliteit bepaalt. Indien er al kleine biogasinstallaties bestaan, kunnen deze principes toegepast worden op onze installatie. Vervolgens is het ook belangrijk dat er praktijkervaring wordt opgedaan, wat door middel van een veldstudie verwezenlijkt kan worden. Door het bezoeken van enkele grotere installaties kan er een beter beeld gevormd worden van de praktijk, zodat veel problemen reeds op voorhand voorkomen kunnen worden.

In de tweede stap wordt er een ontwerp gemaakt voor de “ideale” opbouw van de biogasinstallatie en wordt er bepaald welke procesparameters een rol zullen spelen. Omdat één van de doelstellingen het automatiseren en visualiseren van de biogasinstallatie is, moet hier in de ontwerpfase rekening mee worden gehouden. Met behulp van de literatuurstudie, het marktonderzoek en de veldstudie is er reeds bepaald welke parameters een belangrijke invloed hebben op het proces. Het is noodzakelijk dat deze parameters correct gemeten kunnen worden, zodat hiermee het proces kan worden bijgestuurd.

De hoofddoelstelling is het optimaliseren van de rendabiliteit, wat deel uit maakt van de derde stap. In eerste instantie zal er gebruik worden gemaakt van koeienmest, afkomstig van een werkende biogasinstallatie. Hierdoor zal de analyse en opstart eenvoudiger verlopen, aangezien de nodige bacteriën aanwezig zijn in de koeienmest. Als maat voor de rendabiliteit zal er een verschil gemaakt worden van de geproduceerde energie in gasvorm en de toegevoerde energie zoals de verwarming en de aansturing. Door het regelen van de procesparameters zal er bepaald worden wanneer de optimale rendabiliteit wordt bereikt. Ten slotte zal er met een gasanalyse bepaald worden wat de samenstelling is van het biogas, wat een maat geeft voor de energiewaarde van het gas.

Vervolgens zal in de vierde stap de biogasinstallatie worden aangepast voor andere afvalstoffen. Deze afvalstoffen bestaan uit huis- en tuinafval. Hiervoor zal dezelfde analyse toegepast worden als in stap drie, om zo de mogelijke opbrengst te bepalen.

Tenslotte zal er in de laatste stap nagedacht worden over de eventuele commercialisatie van de installatie. Indien uit de voorgaande stappen blijkt dat de kleine biogasinstallatie rendabel is, zal er gekeken worden op welke manier deze opstelling geïntegreerd kan worden in een standaard woning. Hierbij zal dus meer aandacht worden besteed aan vormgeving, hanteerbaarheid, kostprijs en exploitatiekosten.



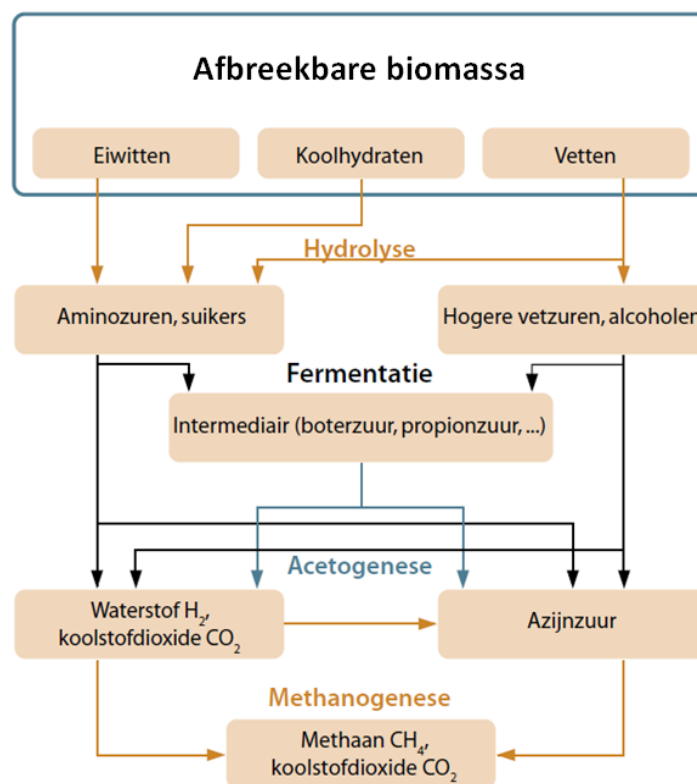


# 2 Literatuuronderzoek

## 2.1 Anaerobe vergisting

### 2.1.1 Algemeen

Anaerobe vergisting is een proces waarbij biomassa omgezet wordt tot biogas en digestaat. Deze omzetting wordt teweeg gebracht doordat bacteriën de biomassa zullen afbreken in een zuurstofloze omgeving. Deze afbraak bestaat uit verschillende metabolische reacties die ervoor zorgen dat 4 verschillende stappen doorlopen worden: de hydrolyse, de fermentatie, de acetogenese en de methanogenese (Figuur 2). [3]



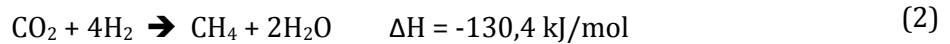
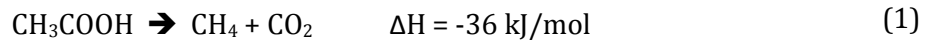
Figuur 2: Schematische voorstelling anaerobe vergisting [1]

*De hydrolyse*, in deze stap worden de eiwitten, koolhydraten en vetten omgezet naar enerzijds aminozuren en suikers en anderzijds hogere vetzuren en alcoholen. Deze stap wordt ook wel eens de tijdsbepalende stap genoemd omdat deze het langste duurt van heel de anaerobe vergisting. Afhankelijk van de molecule zal de afbraak enkele uren duren bij koolhydraten tot enkele dagen bij eiwitten en vetten. [3, 4]

*De fermentatie*, in deze stap worden organische componenten van de hydrolyse reactie verder afgebroken tot eenvoudige verbindingen zoals H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, intermediaire producten (boterzuur, propionzuur, ...) en azijnzuur. De bacteriën die hier verantwoordelijk voor zijn worden de fermentatie bacteriën genoemd. Verder zullen ook de laatste resten zuurstofgas opgebruiken worden waardoor het anaerobe milieu ontstaat. [3, 4, 5]

De acetogenese, in deze stap worden de intermediaire producten afgebroken tot H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> en azijnzuur. De bacteriën die zorgen voor deze omzetting zijn de acetogene bacteriën. [3, 5]

De methanogenese, in deze laatste stap reageren H<sub>2</sub> en CO<sub>2</sub> en azijnzuur tot Methaan en CO<sub>2</sub>. De omzetting gebeurt door 2 verschillende reacties. Ten eerste kan dit door de methaanbacteriën die het azijnzuur zullen splitsen (1). De tweede mogelijkheid is dat het CO<sub>2</sub> gereduceerd wordt door H<sub>2</sub> (2). [1, 3, 4]

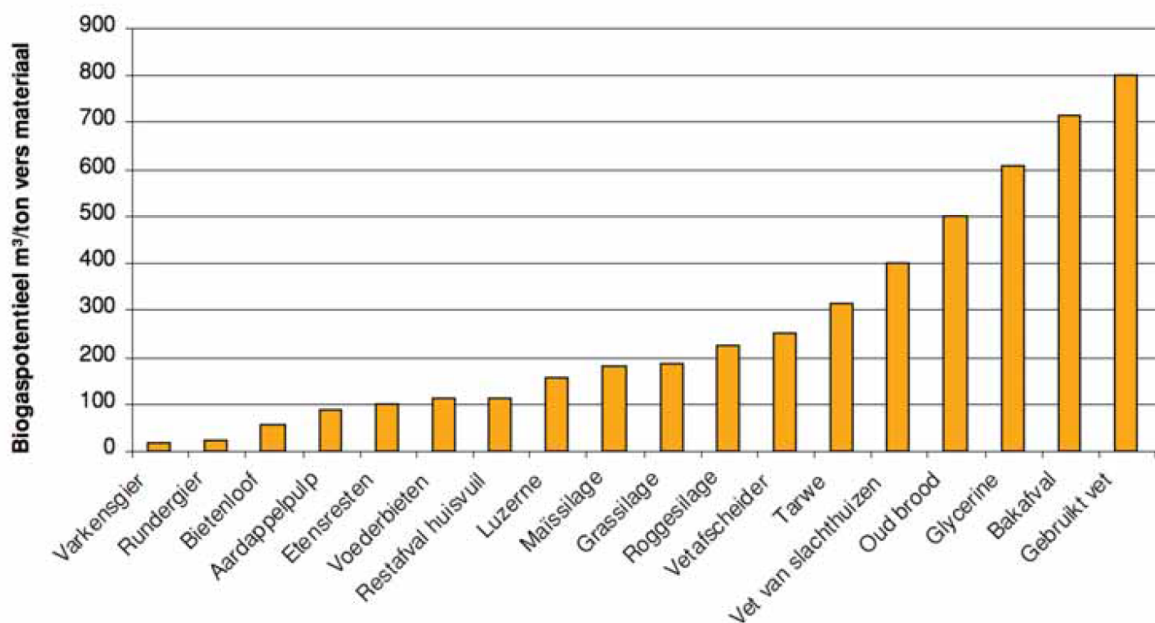


### 2.1.2 Biomassa

Biomassa is het hoofdbestanddeel in de productie van Methaan. De biomassa kan 3 verschillende oorsprongen hebben: landbouw, industrie en intergemeentelijk afval. In deze thesis zal hoofdzakelijk het intergemeentelijk afval van belang zijn met daaronder restafval en GFT (Groente-, fruit- en tuinafval). [6]

Als de theoretische biogasopbrengst in m<sup>3</sup>/ton vers materiaal wordt bekeken kan er iets opmerkelijks besloten worden. Het biogaspotentieel van mest is zeer laag terwijl dit hoofdzakelijk wordt toegepast. Dat komt hoofdzakelijk doordat er een mestoverschot is in België, waardoor het economisch gezien een zeer interessante alternatieve energie bron is. Maar hierdoor blijkt ook dat dat er veel meer potentieel zit in biogasinstallaties, daarom dat er ook steeds vaker energiegewassen gekweekt worden als input voor de vergister. Er kan dus besloten worden dat met het intergemeentelijk afval veel hogere opbrengsten kan halen als mest, zoals weergegeven wordt op (Grafiek 1). Zo geven bijvoorbeeld etensresten een gemiddelde opbrengst van 100 m<sup>3</sup>/ton en oliën zelfs meer als 600 m<sup>3</sup>/ton. [3, 6]

**Biogasopbrengst verschillende inputstromen**



Grafiek 1: Biogasopbrengst van verschillende inputstromen [3]

### 2.1.3 Biogas

Biogas bestaat uit verschillende gassen, het meest voorkomende gas is Methaan met 45-85 vol% gevolgd door CO<sub>2</sub> met 25-50 vol%. Het aanwezige Methaan, ook wel beschouwd als de energie dragende moleculen, staat in voor de verbranding. De procentuele hoeveelheid methaangas bepaalt hierdoor de verbrandingswaarde van het mengsel. CO<sub>2</sub> daarnaast heeft niet direct gevolgen voor het gas. Meestal zal dit verwijderd worden om de calorische waarde van het gas te verhogen. Tenslotte zijn er nog verschillende andere componenten aanwezig die mogelijk schadelijk kunnen zijn (Tabel 1). De twee schadelijkste componenten zijn H<sub>2</sub>S en waterdamp. H<sub>2</sub>S moet gereduceerd worden als het gas in een warmtekrachtkoppeling wordt gebruikt of aangesloten wordt op het aardgasnet, omwille van de zeer corrosieve eigenschap. Waterdamp heeft ook een corrosieve eigenschap en is daarnaast zeer schadelijk bij vriestemperaturen. [5]

Afhankelijk van de samenstelling kan biogas op 3 verschillende manieren toegepast worden:

- 1 warmte opwekken door directe verbranding,
- 2 warmtekrachtkoppeling,
- 3 injectie in aardgasnet.

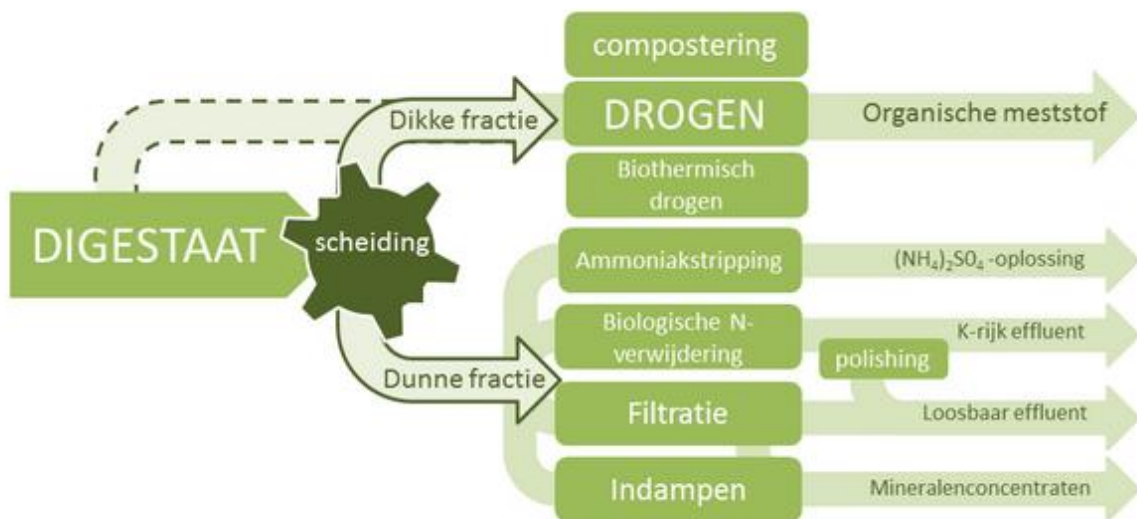
Tabel 1: Samenstelling biogas [5]

Component	Hoeveelheid [Vol%]	Effect(en)
CH <sub>4</sub>	45 - 85	Energiedragende molecule
CO <sub>2</sub>	25 - 50	Verlaagd de calorische waarde Verhoogd het methaangehalte Bij nat gas kan er waterstofcarbonaat ontstaan dat corrosie veroorzaakt.
H <sub>2</sub> S	0 - 2	Veroorzaakt corrosie Beschadigd de motor intern
SO <sub>2</sub>	< 0,1	Verontreinigende emissie
N <sub>2</sub> O	0 - 5	Verlaagt de klopvastheid
Waterdamp	0 - 5	Veroorzaakt corrosie Gevaarlijk bij vriesweer
O <sub>2</sub>	0 - 2	Explosief
N <sub>2</sub>	0 - 2	Inert
Siloxanen	0 - 50 [mg/m <sup>3</sup> ]	Abrasief, afzetting van SiO <sub>2</sub>
Stofdeeltjes		Veroorzaakt verstopping

## 2.1.4 Digestaat

Naast biogas is digestaat het tweede product dat gevormd wordt door de vergisting, het is het overgrote deel dat overblijft na het vergistingsproces. Het digestaat heeft een verlaagd koolstofgehalte in vergelijking met de toegevoegde biomassa. Dat komt doordat een groot deel van het organische materiaal is afgebroken en omgezet naar biogas, dat hoofdzakelijk bestaat uit CH<sub>4</sub> en CO<sub>2</sub>. Doordat de nutriënten, zoals Fosfor, Calcium, Kalium, Magnesium,.., niet zullen verdwijnen in het vergistingsproces zal het digestaat zeer geschikt zijn als meststof. [3, 5]

Omdat het grootste deel van de biomassa zal omgevormd worden tot digestaat is het belangrijk dat dit bruikbaar blijft. Er zijn verschillende technieken mogelijk om het digestaat te verwerken zoals in Figuur 3 is weergegeven. Het belangrijkste is dat er meestal 2 fracties herkenbaar zijn met name de dunne en de dikke fractie. De dikke fractie zal meestal gedroogd worden en als vaste meststof worden gebruikt. Terwijl de dunne fractie eerder gezuiverd zal worden of als vloeibare meststof wordt verdeeld over de velden. Tenslotte zullen de nutriënten zich verdelen over deze fracties waardoor er hoofdzakelijk Fosfaten aanwezig zijn in de dikke fractie en Stikstof en Kalium in de dunne fractie. [5]



Figuur 3: Nabewerking digestaat [5]

## 2.2 Factoren die de anaerobe vergisting beïnvloeden

### 2.2.1 Samenstelling

De invloed van de samenstelling van biomassa bij anaerobe vergisting kan op verschillende manieren bekeken worden. Zo is het vochtgehalte een belangrijke parameter van de biomassa, want het hoofdbestanddeel van biomassa is water. Het zal niet rechtstreeks invloed hebben op de gasproductie van de vergisting, maar het zorgt voor een betere warmteverdeling en transport van de biomassa doorheen de installatie. Om een idee te krijgen van de hoeveelheid water in de biomassa wordt het drogestofgehalte gebruikt, het is de verhouding van de massa van de drogestof op de massa biomassa. Afhankelijk van het vergistingsproces zijn er verschillende optimale drogestofgehalten. Er kan echter wel een bovengrens gesteld worden van 40 % drogestof. Meestal wordt er van twee soorten biomassa's gesproken namelijk natte biomassa met een drogestofgehalte van 5 % tot 15 % en droge biomassa met een drogestofgehalte van 15 % tot 40 %. In praktijk wordt meestal gekozen voor een natte biomassa omdat deze eenvoudiger te verwerken is. [6]

Daarnaast zijn er verschillende stoffen die een belangrijke invloed hebben op het proces. Afhankelijk van de concentratie van de aanwezige stof zal het een andere invloed hebben op de vergisting. De twee meest voorkomende stoffen zijn Ammoniak en Stikstof. Beide stoffen zullen in de meeste gevallen aanwezig zijn maar geen invloed hebben op het proces. Door slechte voeding of grote variaties in de samenstelling kunnen deze concentraties hoog oplopen wat een remmend effect heeft op het vergistingsproces en de biogasproductie. Er zijn ook nog verschillende andere stoffen die een invloed hebben op het proces, deze zijn weergegeven in Tabel 2. [7, 8]

Tabel 2: Invloed van een stof op vergisting bij een bepaalde concentraties [8]

	Invloed van de concentratie [mg/L]		
	Stimulerend	Matig remmend	Sterk remmend
Natrium	100-200	3500-5500	> 8000
Kalium	200-400	2500-4500	> 12000
Calcium	100-200	2500-4500	> 8000
Magnesium	75-150	1000-1500	> 3000
Ammoniak	50-1000	1500	> 8000
Sulfide	0,1-10	100	> 200
Cobalt	20	onbekend	onbekend
Stikstof	onbekend	onbekend	onbekend

Tenslotte moet er ook rekening gehouden worden met verontreinigingen in vaste vorm. Zo is het mogelijk dat er stenen, zand, metaal, plastic of andere niet vergistbare stoffen terechtkomen in het vergistingsvat. De meeste van deze vaste stoffen zullen bezinken waardoor er potentieel vergistingsvolume wordt ingenomen. Hierdoor zal het rendement van de installatie op lange termijn afnemen. [7]

## 2.2.2 Temperatuur

De temperatuur van het vergistingsproces is zeer belangrijk en zal in grote maten bepalend zijn voor de opbrengst. Het proces kan in 3 temperatuurdomeinen werken die elk een verschillende invloed hebben op de reactiesnelheid, samenstelling, stabiliteit, energietoevoer en opbrengst. Deze 3 soorten vergistingen zijn met oplopende temperatuur: de psychrofiële, de mesofiële en de thermofiële vergisting. [1, 4]

De *psychrofiële vergisting* zal optreden bij een temperatuur van 0 °C tot 20 °C. Er zal dus zeer weinig tot geen energie moeten worden toegevoerd. Het nadeel is echter dat het proces hierdoor zeer traag opgang zal komen en dus veel tijd in beslag neemt. De vergisting is wel stabiel maar met een lage opbrengst. [1, 4]

De *mesofiële vergisting* zal meestal worden gebruikt omdat hiermee in de meeste gevallen het hoogste rendement wordt behaald. Het zal plaatsvinden tussen 20 °C en 45 °C waardoor de energie toevoer beperkt is. Het proces zal daarnaast ook zeer stabiel zijn en de hoeveelheid Methaan in het biogas is zeer goed. De reactiesnelheid zal zoals verwacht liggen tussen deze van de psychrofiële en thermofiële vergisting. [1, 4]

De laatste en tevens snelste is de *thermofiële vergisting*, deze zal plaatsvinden tussen 45 °C en 70 °C. Door de hoge temperatuur zal de reactiesnelheid zeer hoog liggen waardoor de grootste hoeveelheid biogas wordt gewonnen. Het nadeel is echter dat de concentratie Methaan lager zal zijn dan bij het mesofiële proces en bij een zeer kleine temperatuurschommeling kan het proces verstoord raken. Tenslotte zal de omgevingstemperatuur in de meeste situaties een stuk lager zijn waardoor er een grote energietoevoer nodig is. [1, 4]

## 2.2.3 pH

De pH waarde van de biomassa zal afhankelijk zijn van de verschillende fasen die tijdens het vergistingsproces doorlopen worden. Elke fase zal zijn eigen optimale pH range hebben, zo zorgen de hydrolyse bacteriën voor een zure omgeving van 4.5 - 6.3 pH. De fermentatie bacteriën zijn eerder stabiel en hebben hierdoor een grote optimale range van 4 - 8.5 pH. Tenslotte hebben de methaanbacteriën een zeer neutrale en beperkte range van 6.5 - 7.5 pH. Doordat de methaanproductie geoptimaliseerd wordt, zal de pH range van deze stap gebruikt worden voor het hele proces. [1, 4]

## 2.2.4 Types van voeding/gasproductie

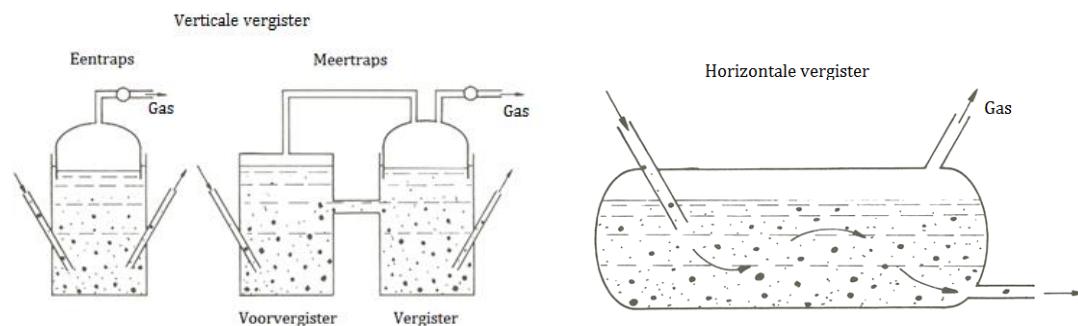
Er zijn twee verschillende manieren van voeden van een biogasinstallatie, discontinu en continu voeden. Bij een discontinu proces zal de vergister bestaan uit een afgesloten vat waar enkel het gas naar buiten komt. De vergister zal eerst gevuld en afgesloten worden, hierdoor zal de anaerobe vergisting tot stand komen. Wanneer de biogasproductie daalt, zal het vat terug geopend worden en de volledige inhoud van de vergister vernieuwd worden. [1, 5]

Bij de continue vergister zal dit niet het geval zijn, er zal op continue of op regelmatige basis biomassa worden ingebracht en digestaat verwijderd worden. Hierdoor zal er ook een continue gasproductie zijn wat niet het geval is bij het discontinue proces. In het ontwerp is er een extra aanvoer en afvoer aanwezig voor respectievelijk de biomassa en het digestaat. [1, 5]

## 2.2.5 Vorm vergister

Op de markt zijn verschillende soorten van biogasinstallaties te verkrijgen, waarbij de vorm meestal kan onderverdeeld worden in 2 types: de verticale en de horizontale vergister. In het eerste geval zal de meestal cilindrische vergister rechtop staan. In het tweede geval zal deze horizontaal gelegen zijn, het voordeel hiervan is dat de 4 fasen van het vergistingsproces achtereenvolgens doorlopen worden. [1, 5, 9]

Omdat de 4 te doorlopen fasen niet dezelfde ideale temperatuur en pH hebben zal bij sommige grote installaties een extra voorvergistingsvat geplaatst worden. In de eerste tank zal dan de hydrolyse plaatsvinden en in het tweede vat de methanogenese om de methaanopbrengst te verhogen. [1, 5, 9]



**Figuur 4: Verticale vergister (eentraps en tweetraps), horizontale vergister [9]**

In ons klimaat komen beide vormen voor bij grote installaties. De verticale installaties bevinden zich meestal boven de grond en bestaan uit een cilindrische ruimte waarin eventueel een zak, een rubberen ballon, is aangebracht. Deze zak heeft als doel de volumeverandering op te vangen bij de productie van het biogas waardoor een constante druk wordt bekomen. De meeste horizontale installaties bestaan enkel uit een zak die deels ingegraven zijn in de grond. Vaak zal het deel boven de grond afgeschermd worden door een laag aarde als bescherming en isolatie. [1, 10]

## 2.2.6 Verblijftijd

De verblijftijd is de gemiddelde tijd dat de biomassa in het vergistingsvat aanwezig is. Deze wordt berekend door het volume van de vergister te delen door het volume toegevoegde biomassa per dag. De verblijftijd van de biomassa is afhankelijk van verschillende factoren waardoor de range meestal zeer groot genomen wordt. Het is belangrijk dat de verblijftijd niet te kort wordt gekozen waardoor potentiële gasopbrengst verloren gaat. Daarnaast mag de verblijftijd niet langer gekozen worden als de tijd dat de biomassa gas oplevert. Daarom zal in geval van mesofiele vergisting en thermofiele vergisting respectievelijk een verblijftijd gekozen worden van 25-40 en 15-25 dagen. [7]

## 2.3 Voorbehandeling

Een deel van het onderzoek bestaat erin om efficiënte voorbehandelingstechnieken toe te passen op de biomassa. Er bestaat een grote diversiteit aan voorbehandelingstechnieken die opgedeeld worden in: mechanische, thermische, chemische, ultrasone en biologische technieken. Voorbehandelingen hebben als doel een hogere en snellere biogasopbrengst per m<sup>3</sup> biomassa te bekomen.

### 2.3.1 Mechanisch

De mechanische voorbehandeling heeft als doel de procestijd te verkorten, de verwerkbaarheid te verbeteren en het ontdoen van de verontreinigingen. De mechanische technieken die hiervoor gebruikt worden, zijn op te splitsen in de volgende categorieën.

#### *Verkleinen:*

De biomassa kan uit grote bestanddelen bestaan waardoor het nuttig is om deze eerst te verkleinen. Door de biomassa te verkleinen zal de hydrolyse stap versneld worden, omdat de massa makkelijker afbreekbaar is. Het verkleinen kan door vermalen, versnijden, hakselen, een colloïdmolen of homogeniseren bij hoge druk. Welke toepassing gebruikt wordt hangt af van de samenstelling en de structuur van de biomassa. [6]

#### *Concentreren:*

Biomassa heeft diverse bronnen, zo kunnen afvalwaters en slib uit zuiveringsinstallatie aangewend worden als biomassa. Het is mogelijk dat er eerst een reeks voorbehandelingen moeten plaatsvinden voordat deze afvalstromen als nuttige biomassa gebruikt kunnen worden. Zo kan het nodig zijn dat het afvalwater of slib eerst moet worden geconcentreerd. Er bestaan verschillende technieken voor het concentreren van deze potentiële biomassa of in andere worden het scheiden van de bruikbare en de onbruikbare fractie zoals: centrifugeren, een zeefbandpers, ultrafiltratie, omgekeerde osmose, bezinken,... [6, 11]

#### *Ontdoen van verontreinigingen:*

Wanneer er afval ingezameld wordt om een biogasinstallatie te voeden kunnen er inerte en ongewenste bestanddelen aanwezig zijn. Deze bestanddelen zoals plastic, metalen, papier,... moeten eerst uit de biomassa verwijderd worden omdat ze een negatieve werking hebben op het vergistingsproces. Afhankelijk van wat er verwijderd moet worden kan dit op verschillende manieren gebeuren. Bijvoorbeeld voor metaal kan er gebruik gemaakt worden van magneten om zo de deeltjes uit de biomassa te trekken, voor de andere bestanddelen kan gebruik gemaakt worden van zeven, uitwassen of scheiden op dichtheid van het materiaal. De verwijderde fracties kunnen dan op de correcte manier afgevoerd en verwerkt worden. [6]

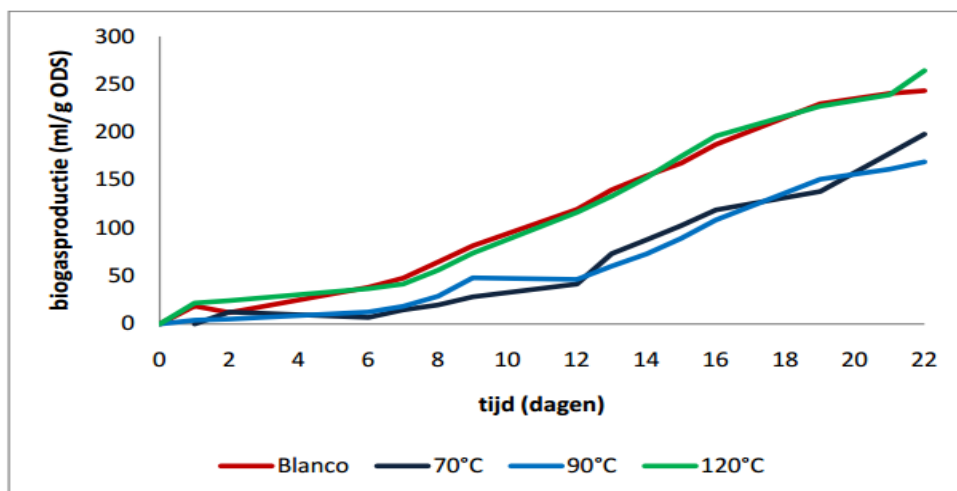


### 2.3.2 Thermisch

Het vergistingsproces bestaat uit 4 stappen die voorheen besproken zijn. De eerste van deze 4 stappen namelijk de hydrolyse is meestal de tijdsbepalende stap. Om dit proces te versnellen worden thermische voorbehandelingen gebruikt, om zo de celwanden en cellen sneller af te breken. Opwarming van de biomassa zorgt ervoor dat de chemische bindingen van de celwanden ontbinden. Hierdoor komt er celmateriaal vrij dat makkelijker vergistbaar is in het verdere proces.

Thermische voorbehandelingen bestaan uit het verwarmen van de biomassa voor een welbepaalde tijdsduur. Zowel de temperatuur als de tijdsduur kan variëren, er bestaat hiervoor geen ideale temperatuur of tijd. Wel kan besloten worden dat er hogere temperaturen en langere tijden nodig zijn voor moeilijk afbreekbare stoffen. Deze voorbehandeling vindt meestal plaats in een extra vergister, de voorvergister. [4]

Er reeds een onderzoek gevoerd naar de invloed van thermische voorbehandelingen bij 70 °C, 90 °C en 120 °C. Er werden 3 stalen vergist op de genoemde temperaturen en vergeleken met een blanco staal. De stalen werden gedurende 30 minuten op temperatuur gehouden en geroerd ter homogenisering. Elk van deze voorbehandelingen vond plaats op atmosferedruk met uitzondering van de voorbehandeling op 120 °C, deze vond plaats onder verhoogde druk omdat er anders geen temperatuur boven de 100 °C bereikt kan worden. Uit Figuur 5 kan afgeleid worden dat de thermische voorbehandelingen op 70 °C en 90 °C een negatieve invloed hebben op de biogasopbrengst. Het staal dat voorbehandeld is op 120 °C behaalt dezelfde biogasopbrengst als het blanco staal. Als enkel deze resultaten bekeken worden, kan er besloten worden dat thermische voorbehandelingen een algemeen negatieve invloed hebben. Er moet wel bij vermeld worden dat deze stalen voor slechts 3 weken geanalyseerd zijn terwijl er na deze periode ook nog biogas gevormd werd. De stalen die van een voorbehandeling genoten zitten nog in een stijgende trend terwijl het blanco staal aan het afvlakken is. Om een sluitende conclusie te trekken moet men langer dan deze 3 weken de stalen analyseren. [4]



Figuur 5: Cumulatieve biogasproductie per dag [4]

### 2.3.3 Chemisch

Chemische voorbehandelingen bestaan uit het toevoegen van chemicaliën aan de biomassa alvorens deze vergist wordt. Zoals bij thermische voorbehandeling hebben deze chemicaliën als doel het vergistingsproces sneller en efficiënter te laten verlopen. De celwand wordt zodanig aangetast dat het organische materiaal beter oplosbaar en dus vergistbaar is. Ook kan het enkele negatieve bijwerkingen van andere voorbehandelingen teniet doen, zo kan het bijvoorbeeld de pH neutraliseren die mogelijk door een voorbehandeling zeer hoog of zeer laag geworden is. Het neutraliseren kan nog steeds nodig zijn ook al is er geen voorbehandeling aan te pas gekomen. Sommige biomassa's zijn op zichzelf al te zuur of te base waardoor chemicaliën nodig zijn om een goed vergistingsproces te kunnen garanderen. [4, 6]

Chemische voorbehandelingen kunnen ook nadelen met zich mee brengen. Zo bestaat de kans op schuimvorming in de vergister die verstoppingen of andere negatieve effecten kan veroorzaken. De chemicaliën die worden toegevoegd aan de biomassa moeten achteraf ook weer uit het digestaat verwijderd worden. Als de chemicaliën in het digestaat zouden blijven komen deze terecht in het milieu en wat schade kan veroorzaken voor mens, dier en plant. Sommige chemische voorbehandelingen drijven het energieverbruik omhoog. Zo moeten er stoffen opgewarmd worden tot boven de 250 °C en drukken gerealiseerd worden van meer dan 10 MPa om deze vervolgens door de biomassa te blazen. [4]

### 2.3.4 Ultrasoon

Een ultrasone voorbehandeling is een speciale techniek die kan toegepast worden om de cellen van de biomassa makkelijker te doen afbreken. Met deze techniek is het mogelijk om een cel afbraak van 100 % te bekomen, hoewel de benodigde energie dan zeer hoog ligt. [4]

Het principe van de ultrasone voorbehandeling rust op het introduceren van cavitatie in de biomassa. Door akoestische golven wordt de biomassa herhaaldelijk samengedrukt en vervolgens geëxpandeerd. Hierdoor worden er gasbellen gecreëerd die eventueel nog verder kunnen aangroeien door de aanwezige gassen en dampen in de biomassa. De ontwikkelde gasbellen kunnen imploderen in de biomassa waardoor er extreme toestanden van druk en temperatuur gecreëerd worden. Deze extreme omstandigheden bevorderen de chemische reacties in het vergistingsproces waardoor dit sneller en efficiënter kan verlopen. Door de implosies van de gasbellen ontstaan er ook mechanische schuifspanningen in de biomassa die er voor zorgen dat de afbraak van de cellen en celwanden bevorderd worden. [4]

Belangrijk bij deze voorbehandeling is dat de frequentie van de ultrasone golven onder de 1 MHz blijft. Indien we boven deze frequentie gaan is het praktisch onmogelijk om gasbellen te creëren zodat de opzet van de voorbehandeling teniet wordt gedaan. Hoe groter de ontstane gasbellen hoe beter de afbraak van de cellen, dit is te verklaren omdat bij grotere gasbellen sterkere implosies ontstaan en dus ook extremere omstandigheden en schuifspanningen. De grote van de gasbellen hangt af van de frequentie van de ultrasone golven. Hoe lager de frequentie hoe groter de gasbellen die ontstaan in de biomassa. Uit onderzoek blijkt dat deze voorbehandeling de biogasopbrengst bevordert, de opbrengst kan wel tot 50 % toenemen. [4]

### 2.3.5 Biologisch

Biologische voorbehandelingen werken in op de afbraak van de celwanden zodat het aanwezige koolstof makkelijker beschikbaar is voor de methaanbacteriën tijdens het vergistingsproces. Bij biologische voorbehandelingen gebeurt dit hoofdzakelijk door het toevoegen van additieven zoals enzymen. [6]

Maïs is in grote installaties een welbekende biomassa. Wanneer maïs ingekuild wordt zullen er soms additieven toegevoegd worden om een snellere inwerking te hebben zodat de maïs beter bewaard blijft in de kuil. Deze additieven kunnen ook een inwerking hebben op de broei-effecten die tijdens het gebruik van de maïs voorkomen. Nu blijkt uit onderzoek dat deze inkuiladditieven een invloed hebben op de gasopbrengst tijdens het vergisten van deze energiemais. Niet elk soort additief heeft in dezelfde mate effect of zelfs geen effect op de biogasopbrengst. Enkel de meer complexe additieven hebben een invloed, deze kunnen zorgen voor een opbrengstverhoging van 30%. [12]

Wanneer slib uit waterzuiveringsinstallaties wordt gebruikt als biomassa bevat deze meestal nog zeer veel water. Waardoor er vaak een ontwateringproces nodig is, wat energie vraagt. Met biologisch drogen ligt dit helemaal anders, er komt tijdens dit proces namelijk energie vrij zodat er geen extra energie nodig is om het slib te drogen. Het slib wordt in lange gesloten tunnels gebracht waarin het gemengd wordt met gecomposteerd materiaal en houtsnippers. Aan dit mengsel wordt vervolgens lucht toegevoegd. Het vochtgehalte kan met deze methode dalen van 75 % naar 30 %. [6, 11]

## 2.4 Marktonderzoek

De term biogas is algemeen gekend, maar dan hoofdzakelijk van installaties op industriële schaal. Wanneer er gesproken wordt over installaties op particuliere schaal zijn deze praktisch onbekend. Dat is niet onbegrijpelijk aangezien de kleine installaties ook nagenoeg niet voorkomen. Er wordt veel onderzoek gevoerd naar biogas maar dit omvat enkel grote installaties. Particuliere installaties zijn vrijwel volledig onbekend terrein, ook op het gebied van onderzoek.

In dit marktonderzoek is er op zoek gegaan naar de bestaande technieken van particuliere biogasinstallaties. Hierbij duiken enkele hobbyisten op die zelf een biogas installatie gemaakt hebben om deze voor eigen voorzieningen te gebruiken. Er wordt daarbij gebruik gemaakt van materialen die initieel voor andere doeleinden bestemd zijn. Al deze installaties opereren zonder enige vorm van elektronica of automatiseringen aan boord. Metingen worden niet uitgevoerd, enkel wordt er in de meeste gevallen een goede afschatting gemaakt van de hoeveelheid biomassa die er dagelijks aan de installatie wordt toegevoegd en hoeveel biogas er door de installatie opgewekt wordt.

Er zijn slechts enkele commerciële installaties op de markt beschikbaar. Hierbij valt op dat deze installaties enkel verkocht en gebruikt worden in regio's met een warm klimaat, zoals bijvoorbeeld India en China. Deze installaties kunnen in het koudere klimaten niet in werking gesteld worden zonder de nodige veranderingen door te voeren. De commerciële installaties zijn opmerkelijk genoeg ook zonder enige elektronica of automatische sturing, de bediening gebeurt volledig manueel. Twee van deze commerciële installaties zullen hier verder in detail besproken worden.

### 2.4.1 VIVAM (India)

Het bedrijf Vivam Solid Waste Management is actief in India op gebied van afvalverwerking. De product lijn gaat van mechanische composteermachines tot biogasinstallaties. Op gebied van biogasinstallaties worden er vergisters aangeboden die een biomassa van 10 kg t.e.m. 10 ton per dag kunnen verwerken. De aandacht gaat hier uit naar de kleine installaties zoals Figuur 6 die bedoeld zijn voor particulier gebruik. [13]



**Figuur 6: VIVAM biogasinstallatie [13]**

Er zijn een aantal modellen beschikbaar afhankelijk van de hoeveelheid biomassa die per dag verwerkt moet worden. Een aantal modellen zijn terug te vinden in Tabel 3. [13]

**Tabel 3: Beschikbare modellen Vivam [13]**

Model	Massa toevoer /dag [kg/dag]	Grootte gasreservoir [m <sup>3</sup> ]
1	10	0.5
2	20	1
3	30	1.5
4	40	2

De biogasinstallaties beschikken volgens de fabrikant over een aantal interessante eigenschappen. Zo is de installatie vervaardigd uit slechts één deel waardoor het lekdicht is. Doordat er gekozen is voor lichtgewicht materialen is de installatie gemakkelijk verplaatsbaar. Het gekozen materiaal is bestand tegen chemische stoffen, corrosie en UV licht. [13]

### 2.4.2 Biotech (India)

Het bedrijf Biotech is actief in India op gebied van groene energie, en meer bepaald bio-energie. Bij Biotech wordt er projectmatig gewerkt aan bio-installaties gaande van afvalwaterverwerking tot biogasinstallaties waarbij biogas wordt geproduceerd om mee te koken. Het aanbod bestrijkt biogasinstallaties van 2 tot 20 kg biomassa per dag, een voorbeeld is weergegeven Figuur 7 (Bijlage A). [14]



**Figuur 7: Biogasinstallatie Biotech [14]**

Er zijn een aantal modellen beschikbaar afhankelijk van de hoeveelheid biomassa die per dag verwerkt moet worden. De verschillende modellen zijn terug te vinden in Tabel 4.

**Tabel 4: Beschikbare modellen Biotech [14]**

Model	Massa toevoer [kg/dag]	Afvalwater verbruik [l/dag]	Grootte gasreservoir [m <sup>3</sup> ]	Geschikt voor gezin van [# personen]	Gasproductie per dag [m <sup>3</sup> /dag]
1	2	20-25	1	1-5	1
2	3-5	25-40	2	5-7	2-3
3	5-8	40-60	3	7-10	3-5
4	8-12	50-60	4	10-15	4-6
5	10-20	60-70	6	15-20	6-10

De biogasinstallaties beschikken volgens de fabrikant over een aantal interessante eigenschappen. Zo wordt het keukenafval vermengd met afvalwater i.p.v. zuiver water. Er is een energiebesparing tot 50 % mogelijk en de installatie zou op 2 jaar terugverdiend kunnen zijn. Het gas dat met het afval van 5 personen per dag opgewekt kan worden is voldoende om een gaspitje 2 uur op te laten branden. De installatie is daarnaast makkelijk verplaatsbaar. [14]



# 3 Materiaal en Methoden

## 3.1 Opstelling

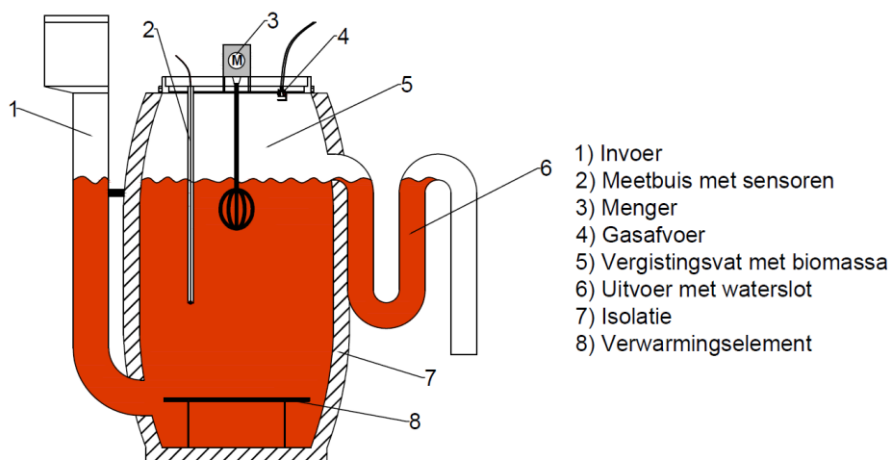
### 3.1.1 Ontwerp

Eén van de realisaties van de masterproef is het bouwen van een testopstelling. Met behulp van deze testopstelling kunnen er relaties gezocht worden tussen de verschillende procesparameters. De voorafgaande thesis van Inge Verboven [1] geeft een globale kijk op het verband tussen de temperatuur, de druk, de pH en de opbrengst. Ons onderzoek gaat echter specifiek kijken naar de temperatuur, de druk, de opbrengst en de samenstelling van de biomassa en het biogas, omdat deze parameters ook hoofdzakelijk gebruikt worden in grotere installaties. De pH zal bij een goede regeling en constante voeding gelijk blijven waardoor het in vele gevallen niet gebruikt wordt.

Het is dus belangrijk dat de opstelling het mogelijk maakt om de verschillende parameters te meten en te regelen. De temperatuur en druk zullen gemeten worden met behulp van sensoren. De opbrengst zal bepaald worden door gaszakken die gevuld worden en de samenstelling van het biogas zal extern bepaald worden met behulp van gaschromatografie en massaspectroscopie. Voor het verwarmen van de biogasininstallatie zal gebruik gemaakt worden van een elektrisch verwarmingslint. Daarnaast zal in dit onderzoek de samenstelling van de biomassa veranderen doordat er overgestapt wordt van mest naar huis- en tuinafval.

Verder zijn er nog enkele bijkomende moeilijkheden geconstateerd. Zo is er slechts een beperkt budget beschikbaar waardoor er gezocht moet worden naar goedkope en creatieve oplossingen. De doorlooptijd van het onderzoek is beperkt, hierdoor moet de opstelling in zeer korte tijd vervaardigd worden en moeten de metingen zeer doelgericht zijn.

Het uiteindelijk resultaat van de opstelling is in Figuur 8 weergegeven. Hoe de opstelling bekomen is wordt uitgelegd in het vervolg van dit hoofdstuk.



Figuur 8: Doorsnede vergistingsvat met nummering

### 3.1.2 Vormgeving

In deze paragraaf wordt er gekeken naar de vorm, het volume en het model van het vergistingsvat. Ten eerste zijn er verschillende vormen mogelijk met elk hun voordelen zoals reeds besproken is in het deel "Factoren die de anaerobe vergisting beïnvloeden". Er is hier geopteerd voor een verticale vergister (Figuur 9). Het voordeel hiervan is dat er bovenaan het vat een deksel kan worden voorzien. Hierdoor is het mogelijk om het vergistingsvat eenvoudig te openen zonder dat de biomassa moet worden verwijderd. Daarnaast kunnen de sensoren in het deksel worden geplaatst wat veel technische moeilijkheden voorkomt. Het nadeel van deze vorm is dat de biomassa meer gemengd zal worden, hierdoor zal de nog niet vergiste biomassa sneller afgevoerd worden.

Ten tweede is het volume van het vergistingsvat belangrijk. Het volume bepaalt namelijk de verblijftijd van de biomassa in de vergister. Hierbij is gekeken naar het afval dat geproduceerd wordt door een gezin van 4 personen. Om hier een schatting van te krijgen hebben 3 gezinnen hun afval bijgehouden voor enkele dagen. Het resultaat van dit experiment was een bruikbaar volume van 6 dm<sup>3</sup> afval per dag per gezin van 4 personen. Als verblijftijd is gekozen voor 30 dagen, waardoor een volume van 180 dm<sup>3</sup> bekomen wordt. Omdat er rekening moet gehouden worden met de gasproductie, schuimvorming en de beschikbare maten is er gekozen voor een vergistingsvat van 220 dm<sup>3</sup>.



Figuur 9 :Vergistingsvat

Ten derde is er gekeken naar het model van het vat. Doordat de vorm en het volume van het vat reeds bepaald zijn kan er nu gekeken worden naar welke modellen beschikbaar zijn. Zo bestaan bijvoorbeeld vaten uit roestvrij staal, kunststof en vezels. Er is gekozen voor kunststof vat met deksel dat gesloten kan worden met behulp van een spanring. Deze keuze is gemaakt op basis van de luchtdichte afsluiting die bekomen kan worden met de spanring en het eenvoudig verwijderen van het deksel. Het nadeel in vergelijking met een roestvrij stalen vat is dat de in- en uitvoer niet gelast kunnen worden, wat zorgt voor een moeilijkere afdichting.

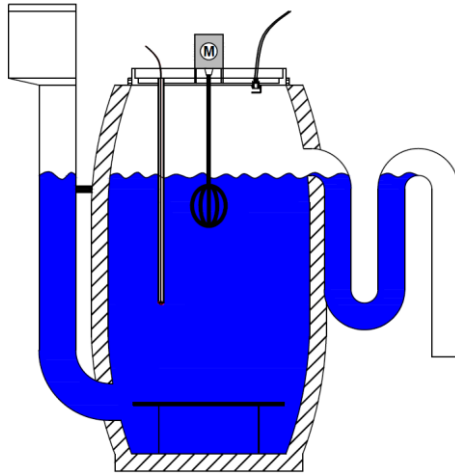
### 3.1.3 In- en uitvoer

De in- en uitvoer van de biogasinstallatie zijn vervaardigd uit pvc buizen. Dat komt doordat er een ruim assortiment van buizen en verbindingstukken beschikbaar is. De bevestiging van deze componenten kan doormiddel van schuif of lijmverbindingen.

De invoer is vervaardigd uit een toezichtput met schroefdeksel die door middel van een pvc buis en 90° bocht met diameter 110 mm bevestigd is aan de onderkant van vergistingsvat (Figuur 10). Op deze manier zal de biomassa op een hoogte van ongeveer 10 cm van de bodem van het vergistingsvat binnenkomen. Dat heeft als voordeel dat er minder kans is op verstopping. Doordat grotere niet afbreekbare delen kunnen bezinken naar de bodem in plaats van op te hopen achter de invoer. De bevestiging aan de vergister gebeurt doormiddel van een "krimpverbinding", door het omringende materiaal van de opening van de invoer op te warmen en te laten krimpen over de bocht. Daarna is de opening volledig afgekit om eventuele lekken te voorkomen. De toezichtput zal dienen als invoertrechter en de deksel zal de reukhinder en de opname van zuurstof beperken.



De uitvoer van de installatie bestaat uit een waterslot dat vervaardigd is uit pvc buizen en bochten met een diameter van 80 mm. Het waterslot is zodanig gedimensioneerd dat het waterslot pas verbroken zal worden bij een overdruk van 35 mbar. De uitvoer is ongeveer 15 cm van de bovenkant van het vat bevestigd zodat er geen rechtstreekse doorstroom kan zijn vanuit de invoer. Daarnaast is er ook nog vrije ruimte voor eventuele schuimvorming en gasafvoer. De bevestiging aan het vergistingsvat gebeurde op dezelfde manier als bij de invoer.



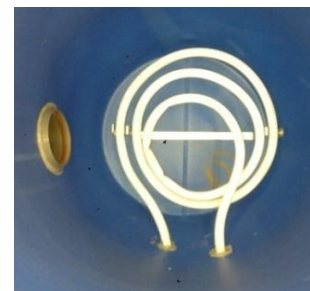
**Figuur 10: Schematische voorstelling van dichtheidstest**

Tenslotte is er een dichtheidstest uitgevoerd, om zo na te gaan of de aansluitingen waterdicht zijn. In deze test werd de installatie volledig gevuld met water. Hierdoor werden er twee lekkages gevonden bij de aansluitingen. Na het dichtmaken van deze lekkages en een nieuwe dichtheidstest kon er besloten worden dat de biogasinstallatie waterdicht was.

### 3.1.4 Verwarming

In de testopstelling zal er mesofiele vergisting worden toegepast, omdat dit een stabiel proces is met goede Methaan opbrengst. Doordat dit proces plaatsvindt tussen 20°C en 45°C zal het vergistingsvat verwarmd moeten worden.

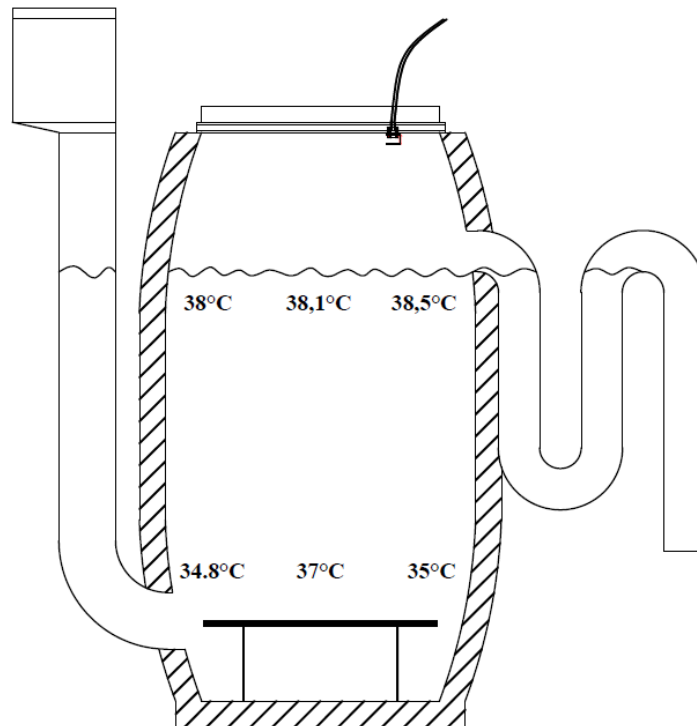
De manier van de verwarming is cruciaal voor het proces, omdat er een zo homogeen mogelijke temperatuur moet bekomen worden. Er is gekozen om gebruik te maken van een platte spiraal die onderaan in het vat geplaatst wordt (zie Figuur 11). Hierdoor is een groot warmtevlak gecreëerd. De verwarmde biomassa zal stijgen waardoor een natuurlijke stroming gevormd wordt die het volledige vat verwarmd.



**Figuur 11: Verwarmingselement**

Er is gekozen om het warmtelint aan te brengen in een alpex buis. Dat is ten eerste gedaan om het lint te beschermen tegen de biomassa, zodat de slijtage beperkt wordt. Ten tweede is dit gedaan om het in de toekomst mogelijk te maken om een waterleiding aan te sluiten. Zodat de biogasinstallatie zou kunnen worden verwarmd met warm water. De aan- en afschakeling van het warmtelint wordt automatisch geregeld doormiddel van de aansturing op basis van de gemeten temperatuur.

Nadat de analyses afgerond waren is de temperatuur op verschillende plaatsen in het vergistingsvat gemeten. Dat is gedaan om een idee te krijgen van de temperatuurverschillen binnen het vat. Zoals te zien is in Figuur 12 varieert de temperatuur van 34,8 °C tot 38,5 °C. Het verschil bedraagt 3,7 °C wat vrij beperkt is. Dit is te verklaren doordat de biomassa zeer vloeibaar was waardoor de warmte gemakkelijk werd doorgegeven. De laagste temperatuur van 34,8 °C is gemeten bij de invoer van het vergistingsvat. Dat is logisch omdat de koude, verse biomassa langs hier naar binnen kwam. Daarnaast was er een ophoping van vaste stof waardoor de warmte moeilijk doorgegeven werd. De hoogste temperaturen worden boven aan het vat gemeten doordat de warme biomassa stijgt.



Figuur 12: Overzicht temperatuur

### 3.1.5 Isolatie

De warmtebron zal ervoor zorgen dat het proces op de juiste temperatuur wordt gehouden. Om de nodige energie te beperken zal de installatie geïsoleerd worden. In het ideale geval zou het vat volledige geïsoleerd worden met een kwalitatieve isolatie. Maar wegens budgettaire redenen is er gebruik gemaakt van verschillende soorten isolaties, die beschikbaar waren. Om het ideale geval te vergelijken met de werkelijke omstandigheden zal de warmtestroom in beide gevallen berekend worden in Tabel 5. In beide gevallen is gebruik gemaakt van een  $T_{\text{Omgeving}}$  van 23 °C en een  $T_{\text{Proces}}$  van 37 °C.

Uit deze berekeningen blijkt dat er een energieverlies is van 0,17 kWh per dag in het ideale geval en 0,271 kWh per dag in het huidige geval. Hierdoor zal het huidige verbruik 59 % hoger liggen wat te danken is aan de slechte aansluiting van isolatie, onbedekte ruimtes en de mindere kwaliteit van de isolatie.

Tabel 5: Berekening energieverlies in het ideale en werkelijke geval

Ideaal

	Thermische geleidbaarheid $\lambda$ [W/(m.K)]	Dikte d [m]	Oppervlakte A [m <sup>2</sup> ]
Isolatie	0,025	0,1	2,130
Polyetheen (Wand)	20	0,01	

	Warmteweerstand R [m <sup>2</sup> K/W]	Warmteverlies Q [J]
Isolatie + Polyetheen	4,203	7,094
Totaal Warmteverlies Q <sub>T</sub> [kWh]		0,170

Huidig

	Thermische geleidbaarheid $\lambda$ [W/(m.K)]	Dikte d [m]	Oppervlakte A [m <sup>2</sup> ]
Rotswol	0,040	0,140	0,942
Glaswol	0,040	0,060	0,659
Polyisocyanuraat PIR	0,025	0,080	0,322
Polyetheen (Wand)	0,260	0,005	0,010
Polyetheen (Deksel)	0,260	0,005	0,196
Luchtlaag (Onder deksel)	0,024	0,150	
Totale oppervlakte [m <sup>2</sup> ]			2,130

	Warmteweerstand R [m <sup>2</sup> K/W]	Warmteverlies Q [J]
Polyetheen (Deksel) + luchtlaag	6,471	0,425
Rotswol + Polyetheen (Wand)	3,721	3,544
Glaswol + Polyetheen (Wand)	1,721	5,363
Polyetheen (Wand)	0,221	0,633
Polyisocyanuraat PIR + Polyetheen	3,421	1,317
Totaal Warmteverlies Q <sub>T</sub> [J]		11,282
Totaal Warmteverlies Q <sub>T</sub> [kWh]		0,271

T <sub>vergister</sub> [°C]	37
T <sub>omgeving</sub> [°C]	23
Warmteoverdrachtscoëfficiënt lucht $\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	5
Warmteoverdrachtscoëfficiënt water $\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	500

### 3.1.6 Menging

Bij biogasinstallaties op industriële schaal vindt men altijd een vorm van menging terug. Deze mengers zorgen ervoor dat de biomassa homogeen blijft, dat het continu in beweging is en dat afzetting van de zwaardere fracties beperkt blijft.

In het eerste ontwerp van de biogasinstallatie was er geen menging voorzien. Omdat er vanuit werd gegaan dat er voldoende natuurlijke menging zou plaatsvinden. Door de juiste plaatsing van in- en uitvoer ontstond er telkens een natuurlijke menging wanneer er nieuwe biomassa toegevoegd werd. Aangezien het toevoegen van biomassa dagelijks plaatsvond zou er ook elke dag gemengd worden. Dit werd voldoende geacht om het mengsel homogeen te houden en de afzetting van de dikkere fracties te beperken.

Nadat de installatie enkele dagen in werking was gesteld ontstond er een geheel nieuw probleem. Bovenaan de vergister werd er een dikke schuimlaag gecreëerd (Figuur 13). Deze schuimvorming was het gevolg van de vorming van biogas in de vergister. Doordat er overal in de vergister biogas werd gevormd steeg er gas onder de vorm van kleine belletjes naar de oppervlakte, aan de oppervlakte vormen deze belletjes een laag schuim. Het schuim veroorzaakte een verstopping in de gasafvoer waardoor de er drukopbouw ontstond en het deksel bol kwam te staan (Figuur 14).



Figuur 13: Schuimvorming in vergister



Figuur 14: Vervorming deksel door drukopbouw

Door de problemen met de schuimvorming is er een menger geplaatst. Om de menging te verwezenlijken zijn er verschillende keuzes mogelijk. Ten eerste moet de plaats bepaald worden waar de menger geplaatst kan worden. De beste plaats om de menger te plaatsen is net boven de bodem van het vergistingsvat. Op die manier worden de zwaardere fracties omhooggestuwd zodat er geen afzetting kan plaatsvinden. Door praktische en financiële redenen is er gekozen voor een menging van bovenaf met een korte mixstaaf. Een tweede ontwerpkeuze bestond uit een continue of discontinue menging. Hier werd gekozen voor een discontinue menging met een vastgelegd tijdsinterval. Deze keuze werd gemaakt om het energieverbruik zo beperkt mogelijk te houden.

Tot slot moest de menger zelf nog gekozen worden. Deze menger kan allerlei vormen aannemen zoals bijvoorbeeld schoepen, staven,... . Omdat er nog een mengstaaf (Figuur 15) ter beschikking was, werd deze ingebouwd. Als aandrijving van de menger werd er gekeken naar een traag draaiende motor die bovendien nog energie zuinig zou zijn. Door het beperkte budget moest er een andere oplossing gevonden worden, hierdoor is er gekozen voor een oude boormachine (Figuur 16). Om deze menger aan het vergistingsvat te bevestigen moest er een bevestigingsbeugel ontworpen worden. Het was niet mogelijk om deze volledig vast te maken aan het deksel van de vergister omdat het mogelijk moest zijn om de menger te demonteren. Daarom is er gekozen voor een houder die in de ring van het deksel vastgeklemd kon worden door middel van twee draadstangen voorzien van vleugelmoeren (Figuur 16).



**Figuur 15: Mengstaaf**



**Figuur 16: Boormachine als menger**

Na afloop van de experimenten is de vergister terug leeggemaakt. In Figuur 17 is er te zien dat er weinig afzetting heeft plaatsgevonden. Het gaat hier slechts om enkele centimeters van de dikkere fracties. Deze dikke fracties zijn het gevolg van de vers ingevoerde biomassa. Wanneer deze biomassa vergist, zal deze afbreken tot een waterige vloeistof. Hieruit kan besloten worden dat de toegepaste menger voldoende was, omdat alle biomassa werd omgezet in een waterige oplossing kon deze korte menger toch zorgen voor voldoende mening. Bij het leegmaken is er echter wel opgevallen dat er een ophoping was van vaste stof aan de invoer, zoals weergegeven op Figuur 17. Dat was hoofdzakelijk te danken het keukenafval dat snel bezinkt. Tenslotte is er ook geen grote schuimvorming meer geweest door de menger.



**Figuur 17: Afzetting biomassa**

### 3.1.7 Gasafvoer en opslag

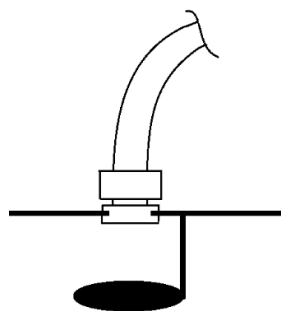
Het gevormde gas in de biogasinstallatie moet afgevoerd en opgeslagen worden. De gasafvoer gebeurt via een slang die verbonden is met de externe opslag. De plaatsing van deze aansluiting vindt logischerwijs bovenaan de vergister plaats. Aangezien het geproduceerde biogas lichter is dan de biomassa zal dit gas zich bovenaan de vergister verzamelen, hier kan het dan via de afvoerslang naar de externe opslag overgebracht worden.

De eerste gasconnectie was een koppelstuk (Figuur 18, links) dat in het deksel van de vergister gelijmd werd. Deze connectie voldeed echter niet aangezien er bij lichte drukopbouw lekken ontstonden. Ook was het zeer moeilijk om deze connectie los te maken en opnieuw terug aan te sluiten. Om dit probleem op te lossen is er gebruik gemaakt van een nieuwe gasconnectie (Figuur 18, rechts), deze connectie bestaat uit een persluchtaansluiting. Het slangetje kan over de connectie geschoven worden, hierna wordt de slang vastgeklemd door een klemmoer die er op gedraaid wordt.



Figuur 18: Oude (links) en nieuwe (rechts) gasconnectie

Schuimontwikkeling in de vergister vormt een probleem voor deze gasaansluiting zoals aangehaald in het vorige deel. Doordat het schuim omhoog wordt gedrukt, komt het in de gasconnectie terecht waardoor deze dichtslibt. Als er geen gas meer afgevoerd wordt ontstaat er een drukopbouw in de vergister, deze druk kan schade aanbrengen aan de gehele installatie. Nadat het probleem van schuimvorming opgelost was kwam er een nieuw probleem aan het licht. Als de menger start zorgt het voor opspattende biomassa waardoor de gasconnectie opnieuw verstopt kan geraken. Om dit probleem te voorkomen is er een afscherming (Figuur 19) voorzien voor de gasconnectie zodat er geen spatten terecht kunnen komen in de connectie.



Figuur 19: Afscherming gasconnectie

Het gas dat via de afvoerslang naar buiten wordt geleid moet worden opgevangen in een externe gasopslag. In de eerste fase konden de aanwezige gaszakjes (Figuur 20) hiervoor worden gebruikt. Deze gaszakjes houden alle verschillende soorten gassen binnen en hebben elk een inhoud van 5 liter, door al deze 10 zakjes met elkaar te verbinden wordt er een volume van 50 liter bekomen. Naargelang het onderzoek vorderde werden er grotere hoeveelheden gas per dag geproduceerd. Aangezien de gasopslag tijdens het weekend niet leeggemaakt kon worden, moest er een grotere opslag voorzien worden. Omdat grotere gaszakken zeer kostelijk zijn, konden deze geen oplossing bieden. Voor een grotere opslag hebben we gebruikgemaakt van grote rubberen binnenbanden (Figuur 21). Zo is er uiteindelijk gebruik gemaakt van 3 gekoppelde banden van 200, 230 en 570 liter zodat er een gezamenlijk volume van 1000 liter bekomen werd.



**Figuur 20: Gaszakje 5 liter**



**Figuur 21: Binnenband 570 liter**

### **3.1.8 Aansturing & metingen**

Om het anaerobe vergistingsproces te analyseren en aan te sturen moeten er verschillende metingen uitgevoerd worden. Deze sturing en metingen zijn ontworpen door een medestudent van master elektronica Sebastiaan Bosmans. Daarom wordt voor een uitgebreide uitleg verwezen naar zijn thesis “Product design en ontwikkeling van een Biogasinstallatie voor thuisgebruik” [15]. De belangrijkste meting is de temperatuurmeting, deze meting wordt via een meetbuis tot midden in de vergister gebracht om zo een representatieve waarde te bekomen. Aan de hand van deze waarde kan de verwarming aan- of uitgeschakeld worden. De gebruikte temperatuursensor was in het begin een analoge sensor van het type PT100 (Bijlage B). Wanneer deze een temperatuur aangeeft beneden de 36 °C wordt de verwarming aangeschakeld, anderzijds zal de verwarming afgeschakeld worden bij een temperatuur boven de 38 °C.

De tweede meting die plaatsvindt bij de biogasinstallatie is een drukmeting. De drukmeting is via de gasafvoerslang aangesloten, aangezien de druk doorheen de installatie gelijk is. Als druksensor is er eerst gebruikgemaakt van de analoge sensor van het type Honeywell 24PCAFA6G (Bijlage B). Aan de hand van de drukwaarden kan er gezien worden of de gasopslag vol zit.

Om de sensoren uit te lezen werd er eerst gebruik gemaakt van een Arduino. De sensoren kunnen niet rechtstreeks gekoppeld worden met de Arduino aangezien de aard en de sterkte van de signalen niet geschikt zijn. De sensoren worden gekoppeld via een versterker en een omzetter die het sensor signaal omzet naar een spanningssignaal, dat geschikt is voor de Arduino. De Arduino wordt verder ook gebruikt voor het aansturen van de verwarming en de menger. De menger wordt via een relais ingeschakeld binnen een bepaald tijdsinterval. Bij het aansturen van de menger treed er een probleem op. Doordat de menger aangeschakeld wordt komt er een spanningsval te staan over de Arduino, hierdoor treed er een fout op waardoor de sturing uitvalt. Doordat het sturingsproces wegvalt zal ook het vergistingsproces stoppen.

Aangezien het probleem met de spanningsval over de Arduino niet volledig verholpen kon worden is er overgeschakeld naar een Raspberry Pi als regelement. Alle sensoren zijn bij deze overgang ook vervangen door digitale sensoren. De nieuwe temperatuursensor is van het type DS18B20 en de nieuwe druksensor Honeywell SSC Series (Bijlage B). Tot slot wordt alle gemeten data in een bestand online weggeschreven zodat deze overal bekeken kan worden. De data bestaat uit: datum, tijd, temperatuur, druk, status van de verwarming en werking van de menger. Wanneer de Raspberry Pi niet over een internet connectie beschikt wordt de data op zijn intern geheugen weggeschreven en achteraf, wanneer er terug een connectie is, online gezet.

### 3.1.9 Kostenanalyse

Bij de kostenanalyse van de biogasinstallatie moet er rekening gehouden met enkele aspecten. Zo zijn verschillende onderdelen gratis ingebracht om de kosten te beperken. Daarnaast waren er nog verschillende componenten aanwezig van de biogasinstallatie van Inge Verboven. Hierdoor wordt de kostenanalyse weergegeven in Tabel 6 bekomen.

Tabel 6: Kostenanalyse opstelling

Omschrijving	Kostprijs [€]
Kunststof vat 220 l	20,00
PVC bocht 80 mm	2,09
PVC verbindingsstuk 80 mm	8,00
PVC buis 110 mm	3,60
PVC buis 80 mm 3 m	8,10
PVC toezichtput	65,00
PVC wartels	7,74
PVC lijm	5,00
Silicone TEC 7	10,65
Isolatie	/
Metalen constructie	/
Boormachine	/
Verfmenger	15,00
Verwarmingslint	500,00
Analoge druk sensor	20,00
Analoge temperatuur sensor	20,00
Digitale druksensor	33,22
Digitale temperatuursensor	11,95
Arduino	24,20
Raspberry pi	35,95
Aftakdoos	8,10
Plastieken gasleiding	22,50
Plastieken verbindingsstukken gasleiding	10,00
Gaszakken 10 x 10 l	158,00
Band 200 l	10,00
Band 570 l	/
Band 230 l	/
Blender 400 W	20,99
<b>Totaal</b>	<b>1020,09</b>



# 4 Resultaten en Discussie

## 4.1 Resultaten

### 4.1.1 Situering

Voordat de resultaten overlopen worden is er een situering gemaakt van de omgevingsparameters. Ten eerste zal er gewerkt worden met mesofiele vergisting waarbij de procestemperatuur in de meeste gevallen gelegen zal zijn rond de 37 °C. Er moet echter rekeningen worden gehouden met de temperatuur van het lokaal. Het lokaal wordt automatisch verwarmd tot 20 °C waardoor de biogasinstallatie minder invloed ondervindt van temperatuurschommelingen van buitenaf. Hierdoor wordt er in een optimale temperatuursomgeving gewerkt wat in praktijk echter niet zal zijn. De waardes zullen dus niet helemaal overeenkomen met de werkelijkheid waar de omgevingstemperatuur het hele jaar door varieert.

Ten tweede zal er slechts 5 keer per week biomassa toegevoegd worden omdat het Technologiecentrum in het weekend gesloten is. Om het vergistingsproces op te starten zal er eerst gevoed worden met koeienmest dat gehaald is uit de vergister van boerderij Theuwis [10]. Hierdoor zullen er reeds bacteriën aanwezig zijn waardoor het proces sneller zal starten. Als de biogasinstallatie eenmaal opgestart is zal het enkele weken geanalyseerd worden met koeienmest om dan over te stappen op keukenafval. Dat geeft de mogelijkheid om het overgangproces en de verschillen tussen beide biomassa's te onderzoeken. Na het onderzoek is er echter tot de conclusie gekomen dat het proces nog aan het opstarten was bij de eerste analyse waardoor geen volledig correcte vergelijking kan gemaakt worden tussen de twee biomassa's.

Ten derde zal het vergistingsproces plaatsvinden bij atmosferedruk. Dat zal gebeuren doordat de gasopslag leeg zal worden gemaakt als hij vol zit. De reden hiervoor is de efficiëntie daling bij toenemende druk.

### 4.1.2 Koeienmest als biomassa

#### 4.1.2.1 Voeding

Als voeding voor de biogasinstallatie werd er gebruik gemaakt van koeienmest. De koeienmest was geen vers mest, maar mest dat zich reeds in een biogasinstallatie bevond. Er werd voor gebruikt mest gekozen omdat de nodige bacteriën reeds aanwezig waren in de mest en op die manier de opstart van onze biogasinstallatie versneld zou kunnen verlopen.

De mest werd afgehaald in 4 vaten van 60 liter. Wanneer de mest uit de grote biogasinstallatie gepompt werd was het nog op procestemperatuur (37 °C). Er werd geprobeerd deze warme mest zo snel mogelijk naar onze biogasinstallatie te brengen zodanig dat er zo weinig mogelijk van de bacteriën cultuur verloren zou gaan. Bij de eerste voeding werd de biogasinstallatie gevuld met ± 200 liter mest. Het vergistingsvat is hierdoor volledig gevuld, wat nodig is om de mixer en het

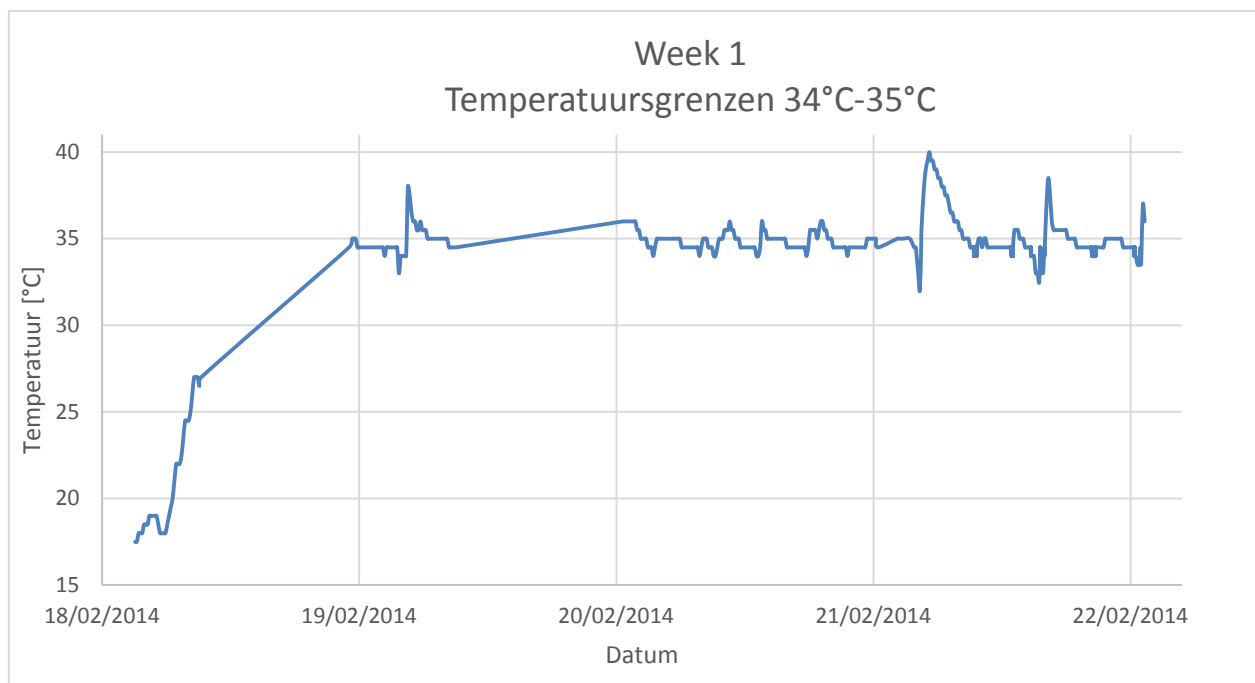
warmtelint correct te laten functioneren. Indien de biomassa zou worden opgebouwd met enkele liters per dag zou het warmtelint pas na enkele dagen en de mixer pas na enkele weken nuttig zijn. Ook zou er een te grote hoeveelheid zuurstof aanwezig zijn in de vergister, deze zuurstof moet eerst op gereageerd zijn voordat het werkelijke methaanvormingsproces opgang kan komen aangezien het een anaeroob proces is.

De overige mest werd gebruikt voor de dagelijkse voeding. De hoeveelheid die dagelijks toegevoegd werd was ongeveer 8 liter mest per dag. Deze hoeveelheid werd bepaald aan de hand van de verblijftijd. Als we de inhoud van de vergister (200 liter) delen door het dagelijks toegevoegde volume (8 liter) bekomt men de verblijftijd in dagen, hier bedroeg dat 25 dagen. De verblijftijd lijkt eerder aan de lage kant maar omdat mest een laag biogaspotentiaal heeft en het al deels vergist is kan er beter een kortere verblijftijd gehanteerd worden.

#### 4.1.2.2 Temperatuur

Tijdens het eerste semester zijn er reeds enkele testen uitgevoerd. Maar door verschillende storingen en de korte duur kan er geen beeld gevormd worden van het verloop van de opbrengsten in functie van de verschillende parameters.

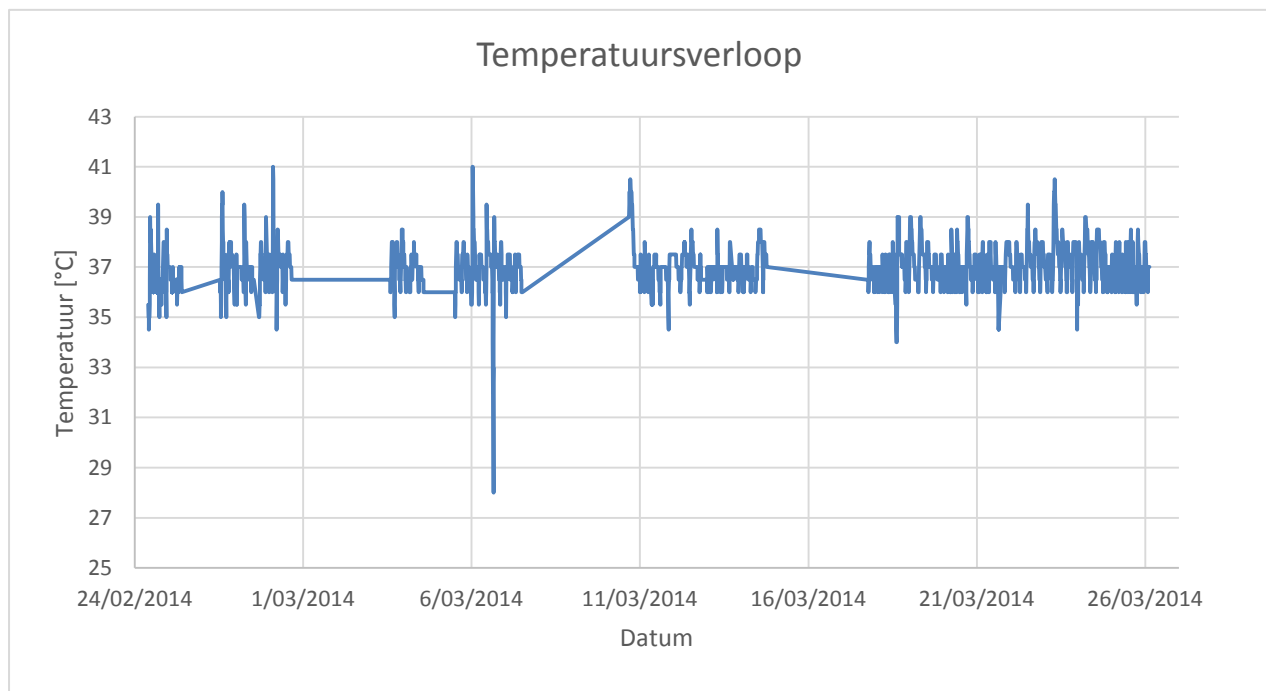
In het tweede semester is er een nieuwe test gestart maar ditmaal over een langere periode. De eerste week is er geëxperimenteerd met een lagere vergistingstemperatuur zoals is weergegeven in Grafiek 2. De temperatuurgrenzen werden ingesteld tussen 34 °C en 35 °C. Hiermee werd getest of het exotherme vergistingsproces zichzelf kon onderhouden, dat bleek echter niet mogelijk. Het energieverbruik was lager maar het proces moest nog steeds worden bijverwarmd door de externe verwarming. Daarom werd er besloten om de temperatuur terug te verhogen naar 37 °C



Grafiek 2: Nieuwe opstart met lage temperatuur

In het verdere verloop van de test werd een temperatuur nagestreeft van 37 °C. In Grafiek 3 zijn de meetresultaten van de hele periode, één maand, zichtbaar. De temperatuurgrenzen voor de verwarming werden tijdens de eerste helft ingesteld op 35 °C en 37 °C. De onderste grens werd goed gehandhaafd, soms daalde de temperatuur onder de 35 °C omdat tijdens de meting de mixer in werking was of er biomassa werd toegevoerd. Hierdoor ontstonden er lichte afwijkingen op de gemeten temperatuur. Op 06/03/2014 zien we een zeer grote temperatuur daling. Deze is te verklaren doordat er via de meetbuis water in de vergister is binnengesijpeld tijdens een dichtheidsproef. Dat water heeft de temperatuursensor afgekoeld waardoor er een zeer grote meetafwijking bekomen is.

De bovenste temperatuurgrens werd praktisch altijd voorbijgestreefd. Dat was deels doordat de verwarming nog even naverwarmt ook al is deze uitgeschakeld. Daarnaast is de verwarming onderaan in de vergister geplaatst terwijl de temperatuur in het midden van het vat gemeten wordt. Hierdoor zit er een bepaalde vertraging op het systeem omdat de warmte eerst moet stijgen voordat het geregistreerd wordt.



**Grafiek 3: Temperatuurverloop koeienmest**

Vanaf week 2 zijn de temperatuurgrenzen aangepast naar 36 °C en 37 °C. Dat is toegepast om de temperatuurvariatie kleiner te houden en dichter bij de streef temperatuur van 37 °C te komen. In Grafiek 3 is te zien dat er een kleinere temperatuurrange wordt bestreken dan voordien. De uitschieters zowel naar beneden als naar boven zijn op dezelfde manieren te verklaren als hierboven.

In de grafiek zijn er een vijftal delen waarvan geen data beschikbaar is, dit zijn de doorverbonden delen. Er is hier geen data omdat het besturingselement toen tijdelijk geen internet connectie ter beschikking had. Dat probleem is naderhand opgelost, indien er geen internetconnectie beschikbaar was werd de data tijdelijk intern opgeslagen en van zodra er wel internet beschikbaar was werd de data weggeschreven.

### 4.1.2.3 Opbrengst

Sinds de heropstart van de biogasinstallatie met koeienmest is er een constante biogasopbrengst bekomen van ongeveer 30 liter gas per dag. Dat er vanaf de eerste dag al biogasproductie was, is te verklaren doordat er mest gebruikt is uit een bestaande grote biogasinstallatie. De bacteriën die nodig zijn voor het vergistingsproces waren dus aanwezig in de biomassa.

Wat opvalt is dat de biogasinstallatie een veel lagere opbrengst per volume eenheid levert met dezelfde biomassa dan dat de grote biogasinstallatie doet. De grote biogasinstallatie levert 130 l/min aan biogas met een vergistervolume van 120 m<sup>3</sup>. Omgerekend naar een vergistervolume van 0,2 m<sup>3</sup> geeft dit een opbrengst van 312 liter biogas per dag. De behaalde opbrengst bedraagt dus maar 10 % van de potentiële opbrengst.

Het is mogelijk dat het proces nog in opstartfase zit waardoor de biogasopbrengst laag blijft. Dat betekent dan ook dat een deel van de aanwezige bacteriën in de biomassa gestorven zijn tijdens het transport, of niet voldoende actief meer waren om het volledige proces terug op gang te brengen. Het is mogelijk dat de bacteriën het methaanvormende proces niet goed opgang kregen doordat er nog zuurstof aanwezig was bovenaan in het vergistingsvat. Aangezien het een anaeroob proces is moet deze zuurstof eerst verwerkt worden voordat er Methaan gevormd kan worden. De vraag blijft of het nuttig is geweest om mest uit een bestaande biogasinstallatie te halen. De opstartperiode voor een biogasinstallatie die vanaf nul begint wordt geschat op 1 maand. Gedurende de eerste maand werd er met deze mest een continue lage biogasopbrengst van 30 liter per dag behaald.

### 4.1.2.4 Gasanalyse

Nadat de biogasinstallatie gas produceerde was het van belang om de samenstelling te achterhalen. Hiervoor is er contact opgenomen met de afdeling Chemie van de UHasselt, waardoor we in contact kwamen met Jan Czech [16]. Hij had de nodige apparatuur ter beschikking om het biogas te analyseren, omdat ze hier reeds onderzoek hadden gedaan naar biogas. Met behulp van gaschromatografie en massaspectroscopie kon de samenstelling van het gas bepaald worden. Er moet echter rekening gehouden worden dat er niet gewerkt is met referentiestalen. Dat wil zeggen dat de percentages die zijn weergegeven in Tabel 7 geen exact beeld geven van de hoeveelheden van de aanwezige stoffen. De waarden worden gebruikt om een vergelijking te kunnen maken tussen de verschillende gasanalyses.

Tabel 7: Resultaten gasanalyses koeienmest

Stof	Meting 26/2 [%]	Meting 6/3 [%]	Meting 14/3 [%]
Methaan	9,71	18,96	11,31
Ammoniak	29,14	8,19	7,92
Stikstof	/	12,74	23,12
Zuurstof	/	1,06	
CO <sub>2</sub>	57,57	56,25	56,95
H <sub>2</sub> S	2,33	1,00	0,31
Water	1,23	1,52	0,26
CS <sub>2</sub>		0,27	0,13

Uit Tabel 7 kunnen er enkele conclusies worden getrokken. Ten eerste kan er besloten worden dat de verwachte stoffen aanwezig zijn in het biogas, als de samenstelling wordt vergeleken met deze van grote installaties (zie Tabel 1). Het valt echter op dat de concentraties niet overeen komen, dat kan deels verklaard worden doordat de waarden niet vergeleken zijn met referentiewaarden zoals hierboven reeds is uitgelegd. Het is wel duidelijk dat de hoofdbestanddelen Methaan, Ammoniak, Stikstof en CO<sub>2</sub> zijn.

Ten tweede valt het op dat er een hoge waarde Ammoniak gedetecteerd is wat normaal weinig tot niet aanwezig is in biogas. Daarnaast is het mogelijk een zeer “giftige” stof in het vergistingsproces zoals weergegeven in Tabel 2. Uit voorgenoemde punten kan dus verklaard worden waarom de biogasproductie zeer laag is, het zal in de latere gasanalyses nog duidelijker worden dat de gasproductie stijgt bij het verdwijnen van Ammoniak.

Ten derde is er Zuurstof en Stikstof aanwezig, ook wel gekend als lucht. Normaal zouden deze stoffen niet aanwezig mogen zijn in het biogas omdat het vergistingsproces plaats vindt in een anaerobe omgeving. Het is te verklaren door de opslag van biogas voor de gasanalyse. Hiervoor is gebruik gemaakt van een opslagkolom (Figuur 22) waarvan de aansluitingen gevuld waren met lucht. Ook al is er verschillende keren gespoeld met biogas, het zou mogelijk zijn dat er lucht terecht is gekomen in het gasstaal.



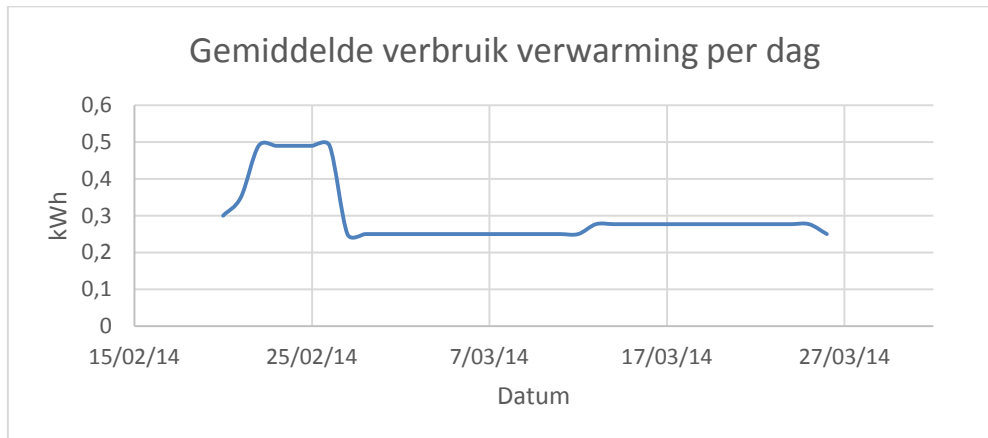
Figuur 22: Opslagkolom gasstaal

#### 4.1.2.5 Rendabiliteit

Wanneer rendabiliteit ter sprake komt, zal er gekeken worden naar de hoeveelheid energie dat er in iets wordt gestopt ten opzichte van hoeveel energie er uitgehaald kan worden. In het geval van deze biogasinstallatie zou dit betekenen dat er energie wordt toegevoerd via biomassa en elektriciteit, en er energie uitgehaald kan worden door middel van het geproduceerde gas. In deze thesis wordt rendabiliteit echter vanuit een ander standpunt bekeken. De verbrandingswaarde van de ingevoerde biomassa wordt namelijk niet in rekening gebracht bij de ingevoerde energie, dat wordt gedaan omdat deze biomassa voor de gebruiker als afval beschouwd wordt en dus geen enkele andere waarde meer heeft. Wanneer er in deze thesis gesproken wordt over rendabiliteit zal de elektrische energie nodig voor de verwarming, de menger en de sturing enkel gebruikt worden als de ingevoerde energie. Voor de uitgevoerde energie wordt enkel de hoeveelheid Methaan aanwezig in het biogas gebruikt.

Het verbruik van de verwarming staat weergegeven in Grafiek 4. Voor de verwarming wordt er gerekend met een gemiddelde van 0,3 kWh, de piek die zichtbaar is in Grafiek 4 (20/02 – 26/02) is te verklaren doordat het proces nog in zijn opstartfase bevond waardoor er nog niet voldoende exotherme reacties waren, die het verbruik verminderen. Bij de isolatie hebben we berekend dat er

een werkelijk warmteverlies is van 0,271 kWh per dag. Hier moet het warmteverlies van dagelijks toegevoegde hoeveelheid biomassa nog opgeteld worden. Als vereenvoudiging wordt de biomassa als water beschouwd. De energie die nodig is om dagelijks 8 liter water op te warmen van 20 °C naar 37 °C komt overeen met 0,158 kWh per dag. Samen met het warmteverlies komt dit op 0,429 kWh per dag. Aangezien er maar 0,3 kWh per dag verbruikt wordt voor het verwarmen van de vergister is er een verschil van 0,129 kWh per dag tussen het berekende verbruik en het werkelijk verbruik. Deze extra energie wordt door de exotherme reacties opgewekt. Bijkomend is er dan nog het verbruik van de sturing en de boormachine. De boormachine mengt om het uur 30 s lang. Dat komt neer op 12 min per dag aan 400 W wat een verbruik van 0,012 kWh betekent. Het verbruik van de sturing is verwaarloosbaar klein. In totaal geeft dit een verbruik van 0,312 kWh per dag.



**Grafiek 4: Gemiddeld verbruik van de verwarming per dag**

De energie die gewonnen kan worden uit de biogasinstallatie is enkel afhankelijk van de hoeveelheid biogas die er geproduceerd is. Tijdens deze test werd er een constante hoeveelheid van 30 liter biogas per dag gewonnen. Indien er rekening wordt gehouden met een gemiddeld methaanpercentage van 13,3 % komt dit neer op 4 liter Methaan per dag. Aangezien Methaan een equivalente waarde heeft van 10 kWh per m<sup>3</sup> [17] geeft dit een opbrengst van 0,04 kWh per dag. Deze waarden zijn geen representatieve waarden maar worden gebruikt om een indicatie te geven van de opbrengsten.

Indien er gewerkt wordt met de methaangehaltes die in de literatuurstudie aanbod gekomen zijn, namelijk 55 %, wordt er 16,5 liter Methaan per dag geproduceerd. Dit heeft een equivalente waarde van 0,165 kWh.

Om een rendabel systeem te bekomen moet er meer energie vrijgegeven worden dan dat er ingestoken moet worden. Om de rendabiliteit te berekenen moet de opgewekte energie gedeeld worden door de verbruikte energie. Gerekend met de gemeten waarde geeft dit een rendabiliteit van  $0,04/0,312 = 0,128 = 12,8 \%$ . Indien er gerekend wordt met de waarden uit de literatuurstudie geeft dit een rendabiliteit van  $0,165/0,312 = 0,528 = 52,8 \%$ . In beide gevallen kan er besloten worden dat er meer energie ingestoken moet worden dan dat er energie uitgehaald kan worden. Er moet echter rekening gehouden worden met het vergistingsproces, dat zich mogelijk nog in de opstartfase bevond waardoor de biogasopbrengst en biogaskwaliteit hun maximum nog niet bereikt hadden. Dat beïnvloedt de rendabiliteit maar toch kan er besloten worden dat de biogasinstallatie met koeienmest als biomassa geen commerciële toekomst heeft.

### 4.1.3 keukenafval als biomassa

#### 4.1.3.1 Voeding

Vanaf 27/03/2014 is er omgeschakeld van koeienmest naar keukenafval als biomassa. De omschakeling is stapsgewijs toegepast zodat de biogasinstallatie zich kon aanpassen naar de nieuwe biomassa. Het keukenafval bestond hoofdzakelijk uit aardappel- en groenteschillen. Er werden ook nog andere dingen toegevoegd zoals afval van fruit, frietvet en kleine bloemen/planten.

Om het vergistingsproces te optimaliseren kan er gebruik gemaakt worden van voorbehandelingstechnieken, zoals reeds besproken is het deel "Voorbehandeling". Er is daarom gekozen voor mechanische voorbehandeling, specifiek het verkleinen van de biomassa. Het verkleinen gebeurde in twee stadia, eerst werd het door een vleesmolen verkleind (zie Figuur 23) waarna het in een blender werd gemixt om nog kleinere deeltjes te bekomen. Nadat het afval verkleind was werd het aangelengd met water om zo het juiste drogestofgehalte te bekomen. Deze afchatting werd gedaan door de viscositeit van het gemalen keukenafval te vergelijken met de viscositeit van de koeienmest die voorheen gebruikt werd.



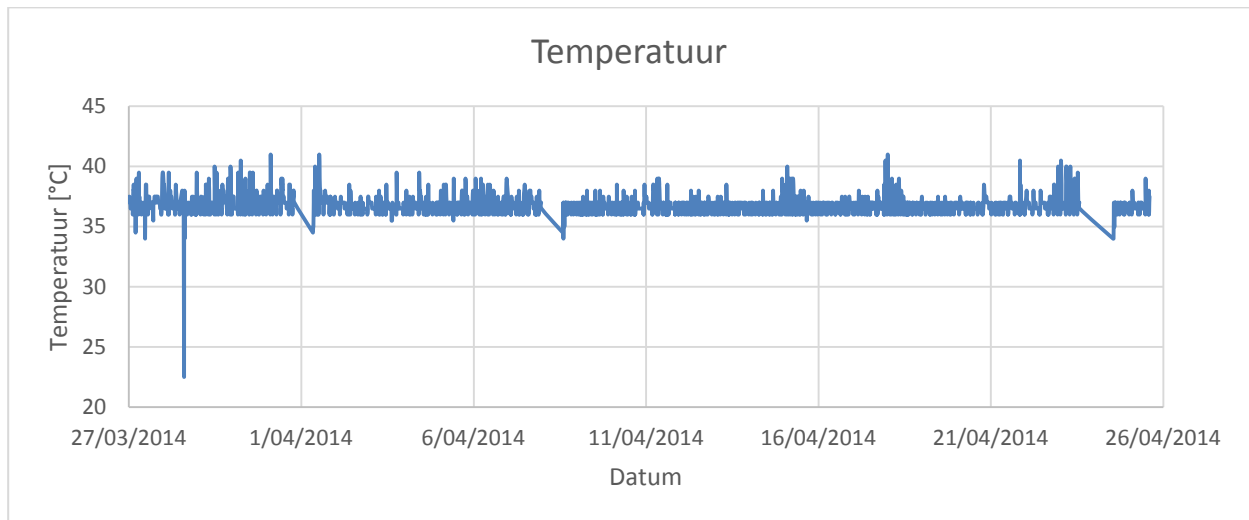
**Figuur 23: Vermaalde biomassa na vleesmolen**

Van 27/03 tot 28/03 werd er 2 liter keukenafval per dag toegevoegd in combinatie met 6 liter koeienmest per dag. De week hierna is er 4 liter keukenafval toegevoegd per dag in combinatie met 4 liter koeienmest per dag. Tot slot is er vanaf 07/04 tot en met het einde van de test gevoed met enkel 6 liter keukenafval per dag. Deze laatste periode is er dus 2 liter biomassa per dag minder toegevoegd aan de biogasinstallatie. Dat komt doordat er niet genoeg biomassa ter beschikking was om continue 8 liter keukenafval per dag toe te kunnen voeden. Daardoor is er overgestapt naar een hoeveelheid van 6 liter per dag wat wel haalbaar was. Het gevolg hiervan is dat de verblijftijd gestegen is naar 33 dagen.

#### 4.1.3.2 Temperatuur

Tijdens de test met keukenafval is er gekozen voor dezelfde temperatuurstelling als bij de test met koeienmest. De temperatuurgrenzen zijn 36 °C en 37 °C. De gemeten waarden zijn uitgezet in Grafiek 5. Uit de grafiek kan geconcludeerd worden dat de temperatuur zeer constant blijft, er zijn slechts beperkte temperatuurschommelingen waargenomen.

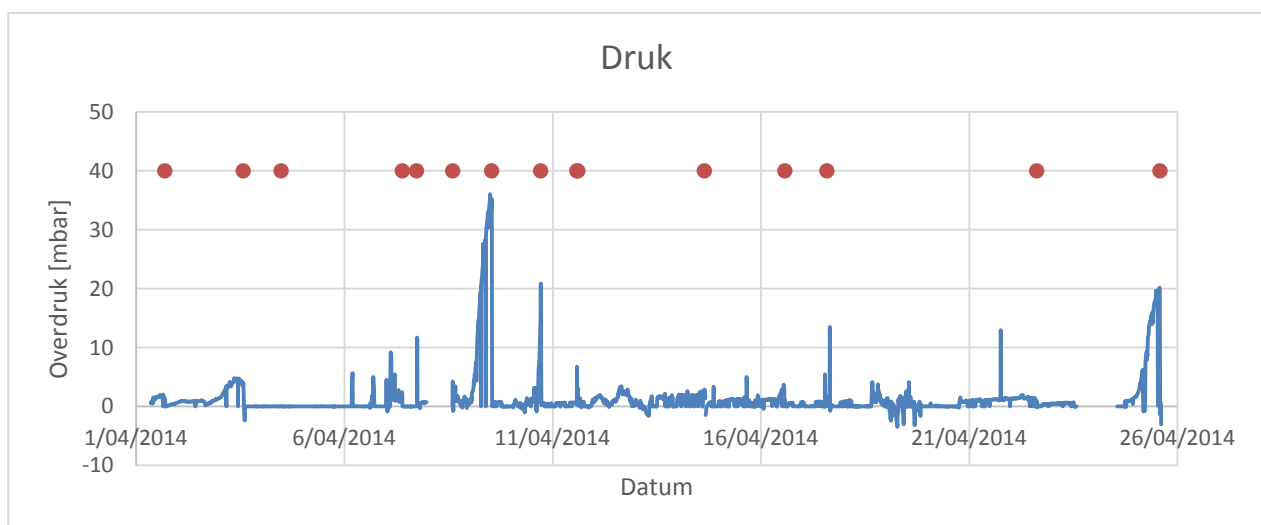
Het dal op 28/03 is te verklaren doordat de sensor uit het vergistingsvat is gehaald ter controle. Hierdoor is de sensor afgekoeld. Er zijn ook enkele rechte stukken aanwezig, dat komt doordat de sturing is uitgevallen en er geen waarden zijn weggeschreven.



Grafiek 5: Temperatuurverloop bij vergisting van keukenafval

#### 4.1.3.3 Druk

Op 01/04 is er een digitale druksensor aangesloten op de gasleiding, hierdoor was het mogelijk om drukverschillen te detecteren. Deze sensor meet namelijk het verschil tussen de atmosferedruk en de druk in de biogasinstallatie. De sensor is hoofdzakelijk gebruikt om online te kunnen kijken of de gasopslag vol was, zodat de gasopslag leeggemaakt kon worden. De gemeten waarden van de sensor zijn in Grafiek 6 weergegeven. Er kan hier vastgesteld worden dat er verschillende drukpieken aanwezig zijn die te verklaren zijn doordat de gasopslag vol zat. Om dat te bevestigen zijn in de grafiek ook de momenten aangeduid wanneer de gasopslag leeg gemaakt is, rode bolletjes.



Grafiek 6: Drukverloop & leegmaken gasopslag

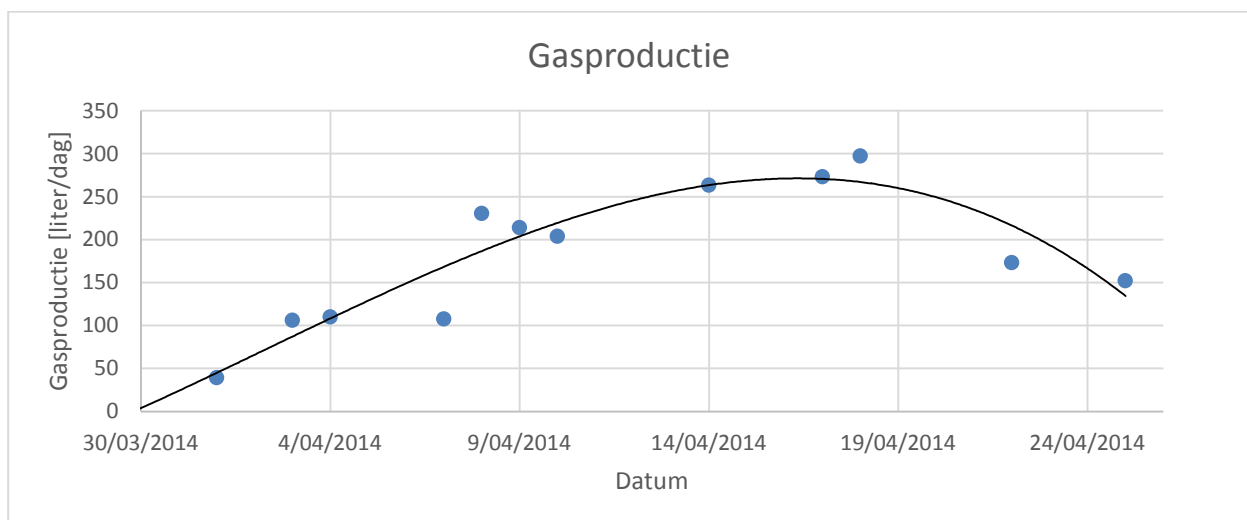


#### 4.1.3.4 Opbrengst

Sinds de overgang naar keukenafval als biomassa is er iets zeer opmerkelijks gebeurd, vanaf de eerste dag dat er keukenafval toegevoegd werd, is de gasproductie enorm toegenomen. Het zou ondoordacht zijn als dat helemaal verklaard zou worden door de omschakeling, want de vers aangevoerde biomassa zal pas na enkele dagen beginnen met gas te produceren. Daarnaast is er de eerste dagen slechts 2 liter keukenafval toegevoegd. Hierdoor kan er besloten worden het eigenlijke vergistingsproces pas vanaf 01/04 is begonnen. Daarom zijn de resultaten van de analyse met koeienmest niet meer correct, zoals in dat hoofdstuk reeds is aangehaald. Een tweede nadeel is dat er geen goede vergelijking kan gemaakt worden tussen de opbrengst van beide biomassa's.

Om de gasproductie te meten is er steeds gewacht tot de band(en) gevuld waren en dit te delen door de verstreken tijd. Hierdoor wordt er een gemiddelde over enkele dagen bekomen zoals is weergegeven in Grafiek 7. In de grafiek is te zien dat de gasproductie in de eerste 3 weken stijgt tot een maximum van  $\pm 300$  liter per dag. De oorzaak van de sterke stijging zal een combinatie zijn van het opgang komen van het vergistingsproces en de overschakeling naar keukenafval. In het vervolg van de thesis zal er daarom ook vanuit worden gegaan dat een biogasproductie is van 300 liter per dag haalbaar is.

Op het einde van de grafiek is er een daling van de gasproductie te zien tot onder de 200 liter per dag. Dit is te verklaren doordat er in het verlengde weekend van 19/04 tot 21/04 geen verse biomassa aan de installatie is toegevoegd. We denken ook dat het vergistingsproces zeer gevoelig is aan het variërende keukenafval en proces veranderingen. Er kan hier echter geen eenduidige verklaring worden gegeven omdat er geen tijd meer was om de installatie terug naar de streefwaarde van 300 liter biogas per dag te brengen.



Grafiek 7: Gasproductie bij keukenafval

#### 4.1.3.5 Gasanalyse

De gasanalyses bij het gebruik van keukenafval is op dezelfde manier gebeurd als bij koeienmest. Daardoor zijn de waardes in Tabel 8 en Tabel 9 ook geen exacte waardes, omdat er geen referentiestalen zijn gebruikt. Er zullen dus ook enkel vergelijkingen worden gemaakt tussen verschillende gasanalyses. Als Tabel 8 wordt bekeken valt er op dat bij elke meting een hoeveelheid lucht aanwezig is. Dat is enkel te verklaren door menging van lucht en biogas bij het vullen van de opslagkolom voor de gasanalyse, omdat het een anaerobe proces is. Daarom is er besloten een nieuwe tabel op te stellen waar de hoeveelheid lucht is verwijderd, zo wordt Tabel 9 bekomen.

**Tabel 8: Resultaten gasanalyse keukenafval met lucht**

Stof	Meting 28/3 [%]	Meting 7/4 G	Meting 7/4 K	Meting 11/4 G	Meting 11/4 K-a	Meting 11/4 K-b	Meting 17/4 G	Meting 22/4 G
Methaan	5,96 %	16,76 %	15,16 %	44,02 %	18,02 %	18,60 %	38,96 %	21,09 %
Ammoniak	8,25 %	8,74 %	/		/	/	/	/
Stikstof	16,07 %	11,51 %	25,32 %		3,82 %	6,078 %	10,12 %	33,12 %
Zuurstof	0,28 %	3,52 %	6,32 %		0,89 %	1,52 %	1,52 %	2,79 %
CO <sub>2</sub>	65,55 %	57,87 %	53,20 %	55,10 %	77,27 %	73,90 %	48,20 %	39,30 %
HS <sub>2</sub>	2,64 %	0,48 %	/	0,42 %	/	/	0,20 %	/
Water	0,97 %	0,57 %	/	0,45 %	/	/	0,90 %	3,40 %
CS <sub>2</sub>	0,27 %	0,15 %	/	/	/	/	/	/
Aceaon	0,01 %	0,01 %	/	/	/	/	/	0,30 %
	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

**Tabel 9: Resultaten gasanalyse keukenafval zonder lucht**

Stof	Meting 28/3	Meting 7/4 G	Meting 7/4 K	Meting 11/4 G	Meting 11/4 K-a	Meting 11/4 K-b	Meting 17/4 G	Meting 22/4 G
Methaan	6,04 %	20,09 %	21,60 %	44,02 %	18,81 %	20,04 %	41,97 %	24,29 %
Ammoniak	8,36 %	10,47 %	/		/	/	/	/
Stikstof	15,25 %	-1,85 %	2,64 %		0,55 %	0,47 %	4,83 %	26,19 %
Zuurstof	/	/	/		/	/	/	/
CO <sub>2</sub>	66,41 %	69,37 %	75,77 %	55,10 %	80,64 %	79,60 %	51,92 %	45,26 %
HS <sub>2</sub>	2,67 %	0,58 %	/	0,42 %	/	/	0,22 %	/
Water	0,98 %	0,68 %	/	0,45 %	/	/	0,97 %	3,92 %
CS <sub>2</sub>	0,27 %	0,18 %	/	/	/	/	/	/
Aceaon	0,01 %	0,01 %	/	/	/	/	/	0,35 %
	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Uit deze nieuwe tabel kunnen enkele conclusies getrokken worden. Ten eerste zijn de hoofdbestanddelen in het begin hetzelfde gebleven namelijk Methaan, Ammoniak en CO<sub>2</sub>. Vanaf de metingen van 7/4 verdwijnt Ammoniak echter. Deze dag zijn er 2 analyses gedaan, eerst met een invoer van 100 µl biogas (G) en daarna een meting van 25 µl biogas (K), omdat er duidelijk verzadigde pieken te zien waren bij de eerste meting. Bij deze 2<sup>de</sup> meting was Ammoniak volledig verdwenen, het wordt daarna ook nooit meer gedetecteerd bij voor beide invoer hoeveelheden.

Zoals besproken is in het deel “Factoren die de anaerobe vergisting beïnvloeden” is Ammoniak mogelijk een “giftige” stof voor het vergistingsproces, het kan de gasproductie sterk afremmen. Dat is ook duidelijk te zien in de resultaten, vanaf het moment dat er geen Ammoniak meer gedetecteerd wordt is de gasproductie sterk gestegen.

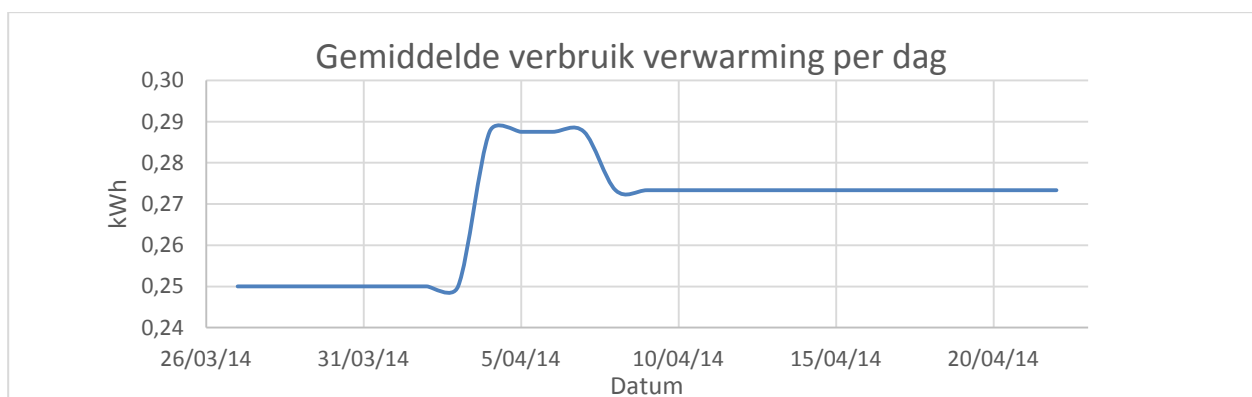
Ten tweede hebben de eerste (28/03) en de laatste (22/04) meting een duidelijk hoger stikstofgehalte dan de overige metingen. Dat is te verklaren door de procestoestand van de vergister. Bij de eerste meting was het proces nog aan het opstarten en bij de laatste meting was het proces stilgevallen. Hierdoor gebruiken de bacteriën minder Stikstof waardoor er hogere waardes gedetecteerd worden.

Ten derde zijn er 2 pieken (28/03 en 17/04) te onderscheiden in Methaan hoeveelheid. De eerste is een zeer lage piek van 6,04 % dit komt deels door de opstart, maar waarschijnlijk is het ook een slechte meting. De laatste piek is zeer hoog met een hoeveelheid van 41,97 %, het zou een slechte meting kunnen zijn maar het zou ook kunnen dat het proces aan het stabiliseren was waardoor het Methaan gehalte begint te stijgen. Een duidelijke verklaring is hier echter niet voor doordat hierna de productie is gedaald en de analyse is moeten stoppen.

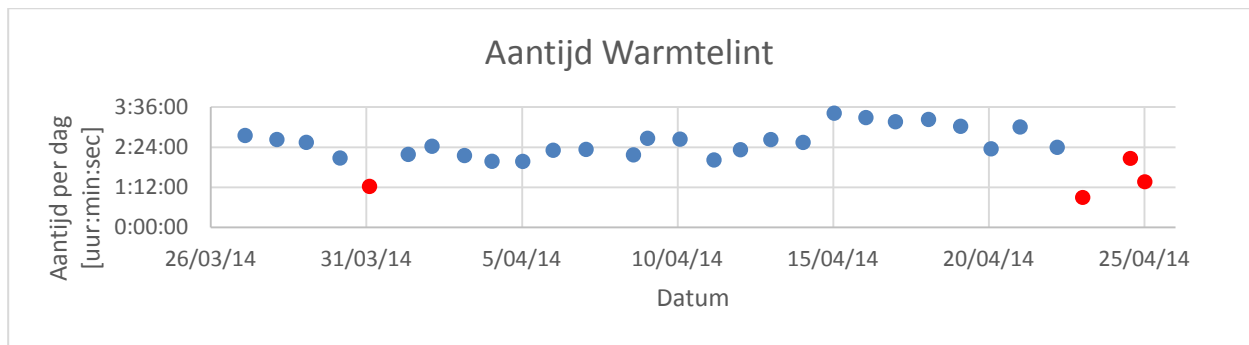
Ten vierde is er ook bij de meeste metingen H<sub>2</sub>S gedetecteerd. Deze stof is zeer corrosief zoals beschreven is in het deel “Anaerobe vergisting”. Doordat H<sub>2</sub>S gedetecteerd is, is er ook een verklaring voor de roestvorming op de installatie.

#### 4.1.3.6 Rendabiliteit

De rendabiliteit van keukenafval kan op dezelfde manier bekeken worden als in het gedeelte over koeienmest. Het verbruik van de verwarming staat weergegeven in Grafiek 8. De tijd dat de verwarming ingeschakeld is wordt weergegeven in Grafiek 9. In deze grafieken kan gezien worden dat het gemiddelde verbruik iets onder de 0,3 kWh gelegen is. Er wordt toch met een gemiddelde waarde van 0,3 kWh gerekend om zo het verbruik van de sturing te compenseren. Bijkomend is er nog de energie die verbruikt wordt door de boormachine, samen geeft dit een verbruik van 0.312 kWh per dag. Het warmteverlies en de benodigde warmte om de biomassa op te warmen is gelijk aan de voorgaande waarde van 0,39 kWh per dag. Ook hier is er dus een exotherme reactie nodig die het energieverval compenseert. Indien er ideaal geïsoleerd zou zijn komt het warmteverlies samen met de benodigde warmte om de biomassa te verwarmen op 0,289 kWh. Bij ideale isolatie zou het verbruik dus 0,1 kWh lager kunnen liggen.



Grafiek 8: Gemiddeld verbruik verwarming per dag bij keukenafval



**Grafiek 9: Aantijd warmtelint**

De energie die gewonnen wordt uit de biogasinstallatie is enkel afhankelijk van de hoeveelheid biogas dat er geproduceerd wordt. Tijdens deze test werd er een stijgende gasproductie ondervonden gaande van 30 liter per dag tot 300 liter per dag (Grafiek 7). Om een overzicht te creëren worden er met 3 verschillende waarden berekeningen gemaakt namelijk 30, 165 en 300 liter (Tabel 10). Uit de gasanalyses blijkt dat het methaangehalte gemiddeld 21,83 % bedraagt wanneer men er vanuit gaat dat de aanwezige Zuurstof tijdens de staalname is binnengedrongen. Deze waarde mag eigenlijk niet gezien worden als een werkelijke waarde omdat deze niet vergeleken is met referentiestalen, het zal echter wel gebruikt worden om een beeld te creëren van de opbrengst. Ook wordt er nog een berekening toegevoegd met het methaangehalte uit de literatuurstudie dat 55 % bedraagt.

**Tabel 10: Berekeningen opgewekte energie**

	Biogasopbrengst [l]	Methaangehalte [%]	Hoeveelheid Methaan [l]	Opgewekte Energie [kWh]
1	30	21,83	6,55	0,07
2	30	55	16,5	0,17
3	165	21,83	36,02	0,36
4	165	55	90,75	0,91
5	300	21,83	65,49	0,65
6	300	55	165	1,65

Om een rendabel systeem te bekomen moet er meer energie vrijgegeven worden dan dat er ingestoken moet worden (verbrandingswaarde biomassa niet meegerekend). Om de rendabiliteit te berekenen moet de opgewekte energie gedeeld worden door de verbruikte energie. Uit Tabel 11 kan er besloten worden dat vanaf een opbrengst van 165 l een rendabel systeem bekomen wordt. Wanneer er een continue een biogasopbrengst van 300 l per dag gehaald wordt met een methaangehalte van 21,83 % kan er 0,343 kWh per dag opgewekt worden met deze installatie. Dat overeenkomt met 125 kWh per jaar of  $\pm 3,6$  % van het jaarverbruik van een doorsnee gezin [17]. Indien er een biogasopbrengst is van 300 l met methaangehalte van 55 % wordt er een opbrengst van 1,34 kWh per dag bekomen. Dat is goed voor 489 kWh per jaar of  $\pm 14$  % van het jaarverbruik.

**Tabel 11: Berekeningen energie winst**

	Biogasopbrengst [l]	Verbruik [kWh]	Opgewekte energie [kWh]	Energie winst [kWh]
1	30	0,31	0,07	-0,24
2	30	0,31	0,17	-0,14
3	165	0,31	0,36	0,05
4	165	0,31	0,91	0,60
5	300	0,31	0,65	0,34
6	300	0,31	1,65	1,34

#### **4.1.4 Besluit**

In eerste instantie kan er besloten worden dat de analyse met koeienmest geen representatieve waarden heeft opgeleverd. Dat komt doordat het vergistingsproces zich nog in de opstartfase bevond. Omwille van deze reden kon de vergelijking tussen koeienmest en keukenafval als biomassa niet gemaakt worden. Er wordt verwacht dat de biogasopbrengst van koeienmest hoger ligt, indien het vergistingsproces goed opgang zou zijn. Maar deze opbrengst zou nog steeds lager zijn dan de opbrengst bij keukenafval. Het kan echter niet aangetoond worden door de beperkte tijd.

Bij de analyse van keukenafval als biomassa zijn er wel representatieve waarden gevonden. Zo is er een biogasproductie van 300 l biogas per dag gehaald. Met de gasanalyse is er enkel de aanwezigheid van een stof gedetecteerd kunnen worden. Hierbij werden de hoofdbestanddelen Methaan en CO<sub>2</sub> gedetecteerd. Doordat de specifieke hoeveelheden niet bepaald konden worden zijn er twee waarden geschat. De eerste waarde van het methaangehalte, 21,83 % , op basis van de gasanalyse en de tweede waarde, 55 %, op basis van praktijkvoorbeelden. Hierdoor kon er respectievelijk 125 kWh en 489 kWh per jaar opgewerkt worden.

Uit de gevonden waarden kan besloten worden dat de installatie energetisch rendabel is omdat het meer energie opwekt dan dat het verbruikt. Er kan echter niet worden gezegd dat de installatie economisch rendabel is. Hiervoor is de opbrengst alsnog te laag.

## 4.2 Analyse van commerciële toepasbaarheid

### 4.2.1 Situering

Er is een concept ontworpen om een beeld te krijgen van de commerciële toepasbaarheid. Hierbij zal er aandacht worden besteed aan 3 punten namelijk visualisering, rendabiliteit en commerciële toepasbaarheid. Bij de visualisering wordt er een 3D model gemaakt van een biogasinstallatie die geschikt is voor een gezin van 3 personen. Het model zal voorzien zijn van een automatische voeding, dosering- en regelsysteem. Hierdoor zal enkel het keukenafval en eventueel tuinafval moeten worden toegevoegd. Het digestaat kan gebruikt worden voor de bemesting van de tuin of kan afgevoerd worden. Tenslotte zal er ook rekening gehouden worden met de veiligheid en de ergonomie.

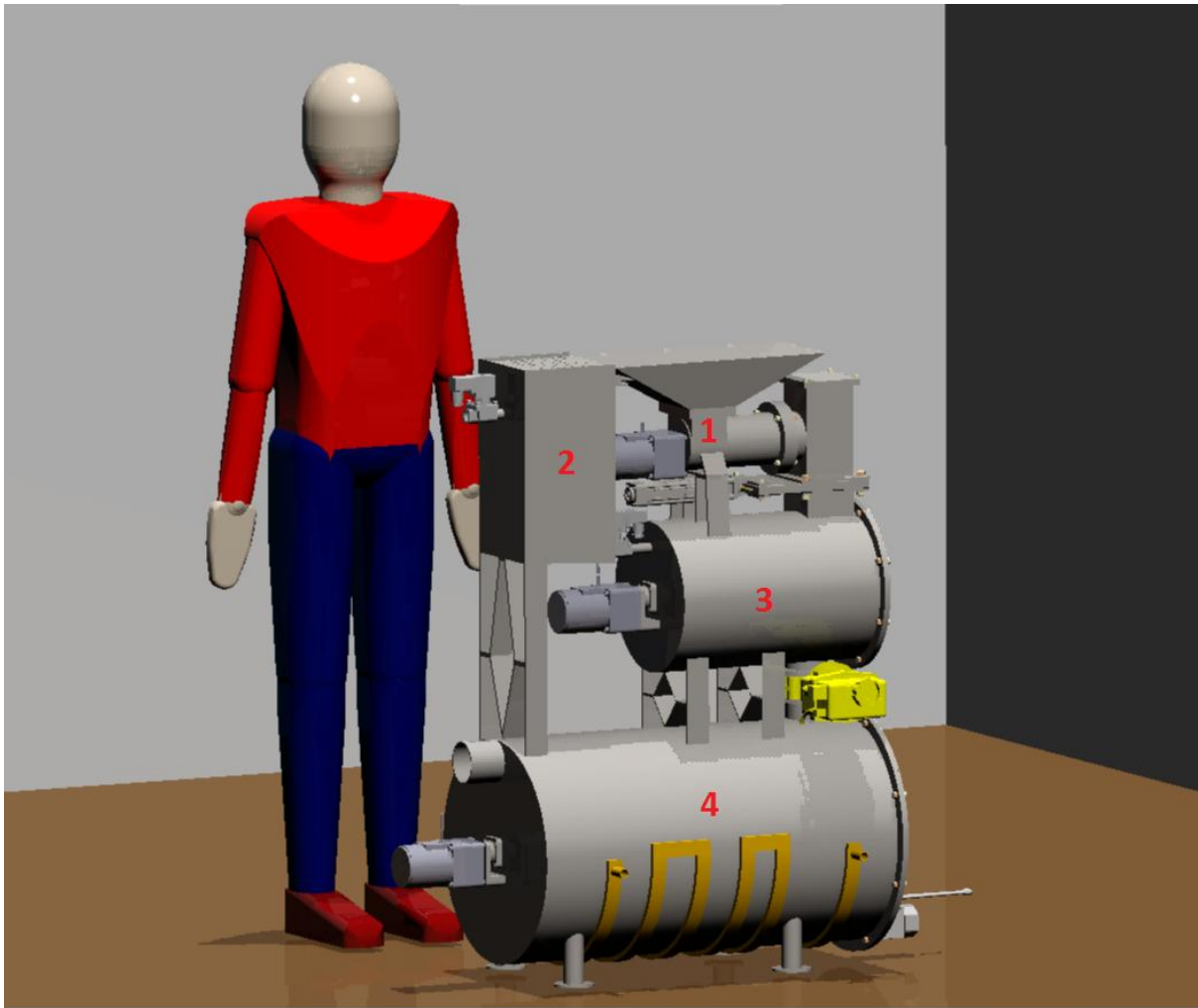
In het 2<sup>de</sup> deel zal de rendabiliteit berekend worden. Doordat de installatie enkel theoretisch bestaat, zal er een schatting gemaakt worden van de opbrengst op basis van de gevonden resultaten bij de testopstelling. Het verbruik van de installatie zal bepaald worden aan de hand van de toegepaste verwarming en motoren. De bedrijfstijd van deze verbruikers zal geschat worden op basis van de kennis die er is opgedaan doorheen de testen.

Tenslotte zal er een kostenberekening gemaakt worden van de totale biogasinstallatie. Met behulp van deze kost en de opbrengst van de installatie kan er dan antwoord gegeven worden op de vraag of het al dan niet commercieel rendabel is.

### 4.2.2 Ontwerp

In Figuur 24 is er een commercieel concept van een biogasinstallatie voor kleinschalig gebruik afgebeeld. De persoon die erlangs staat is 1 m 76 groot, zo kan er een beeld gecreëerd worden van de grootte van de installatie. De installatie is opgebouwd uit 4 hoofdcomponenten:

1. *Verwerking vaste biomassa:* Bovenaan de installatie is er een trechter zichtbaar, hierin moet de vaste biomassa geplaatst worden om zo door de vermaler verwerkt te worden. De gemalen biomassa komt terecht in een tijdelijk opslagreservoir.
2. *Verwerking vloeibare biomassa:* Links bovenaan is het vloeistofvat zichtbaar, hierin kan de vloeibare biomassa gegoten worden. Deze biomassa wordt hier opgeslagen totdat deze nodig is voor verwerking.
3. *Mengvat:* De vaste en de vloeibare biomassa worden in het mengvat gemengd tot het juiste drogestofgehalte is bereikt. Vanuit dit voorraadvat wordt de dagelijkse hoeveelheid biomassa aan het vergistingsvat toegevoegd. Er kan hier voor een 7-tal dagen biomassa opgeslagen worden om eventuele onderbrekingen in de voeding op te vangen.
4. *Vergistingsvat:* In het vergistingsvat vindt het eigenlijke vergistingsproces plaats. Dagelijks wordt er nieuwe biomassa toegevoegd en de overtollige biomassa verwijderd. Het gevormde gas wordt via een gasaansluiting afgevoerd.



Figuur 24: Overzicht concept

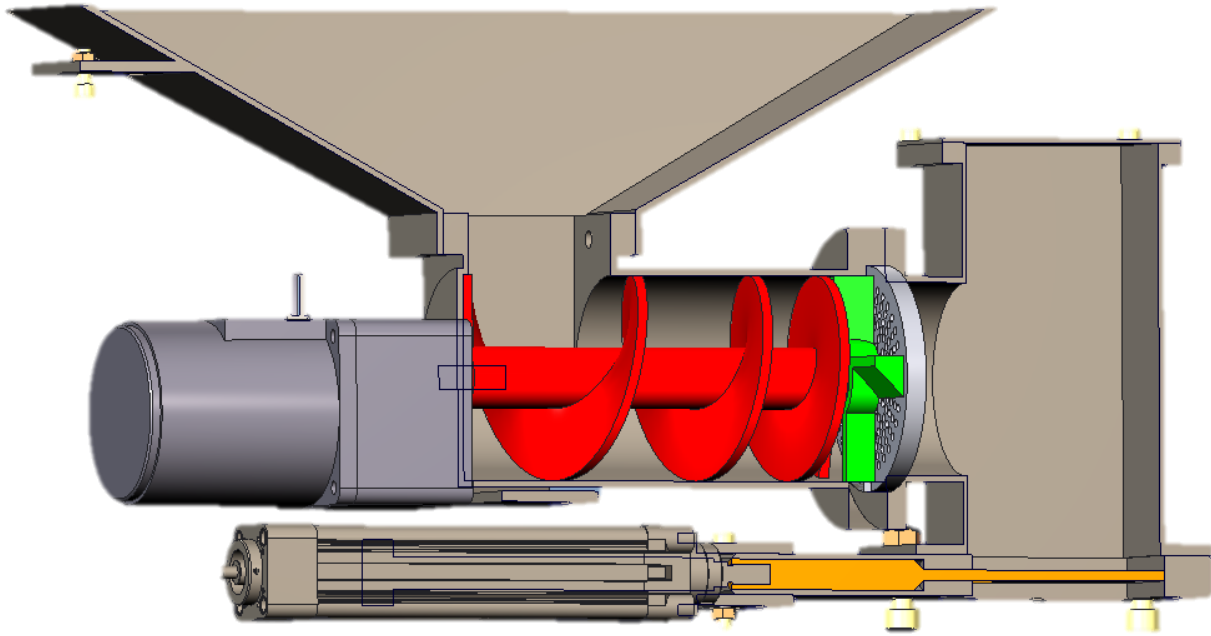
## 4.2.3 Werking

### 4.2.3.1 Verwerking vaste biomassa

In Figuur 25 is het verwerkingsgedeelte voor de vaste biomassa afgebeeld. Er is gekozen voor deze voorbehandeling om het vergistingsproces te versnellen, zoals in het hoofdstuk voorbehandelingen reeds besproken is. Via de invoertrechter wordt de vaste biomassa naar de invoervijzel (rood) van de vermaler geleid. De invoervijzel voert de biomassa naar het snijmes (groen) met net daarachter een zeef (licht grijs). Het snijmes snijdt de biomassa fijn zodat deze door de zeef geperst kan worden. Aan de hand van de zeef wordt de grootte van de biomassa bepaald.

De vermaler wordt aangedreven door een motor met een ingebouwde reductor. Deze reductor zorgt ervoor dat de invoervijzel samen met het snijmes op een laag toerental draaien. Dat is nodig omdat de vermaler een grote kracht vereist en een zeer laag toerental. De vermaler is gebaseerd op het principe van een gehaktmolen. Uit tests blijkt dit principe feilloos te werken. Op Figuur 23 is biomassa zichtbaar die door een gehaktmolen verwerkt is. De biomassa bestaat uit kleine deeltjes die gemakkelijk binnen de verblijftijd vergisten.

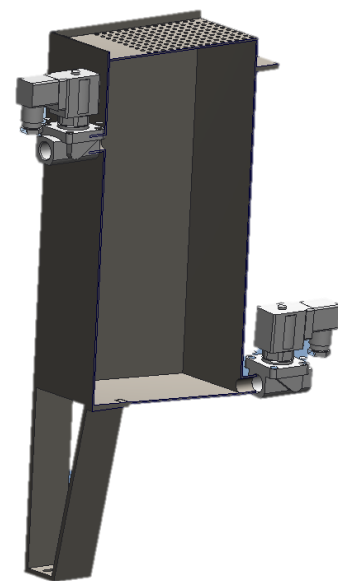
De verwerkte biomassa komt in een tijdelijk opslagreservoir terecht dat rechts op onderstaande figuur zichtbaar is. De vermaler zal, indien er voldoende biomassa in de vultrechter aanwezig is, blijven vermalen totdat het tijdelijk opslagreservoir vol is. Het niveau in dat reservoir wordt gedetecteerd door een niveausensor. Wanneer het opslagreservoir vol is zal de schuifklep (geel) zich openen waardoor de gemalen biomassa in het mengvat terechtkomt. De schuifklep wordt doormiddel van een elektrische cilinder aangestuurd. Er is geopteerd voor een elektrische cilinder zodat er geen andere energievorm aangewend moet worden.



Figuur 25: Verwerking vaste biomassa

#### 4.2.3.2 Verwerking vloeibare biomassa

Vloeibare biomassa's zoals frietvet en sauzen worden gescheiden van de vaste fractie. De fracties worden gescheiden om naderhand het juiste drogestofgehalte te kunnen bepalen. Bovenaan in het vloeistofvat (Figuur 26) is er een rooster geplaatst. Gemengde biomassa kan hierop gegoten worden zodat de vloeibare fractie door de zeef kan sijpelen terwijl de vaste fractie naar de naastliggende invoertrechter gevoerd kan worden. Het vloeistofvat heeft een inhoud van 25 l en het niveau in het vloeistofvat wordt gemeten met een niveausensor. Wanneer er in het mengvat vloeistof nodig is kan er via de elektrisch gestuurde klep rechts op Figuur 26 toegevoegd worden. Indien er geen vloeibare biomassa in het vloeistofvat aanwezig is zal er water toegevoegd worden via de elektrisch gestuurde klep links boven op het vloeistofvat.



Figuur 26: Verwerking vloeibare biomassa



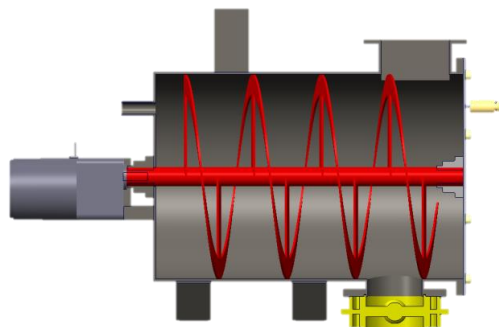
### 4.2.3.3 Mengvat

In het mengvat (Figuur 27) wordt zowel de vaste als de vloeibare fractie gemengd totdat er biomassa met een juist drogestofgehalte is bekomen. Een meting van het drogestofgehalte is in praktijk zeer moeilijk. Daarnaast is het drogestofgehalte afhankelijk van welke biomassa er gebruikt wordt. Daarom wordt er een gemiddelde genomen van de drogestofgehaltenes van de meest gebruikte biomassa's en op basis daarvan wordt er vloeibare biomassa of water toegevoegd. De hoeveelheid toe te voegen vloeistof kan bepaald worden doordat het volume vaste stof gekend is, deze wordt bepaald door de niveausensor in tijdelijke opslagvat van de vaste stof.

Het mengvat is voorzien van een spiraalvormige menger die de biomassa tot een homogeen mengsel zal mengen. De spiraal komt tot op de bodem om zo alle biomassa goed te kunnen mengen en de afzetting in het vat te beperken. De menger wordt aangedreven door een motor met ingebouwde reductor, aangezien de mengspiraal op een laag toerental moet kunnen draaien.

Het mengvat is aan de rechterzijde afgesloten met een deksel. Dit deksel kan verwijderd worden om eventuele verstoppingen te verhelpen of om het vat zuiver te maken. Door deze opening is alles makkelijk bereikbaar voor onderhoud. Ook de mengspiraal kan via deze opening verwijderd worden. Bovenaan het deksel is er een overdrukventiel gemonteerd. Hoewel het niet de bedoeling is dat er in het mengvat al vergisting optreed, is het toch mogelijk. Aangezien het om een afgesloten vat gaat kan er drukopbouw plaatsvinden. Om veiligheidsredenen is dit overdrukventiel dan ook noodzakelijk. Door dit overdrukventiel moet er wel rekening gehouden worden met de ventilatie van de ruimte waarin de installatie zich bevind. Indien deze ruimte slecht geventileerd is zal het overdruk ventiel moeten worden aangesloten aan een gasleiding die naar buiten wordt geleid. Dat is noodzakelijk om explosieve gasmengsels te voorkomen.

Onderaan het mengvat is er een aansluiting voorzien naar het vergistingsvat. Deze verbinding is afgesloten met een elektrisch bediende vlinderklep. Via deze klep wordt de dagelijkse hoeveelheid verse biomassa toegevoegd aan het vergistingsvat. Deze hoeveelheid biomassa wordt geregeld door de sturing van de klep, deze is afhankelijk van de tijd dat de klep geopend is. Deze regeling zal proefondervindelijk bepaald moeten worden en de nauwkeurigheid zal beperkt zijn, maar voldoende voor de biogasinstallatie. Omdat er altijd een bepaalde hoeveelheid biomassa in het mengvat aanwezig zal zijn, functioneert deze als een natuurlijke afsluiting, waardoor er geen Zuurstof in het vergistingsvat terecht kan komen. Dit is belangrijk omdat kleine hoeveelheden Zuurstof het vergistingsproces al kunnen verstoren.



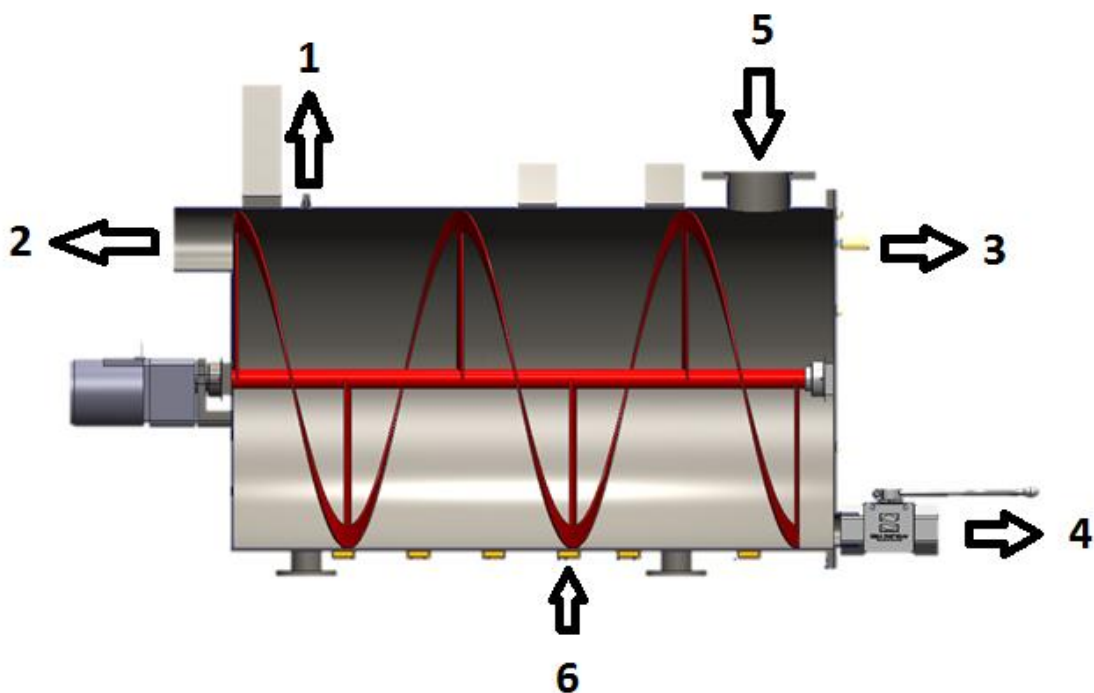
Figuur 27: Mengvat

#### 4.2.3.4 Vergistingsvat

Het eigenlijke vergistingsproces vindt plaats in het vergistingsvat (Figuur 28). Via de verbinding met het mengvat (5) wordt de dagelijkse hoeveelheid van 3 liter biomassa toegevoegd. Het vergistingsvat is voorzien van een spiraalvormige menger (rood). Deze menger is aangedreven door een motor met ingebouwde reductor zoals bij het mengvat. Het is belangrijk om goed te mengen zodat er geen afzetting plaatsvindt in het vat. Deze afzetting zou het volume van het vergistingsvat verkleinen waardoor ook de verblijftijd verkort wordt.

Op de onderste helft van het vergistingsvat is er een verwarmingsbuis voorzien (6) om het vergistingsvat op temperatuur te houden. In deze koker kan er een elektrisch verwarmingslint aangebracht worden of er kan warm water doorgestuurd worden. Deze keuze hangt af van de energiebronnen die ter plaatse beschikbaar zijn. Zo zal een gezin dat over zonnecollectoren of een warmtepomp beschikt mogelijk beter af zijn met de warmwateroplossing. Om de warmte binnen het vergistingsvat te houden is er isolatie aangebracht. Zowel het vergistingsvat als het mengvat is geïsoleerd om zoveel mogelijk het energieverlies te beperken. De isolatie is niet weergegeven op de concept tekeningen, dit zou teveel details over de werking van de installatie belemmeren.

Wanneer er verse biomassa toegevoegd wordt zal er een gelijke hoeveelheid biomassa via de overloop (2) verwijderd worden. Het geproduceerde gas wordt via de gasconnectie (1) naar de gasopslag geleid. Wanneer er door omstandigheden een te grote drukopbouw plaatsvindt in het vergistingsvat zal het overdrukventiel (3) zich openen en het teveel aan gas laten ontsnappen. Er zal hier eventueel ook een gasleiding moeten worden gebruikt zoals besproken is bij het mengvat. Indien er onderhoud moet plaatsvinden of er is een probleem, kan via de kogelkraan (4) alle biomassa verwijderd worden. Nadat alle biomassa verwijderd is kan het deksel van het vergistingsvat verwijderd worden. Hierdoor is het mogelijk om het vat te reinigen of om onderdelen te inspecteren en indien nodig te vervangen.

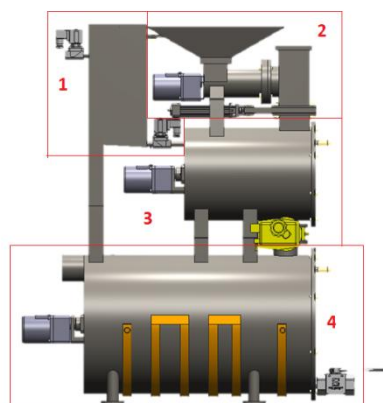
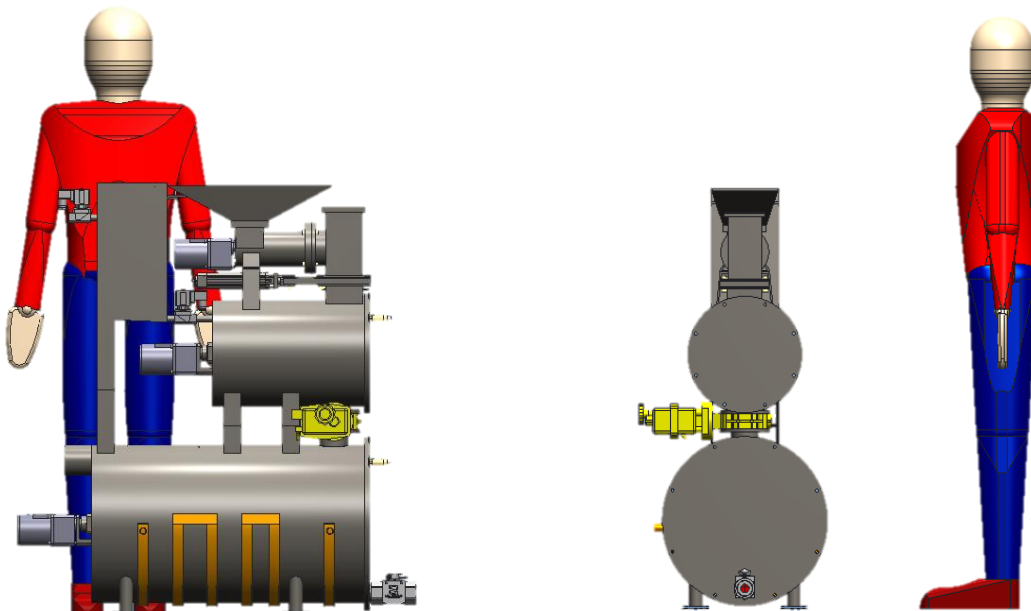


Figuur 28: Vergistingsvat

## 4.2.4 Ergonomie

Bij het ontwerp van deze biogasinstallatie is er rekening gehouden met de ergonomie. Op Figuur 29 is zichtbaar hoe groot de installatie is ten opzichte van een persoon van 1 m 76. De hoogte van de biogasinstallatie is zo klein mogelijk gehouden. Dat is gedaan omdat er bovenaan in de installatie biomassa toegevoegd moet worden. Het is niet makkelijk om biomassa boven schouderhoogte in te laden. Aangezien de installatie maar 1 m 24 hoog is, kan de invoertrechter gemakkelijk geïnspecteerd worden of alle biomassa goed verwerkt wordt. De invoervijzel van de vermaler is hierdoor zichtbaar, zo bestaat er minder kans op ongelukken.

De installatie is zo ontworpen dat het uit een aantal componenten bestaat die een afzonderlijke functie hebben (Figuur 29). Deze componenten zijn: verwerking vloeibare biomassa (1), verwerking vaste biomassa (2), het mengvat (3) en het vergistingsvat (4). Elke component is demonteerbaar en inwendig bereikbaar voor reiniging en onderhoud. Vooral bij het mengvat en het vergistingsvat is dit belangrijk omdat hier verstoppingen kunnen optreden. Daarom zijn deze twee vaten uitgerust met een deksel waardoor ook de mixers die in de vaten aanwezig zijn, gedemonteerd kunnen worden.



Figuur 29: Ergonomische aspecten

## 4.2.5 Rendabiliteit

### 4.2.5.1 Kostenanalyse

De kostenanalyse is gebaseerd op prijzen die bekomen zijn door verschillende fabrikanten te vergelijken. Uit deze analyse wordt er een totaalprijs van 3955 euro, afgerond 4000 euro, bekomen (Tabel 12). Er moet echter aan gedacht worden dat dit een prototype is van de installatie, waardoor de kosten nog kunnen variëren door eventuele aanpassingen. Daarnaast kan de prijs ook nog verlaagd worden door serieproductie.

Tabel 12: Kostenanalyse concept

Materiaal & machinekost				
Nr.	Beschrijving	Prijs/eenheid [€/e]	Aantal	Prijs [€]
1	Vijzel maler	40	1	40
2	Behuizing maler	15	1	15
3	Mes maler	10	1	10
4	Zeef maler	8	1	8
5	Motor met reductor	110	3	330
6	DNCE-40-100-LS-"2,5"P-Q Elect. Drive	700	1	700
7	Contactloze niveaumeter	80	2	160
8	Elektrische kogelkraan klein	100	2	200
10	Elektrische vlinderkraan groot	350	1	350
9	Overdrukventielen	20	2	40
11	Lager + houder	30	2	60
12	Kogelkraan (afvoer)	20	1	20
13	Warmtelint/aansturing	200	1	200
14	Isolatie	50	1	50
15	Bouten/moeren	30	/	30
16	Afdichtingsring	10	2	20
17	Plaatstaal 2 mm	50	4	200
18	Plaatstaal 6 mm	150	0,5	75
19	Druksensor	33,22	1	35
20	Temperatuursensor	11,95	1	12
21	Besturing/bedieningpaneel	350	/	350
22	Aansluitingen/voetjes/...	50	/	50
Subtotaal				2905

Arbeidskost			
Beschrijving	Prijs/uur [€/u]	Uren	Prijs [€]
Arbeider	30	35	1050
Totaal			3955

#### 4.2.5.2 Verbruik

De biogasinstallatie heeft een aantal procesparameters waaronder het energieverbruik (Tabel 14). Allereerst zijn er 3 motoren van 40 W die de vermaler en de 2 mengers aandrijven. Hiernaast is er ook nog de verwarming die er voor zorgt dat het vergistingsvat op 37 °C blijft. Tot slot is er nog de sturing en de sensoren die het geheel in goede banen leiden.

Het verbruik van de motoren wordt geschat aan de hand van de bedrijfstijd per dag. Voor de motor die de maler aandrijft wordt een bedrijfstijd van 15 min per dag aangerekend. Voor de menger in het mengvat 10 min per dag en voor de menger in het vergistingsvat 24 min per dag. Gemiddeld komt dit op 0,272 uur per dag aan 40 W.

Wanneer het vat op 37 °C gehouden wordt en de omgevingstemperatuur 15 °C bedraagt, wordt het energieverlies berekend op 0,235 kWh per dag, weergegeven in Tabel 13.

**Tabel 13: Berekeningen warmteverlies concept**

	Thermische geleidbaarheid $\lambda$ [W/(m.K)]	Dikte d [m]	Oppervlakte A [m <sup>2</sup> ]
Isolatie	0,03	0,1	1,481
Wand vat	20	0,01	

	Warmteweerstand R [m <sup>2</sup> K/W]	Warmteverlies Q [J]	
Vergistingsvat	3,334	9,775	
		0,235	kWh

Er moet nog rekening gehouden worden met de energie die vrijkomt door het exotherme proces. Daarom wordt er 0,235 kWh per dag aangerekend voor de verwarming samen met de sturing en de sensoren. Dit geeft in totaal een verbruik van 0,268 kWh (Tabel 14) per dag of 97 kWh per jaar.

**Tabel 14: Energieverbruik concept**

Omschrijving	Aantal	Bedrijfstijd per dag [uur]	Verbruik per dag [kWh]
Motor 40 W	3	0,272	0,033
Verwarming	1	temperatuur regeling	0,235
Sturing + sensoren	1	continu	

#### 4.2.5.3 Geschatte gasopbrengst

Het is zeer moeilijk om een correcte waarde te schatten voor de gemiddelde opbrengst van het concept. Mede omdat bij de analyse van de testopstelling geen concrete waardes gevonden werden voor de gasopbrengst en de samenstelling. Daarom zullen de berekeningen uitgevoerd worden in 4 verschillende situaties, zo zijn er 2 verschillende gasopbrengsten en methaangehaltes mogelijk.

De gasopbrengst is geschat op basis van het vergistingsvolume, in dit geval 100 liter. In de eerste situatie is er gekozen voor een opbrengst van 150 liter dit is de opbrengst van de testopstelling die geschaald is op basis van het vergistingsvolume. In de tweede situatie is er gekozen voor 200 liter. Deze waarde is gekozen doordat er nog verbetering zijn aangebracht aan de installatie en de samenstelling van de biomassa. De biomassa zal nu echter beter gemengd worden waardoor de gasproductie gestimuleerd wordt. Daarnaast is het vat nu volledig gevuld met keukenafval, in plaats van een mengsel van mest en keukenafval, wat de productie verder verhoogt.

Om waardes toe te kennen aan het methaangehalte is er gebruik gemaakt van praktijkvoorbeelden. Dat is gedaan omdat er in onze analyse geen absolute waardes bepaald konden worden. Het eerste methaangehalte bedraagt 55% wat een veel voorkomende waarde is bij biogasinstallaties met mest als biomassa. De tweede waarde bedraagt 65%, dit is gebaseerd op het hogere potentiële methaangehalte doordat er keukenafval gebruikt wordt als biomassa. Uit deze parameters kan de energieopbrengst berekende worden, zie Tabel 15.

**Tabel 15: Energieopbrengst gasproductie concept**

Gasopbrengst [l]	Methaangehalte [%]	Hoeveelheid Methaan [l]	Energie [J]	Energie [kWh per dag]	Energie [kWh per jaar]
150	55	82,5	2953500	0,82	299,45
150	65	97,5	3490500	0,97	353,90
200	55	110	3938000	1,09	399,27
200	65	130	4654000	1,29	471,86

#### 4.2.5.4 Rendabiliteit

Bij de rendabiliteit wordt er gekeken naar hoeveel energie het concept zou kunnen opwekken op jaarbasis (zie Tabel 16). Deze opbrengst hangt af van welke gasproductie er behaald wordt. Indien er een elektriciteitsprijs van 20 cent per kWh gerekend wordt kan de terugverdientijd berekend worden. De prijs van de installatie wordt geschat op 4000€ en de opbrengst per jaar varieert tussen de 40,5€ en 75€ per jaar. Hiermee wordt er een terugverdientijd tussen 53 en 99 jaar verwacht. Daarnaast kan er ook gerekend worden met de aardgasprijs, deze bedraagt 6 cent per kWh. Hiermee wordt een terugverdientijd tussen 178 en 330 jaar verwacht. [17]

De terugverdientijden zijn veel te lang om het voor commerciële doeleinden toe te kunnen passen. Wel moet er vermeld worden dat de energieprijzen in de toekomst zullen toenemen en er eventueel mogelijkheden bestaan om subsidies te trekken voor biogasinstallaties. Hierdoor zullen de terugverdientijden dalen maar nog steeds niet aantrekkelijk genoeg zijn voor de commerciële markt.

**Tabel 16: Energieopbrengst concept**

Gasopbrengst [l]	Methaangehalte [%]	Energie [kWh per jaar]	Verbruik [kWh per jaar]	Opbrengst [kWh per jaar]
150	55	299,45	97	202,45
150	65	353,9	97	256,9
200	55	399,27	97	302,27
200	65	471,86	97	374,86

## 5 Besluit

In eerste instantie kan er besloten worden dat de analyse met koeienmest geen representatieve waarden heeft opgeleverd. De oorzaak hiervan is de opstarttijd van het vergistingsproces, die bijna een maand langer heeft geduurd dan verwacht. Hierdoor zijn er zeer lage waardes gevonden voor de gasopbrengst. Door deze redenen konden de resultaten niet vergeleken worden met de resultaten die met keukenafval behaald werden. Er wordt verwacht dat de biogasopbrengst van koeienmest hoger ligt, indien het vergistingsproces goed opgestart zou zijn. Maar deze opbrengst zou nog steeds lager zal zijn dan de opbrengst bij keukenafval. Dit zijn slechts speculaties op basis van de opgedane ervaringen en kunnen afwijken van de werkelijkheid.

De analyse van keukenafval is echter correct verlopen. Hierbij is er een gasopbrengst van 300 liter per dag bekomen. Deze opbrengst is echter niet lang stabiel gebleven doordat het proces zeer gevoelig is en voordat het proces bijgestuurd kon worden is er een fout opgetreden in de sturing. Daarnaast was de tijd te beperkt om de installatie terug op peil te brengen. Er kan dus ook niet met zekerheid gezegd worden dat de maximale gasproductie is behaald. Met behulp van de gasanalyse werden de hoofdbestanddelen Methaan en CO<sub>2</sub> gedetecteerd. Doordat er geen percentages bepaald konden worden zijn er twee waardes geschat voor Methaan. Het eerste methaanpercentage, 21,83 % , op basis van de gasanalyse en het tweede percentage, 55 %, op basis van praktijkvoorbeelden. Met deze metingen kan er respectievelijk 125 kWh en 489 kWh per jaar opgewekt worden met deze biogasinstallatie.

Er is verder onderzoek nodig om het volledige potentieel van kleinschalige biogasinstallaties te bepalen. Er zijn nog verschillende optimalisaties mogelijk waardoor de gasproductie en gaskwaliteit verhoogd zou kunnen worden. Onderdelen zoals regeling, voeding en verwarming spelen hierbij een grote rol. Ook is het belangrijk de testen over een langere periode te beschouwen. Dat is nodig omdat het proces een relatief lange opstart periode heeft en het zeer gevoelig is waardoor er schommelingen optreden in de resultaten.

Bij het ontwerp van een commercieel concept zijn er een aantal waarden geschat op basis van ervaringen die bij de voorgaande analyses zijn opgedaan. Het commerciële concept is voorzien van de nodige automatiseringen, waardoor het proces volledig controleerbaar is. Er moet enkel biomassa toegevoegd worden aan de installatie, de rest gaat automatisch. De kostprijs van de installatie wordt geschat op 4000 € per eenheid. Deze prijs is sterk afhankelijk van de grootte van de serieproductie. De opbrengsten van de installatie hangt af van de biogasproductie, de kwaliteit van het gas en de eventuele subsidies. Aanvankelijk wordt er een opbrengst geschat tussen de 202,45 en de 374,86 kWh per jaar. Dat geeft een terugverdientijd tussen de 53 en de 330 jaar afhankelijk van de elektriciteitsprijs of de gasprijs per kWh.

Over het algemeen kan er besloten dat er meer energie uit de installatie wordt gehaald dan dat er verbruikt wordt. De opbrengst is echter te laag voor commerciële doeleinden. Er zal verder onderzoek nodig zijn om de opbrengst te verhogen.





# Literatuurlijst

- [1] I. Verboven, „Toepassing van anaerobe vergisting in Senegal,” Diepenbeek, 2012-2013.
- [2] Elia, „Elia,” Elia, 15 12 2013. [Online]. Available: <http://www.elia.be/nl/grid-data/productie/productiepark>. [Geopend 114 12 2013].
- [3] B. Naeyaert, „Vergisting op boerderijschaal,” Provincie West-Vlaanderen.
- [4] B. Nys, „Thermische voorbehandeling bij anaerobe vergisting: karakterisatie en modellering,” 2009-2010.
- [5] B.-E. vzw, „Biogas-E,” Biogas-E vzw, [Online]. Available: <http://www.biogas-e.be/>. [Geopend 2013].
- [6] Groep, BECO, „Vergisting. Omzetten van biomassa in een energierijk gas,” [Online]. Available: <http://www.vlaanderen.be/nl/publicaties/detail/mb1-vergisting-omzetten-van-biomassa-in-een-energierijk-gas>.
- [7] A. Kool, M. Timmerman, H. de Boer, H.-J. van Dooren, B. van Dun en M. Tijmenssen, „Kennishouding covergisting,” Culemborg, 2005.
- [8] Technische Hogeschool Eindhoven, „Methaanbereiding uit organisch afval,” Eindhoven, 1979.
- [9] P. D. I. W. Verstraete, Biogas, Rijksuniversiteit Gent: Stichting Leefmilieu v.z.w., 1981.
- [10] W. Theuwis, Interviewee, *Veldstudie Biogasinstallatie*. [Interview]. 29 09 2013.
- [11] M. Bennenbroek, „Slimme tunnelvisie op biologisch drogen,” CSR, 13 12 2012. [Online]. Available: <http://centraleslibverwerkingrotterdam.wordpress.com/2012/12/13/slimme-tunnelvisie-op-biologisch-drogen/>.
- [12] G. Ghekiere, H. Vervaeren, M. Bossuwé en K. Hostyn, „Inkuiladditieven verhogen de biogasopbrengst van maïs,” [Online]. Available: <http://www.enerpedia.be/nl/ezine2artikel5>.
- [13] V. Group, „Small Biogas,” Vivam Solid Waste Management Pvt. Ltd., 2010. [Online]. Available: [http://www.vivamgroup.co.in/small\\_biogas.html](http://www.vivamgroup.co.in/small_biogas.html).
- [14] Biotech, „Domestic Biogas,” Biotech, 17 03 2014. [Online]. Available: [http://www.biotech-india.org/Domestic\\_Biogas.aspx](http://www.biotech-india.org/Domestic_Biogas.aspx).
- [15] S. Bosmans, „Product design en ontwikkeling van een Biogasinstallatie voor thuisgebruik,” U Hasselt, Diepenbeek, 2014.
- [16] J. Czech, Interviewee, *Gasanalyse*. [Interview]. 26 2 20.
- [17] Vreg, „Evolutie elektriciteits- en aardgasprijzen (incl. btw) voor,” Vreg, [Online]. Available: [http://www.vreg.be/sites/default/files/uploads/16042014\\_huishoudelijk.pdf](http://www.vreg.be/sites/default/files/uploads/16042014_huishoudelijk.pdf).



# Bijlagen

Bijlage A: Biogasinstallatie Biotech.....	67
Bijlage B: Datasheets sensoren.....	68

## Bijlage A: Biogasinstallatie Biotech

# BIOTECH INDIA

## Cooking gas from kitchen waste

### PORTABLE BIO GAS PLANTS



Using Bio-methanisation technology all domestic Bio Wastes including organic wastewater can be treated hygienically. The research wing of BIOTECH has developed different models of prefabricated domestic bio waste treatment plants.





The space required for an one Cum domestic plant is one square metre only. Time required for the installation is 4 hours. The gas generated from the waste of a 5 member family is sufficient for 2 hrs. cooking everyday.



**\*Different models  
\*50 % energy savings**





**Return on investment  
in 24 months**

**TECHNOLOGY:** - The easily degradable waste materials mixed with organic wastewater from the kitchen is fed into the plant through its inlet chamber. This waste is converted into bio gas and organic fertilizer with the help of special type of anaerobic microbes.. The main component of this gas is methane which is a non-conventional source of energy - a very good cooking fuel. Generation of cooking gas at household level helps to overcome fuel crisis to a great extent .This also prevents the tendency of throwing the wastes in public places.

*For more details*  
 Log on : [www.biotech-india.org](http://www.biotech-india.org)  
 Email : [biotechindia@eth.net](mailto:biotechindia@eth.net)



**BIOTECH**  
 CENTRE FOR DEVELOPMENT OF BIOGAS TECHNOLOGY  
 AND OTHER NON-CONVENTIONAL ENERGY SCIENCES  
 Post Box. No. 520, M.P. Assan Road, Veshufalacaud  
 Thycud P.O., Thiruvandrum- 685 014, Kerala, S.India  
 Ph : 8471- 2321809, 2332179 Tele Fax : 8471-2331889  
 Email: [biotechindia@eth.net](mailto:biotechindia@eth.net), Web: [www.biotech-india.org](http://www.biotech-india.org)

**Helpline : 9446000960, 9446000961, 9446000962**

Bijlage B: Datasheets sensoren

PT100



Temperature Measurement

Technical Data Sheet

TD-TV/PT1A

PT100 Resistance Table

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	°C
-200.00	18.52										-200.00
-190.00	22.83	22.40	21.97	21.54	21.11	20.68	20.25	19.82	19.38	18.95	-190.00
-180.00	27.10	26.67	26.24	25.82	25.39	24.97	24.54	24.11	23.68	23.25	-180.00
-170.00	31.34	30.91	30.49	30.07	29.64	29.22	28.80	28.37	27.95	27.52	-170.00
-160.00	35.54	35.12	34.70	34.28	33.86	33.44	33.02	32.60	32.18	31.76	-160.00
-150.00	39.72	39.31	38.89	38.47	38.05	37.64	37.22	36.80	36.38	35.96	-150.00
-140.00	43.88	43.46	43.05	42.63	42.22	41.80	41.39	40.97	40.56	40.14	-140.00
-130.00	48.00	47.59	47.18	46.77	46.36	45.94	45.53	45.12	44.70	44.29	-130.00
-120.00	52.11	51.70	51.29	50.88	50.47	50.06	49.65	49.24	48.83	48.42	-120.00
-110.00	56.19	55.79	55.38	54.97	54.56	54.15	53.75	53.34	52.93	52.52	-110.00
-100.00	60.26	59.85	59.44	59.04	58.63	58.23	57.82	57.41	57.01	56.60	-100.00
-90.00	64.30	63.90	63.49	63.09	62.68	62.28	61.88	61.47	61.07	60.66	-90.00
-80.00	68.33	67.92	67.52	67.12	66.72	66.31	65.91	65.51	65.11	64.70	-80.00
-70.00	72.33	71.93	71.53	71.13	70.73	70.33	69.93	69.53	69.13	68.73	-70.00
-60.00	76.33	75.93	75.53	75.13	74.73	74.33	73.93	73.53	73.13	72.73	-60.00
-50.00	80.31	79.91	79.51	79.11	78.72	78.32	77.92	77.52	77.12	76.73	-50.00
-40.00	84.27	83.87	83.48	83.08	82.69	82.29	81.89	81.50	81.10	80.70	-40.00
-30.00	88.22	87.83	87.43	87.04	86.64	86.25	85.85	85.46	85.06	84.67	-30.00
-20.00	92.16	91.77	91.37	90.98	90.59	90.19	89.80	89.40	89.01	88.62	-20.00
-10.00	96.09	95.69	95.30	94.91	94.52	94.12	93.73	93.34	92.95	92.55	-10.00
0.00	100.00	99.61	99.22	98.83	98.44	98.04	97.65	97.26	96.87	96.48	0.00
0.00	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51	0.00
10.00	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.40	10.00
20.00	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.73	110.12	110.51	110.90	111.29	20.00
30.00	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.15	30.00
40.00	115.54	115.93	116.31	116.70	117.08	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01	40.00
50.00	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.47	122.86	50.00
60.00	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69	60.00
70.00	127.08	127.46	127.84	128.22	128.61	128.99	129.37	129.75	130.13	130.52	70.00
80.00	130.90	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.57	133.95	134.33	80.00
90.00	134.71	135.09	135.47	135.85	136.23	136.61	136.99	137.37	137.75	138.13	90.00
100.00	138.51	138.88	139.26	139.64	140.02	140.40	140.78	141.16	141.54	141.91	100.00
110.00	142.29	142.67	143.05	143.43	143.80	144.18	144.56	144.94	145.31	145.69	110.00
120.00	146.07	146.44	146.82	147.20	147.57	147.95	148.33	148.70	149.08	149.46	120.00
130.00	149.83	150.21	150.58	150.96	151.33	151.71	152.08	152.46	152.83	153.21	130.00
140.00	153.58	153.96	154.33	154.71	155.08	155.46	155.83	156.20	156.58	156.95	140.00
150.00	157.33	157.70	158.07	158.45	158.82	159.19	159.56	159.94	160.31	160.68	150.00
160.00	161.05	161.43	161.80	162.17	162.54	162.91	163.29	163.66	164.03	164.40	160.00
170.00	164.77	165.14	165.51	165.89	166.26	166.63	167.00	167.37	167.74	168.11	170.00
180.00	168.48	168.85	169.22	169.59	169.96	170.33	170.70	171.07	171.43	171.80	180.00
190.00	172.17	172.54	172.91	173.28	173.65	174.02	174.38	174.75	175.12	175.49	190.00
200.00	175.86	176.22	176.59	176.96	177.33	177.69	178.06	178.43	178.79	179.16	200.00
210.00	179.53	179.89	180.26	180.63	180.99	181.36	181.72	182.09	182.46	182.82	210.00
220.00	183.19	183.55	183.92	184.28	184.65	185.01	185.38	185.74	186.11	186.47	220.00
230.00	186.84	187.20	187.56	187.93	188.29	188.66	189.02	189.38	189.75	190.11	230.00
240.00	190.47	190.84	191.20	191.56	191.92	192.29	192.65	193.01	193.37	193.74	240.00
250.00	194.10	194.46	194.82	195.18	195.55	195.91	196.27	196.63	196.99	197.35	250.00
260.00	197.71	198.07	198.43	198.79	199.15	199.51	199.87	200.23	200.59	200.95	260.00
270.00	201.31	201.67	202.03	202.39	202.75	203.11	203.47	203.83	204.19	204.55	270.00
280.00	204.90	205.26	205.62	205.98	206.34	206.70	207.05	207.41	207.77	208.13	280.00
290.00	208.48	208.84	209.20	209.56	209.91	210.27	210.63	210.98	211.34	211.70	290.00
300.00	212.05	212.41	212.76	213.12	213.48	213.83	214.19	214.54	214.90	215.25	300.00
310.00	215.61	215.96	216.32	216.67	217.03	217.38	217.74	218.09	218.44	218.80	310.00
320.00	219.15	219.51	219.86	220.21	220.57	220.92	221.27	221.63	221.98	222.33	320.00

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	°C
330.00	222.68	223.04	223.39	223.74	224.09	224.45	224.80	225.15	225.50	225.85	330.00
340.00	226.21	226.56	226.91	227.26	227.61	227.96	228.31	228.66	229.02	229.37	340.00
350.00	229.72	230.07	230.42	230.77	231.12	231.47	231.82	232.17	232.52	232.87	350.00
360.00	233.21	233.56	233.91	234.26	234.61	234.96	235.31	235.66	236.00	236.35	360.00
370.00	236.70	237.05	237.40	237.74	238.09	238.44	238.79	239.13	239.48	239.83	370.00
380.00	240.18	240.52	240.87	241.22	241.56	241.91	242.26	242.60	242.95	243.29	380.00
390.00	243.64	243.99	244.33	244.68	245.02	245.37	245.71	246.06	246.40	246.75	390.00
400.00	247.09	247.44	247.78	248.13	248.47	248.81	249.16	249.50	249.85	250.19	400.00
410.00	250.53	250.88	251.22	251.56	251.91	252.25	252.59	252.93	253.28	253.62	410.00
420.00	253.96	254.30	254.65	254.99	255.33	255.67	256.01	256.35	256.70	257.04	420.00
430.00	257.38	257.72	258.06	258.40	258.74	259.08	259.42	259.76	260.10	260.44	430.00
440.00	260.78	261.12	261.46	261.80	262.14	262.48	262.82	263.16	263.50	263.84	440.00
450.00	264.18	264.52	264.86	265.20	265.53	265.87	266.21	266.55	266.89	267.22	450.00
460.00	267.56	267.90	268.24	268.57	268.91	269.25	269.59	269.92	270.26	270.60	460.00
470.00	270.93	271.27	271.61	271.94	272.28	272.61	272.95	273.29	273.62	273.96	470.00
480.00	274.29	274.63	274.96	275.30	275.63	275.97	276.30	276.64	276.97	277.31	480.00
490.00	277.64	277.98	278.31	278.64	278.98	279.31	279.64	279.98	280.31	280.64	490.00
500.00	280.98	281.31	281.64	281.98	282.31	282.64	282.97	283.31	283.64	283.97	500.00
510.00	284.30	284.63	284.97	285.30	285.63	285.96	286.29	286.62	286.95	287.29	510.00
520.00	287.62	287.95	288.28	288.61	288.94	289.27	289.60	289.93	290.26	290.59	520.00
530.00	290.92	291.25	291.58	291.91	292.24	292.56	292.89	293.22	293.55	293.88	530.00
540.00	294.21	294.54	294.86	295.19	295.52	295.85	296.18	296.50	296.83	297.16	540.00
550.00	297.49	297.81	298.14	298.47	298.80	299.12	299.45	299.78	300.10	300.43	550.00
560.00	300.75	301.08	301.41	301.73	302.06	302.38	302.71	303.03	303.36	303.69	560.00
570.00	304.01	304.34	304.66	304.98	305.31	305.63	305.96	306.28	306.61	306.93	570.00
580.00	307.25	307.58	307.90	308.23	308.55	308.87	309.20	309.52	309.84	310.16	580.00
590.00	310.49	310.81	311.13	311.45	311.78	312.10	312.42	312.74	313.06	313.39	590.00
600.00	313.71	314.03	314.35	314.67	314.99	315.31	315.64	315.96	316.28	316.60	600.00
610.00	316.92	317.24	317.56	317.88	318.20	318.52	318.84	319.16	319.48	319.80	610.00
620.00	320.12	320.43	320.75	321.07	321.39	321.71	322.03	322.35	322.67	322.98	620.00
630.00	323.30	323.62	323.94	324.26	324.57	324.89	325.21	325.53	325.84	326.16	630.00
640.00	326.48	326.79	327.11	327.43	327.74	328.06	328.38	328.69	329.01	329.32	640.00
650.00	329.64	329.96	330.27	330.59	330.90	331.22	331.53	331.85	332.16	332.48	650.00
660.00	332.79	333.11	333.42	333.74	334.05	334.36	334.68	334.99	335.31	335.62	660.00
670.00	335.93	336.25	336.56	336.87	337.18	337.50	337.81	338.12	338.44	338.75	670.00
680.00	339.06	339.37	339.69	340.00	340.31	340.62	340.93	341.24	341.56	341.87	680.00
690.00	342.18	342.49	342.80	343.11	343.42	343.73	344.04	344.35	344.66	344.97	690.00
700.00	345.28	345.59	345.90	346.21	346.52	346.83	347.14	347.45	347.76	348.07	700.00
710.00	348.38	348.69	348.99	349.30	349.61	349.92	350.23	350.54	350.84	351.15	710.00
720.00	351.46	351.77	352.08	352.38	352.69	353.00	353.30	353.61	353.92	354.22	720.00
730.00	354.53	354.84	355.14	355.45	355.76	356.06	356.37	356.67	356.98	357.28	730.00
740.00	357.59	357.90	358.20	358.51	358.81	359.12	359.42	359.72	360.03	360.33	740.00
750.00	360.64	360.94	361.25	361.55	361.85	362.16	362.46	362.76	363.07	363.37	750.00
760.00	363.67	363.98	364.28	364.58	364.89	365.19	365.49	365.79	366.10	366.40	760.00
770.00	366.70	367.00	367.30	367.60	367.91	368.21	368.51	368.81	369.11	369.41	770.00
780.00	369.71	370.01	370.31	370.61	370.91	371.21	371.51	371.81	372.11	372.41	780.00
790.00	372.71	373.01	373.31	373.61	373.91	374.21	374.51	374.81	375.11	375.41	790.00
800.00	375.70	376.00	376.30	376.60	376.90	377.19	377.49	377.79	378.09	378.39	800.00
810.00	378.68	378.98	379.28	379.57	379.87	380.17	380.46	380.76	381.06	381.35	810.00
820.00	381.65	381.95	382.24	382.54	382.83	383.13	383.42	383.72	384.01	384.31	820.00
830.00	384.60	384.90	385.19	385.49	385.78	386.08	386.37	386.67	386.96	387.25	830.00
840.00	387.55	387.84	388.14	388.43	388.72	389.02	389.31	389.60	389.90	390.19	840.00
850.00	390.48										850.00

**Thermocouple Instruments Limited**  
 Pontygwindy Road, Caerphilly, CF83 2WJ, UK  
 Tel: (+44) 029 20807400 Fax: (+44) 029 20807410  
 Internet: <http://www.thermocouple.co.uk>  
 E-mail: [enquiries@thermocouple.co.uk](mailto:enquiries@thermocouple.co.uk)

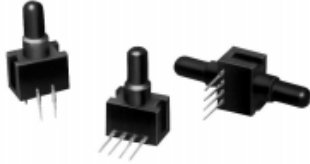
All Rights Reserved. © Copyright 1999 Thermocouple Instruments Ltd. Iss. 01

# Pressure Sensors

## Gage and Differential/Unamplified-Noncompensated

24PC Series

### Basic Sensors



### FEATURES

- Miniature package
- Variety of gage pressure port configurations - easily and quickly modified for your special needs
- Operable after exposure to frozen conditions
- Ideal for wet/wet differential applications
- Choice of termination for gage sensors
- 2 mA constant current excitation significantly reduces sensitivity shift over temperature\*
- Can be used to measure vacuum or positive pressure

### 24PC SERIES PERFORMANCE CHARACTERISTICS at 10.0 ±0.01 VDC Excitation, 25°C

	Min.	Typ.	Max.	Units
Excitation	---	10	12	VDC
Null Offset	-30	0	+30	mV
Null Shift, 25° to 0°, 25° to 50°C	---	±2.0	---	mV
Linearity, P2 > P1, BFSL	---	±0.25	±1.0	%Span
Span Shift, 25° to 0°, 25° to 50°C	---	±5.0*	---	%Span
Repeatability & Hysteresis	---	±0.15	---	%Span
Response Time	---	---	1.0	msec
Input Resistance	4.0 K	5.0 K	6.0 K	ohms
Output Resistance	4.0 K	5.0 K	6.0 K	ohms
Stability over One Year	---	±0.5	---	%Span
Weight	---	2	---	grams

### ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS

Operating Temperature	-40° to +85°C (-40° to +185°F)
Storage Temperature	-55° to +100°C (-67° to +212°F)
Shock	Qualification tested to 150 g
Vibration	Qualification tested to 0 to 2 kHz, 20 g sine
Media (P1 & P2)	Limited only to those media which will not attack polyetherimide, silicon, fluorosilicone, silicone, EPDM and neoprene seals.

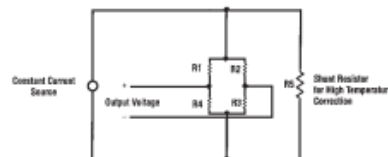
### 24PC SERIES ORDER GUIDE

Catalog Listing	Pressure Range psi	Span, mV			Sensitivity mV/psi Typ.	Overpressure psi Max.
		Min.	Typ.	Max.		
24PCE Type	0.5	24	35	46	70	20
24PCA Type	1.0	30	45	60	45	20
24PCB Type	5.0	85	115	145	23	20
24PCC Type	15	165	225	285	15	45
24PCD Type	30	240	330	420	11	60
24PCF Type	100	156	225	294	2.25	200
24PCG Type	250	145	212	280	0.85	500

\* Non-compensated pressure sensors, excited by constant current instead of voltage, exhibit temperature compensation of Span. Application Note #1 briefly discusses current excitation.

Constant current excitation has an additional benefit of temperature measurement. When driven by a constant current source, a silicon pressure sensor's terminal voltage will rise with increased temperature. The rise in voltage not only compensates the Span, but is also an indication of die temperature.

### Constant Current Excitation Schematic



Unamplified

# Pressure Sensors

## Gage and Differential/Unamplified-Noncompensated

24PC Series

### SENSOR SELECTION GUIDE

2 Product Family	4 Circuit Type	PC Pressure Transducer	A Pressure Range	F* Type of Seal	A Type of Port	2 Termination Style	G Pressure Measurement
2 20PC family	4 Noncom- pensated		A 1 psi B 5 psi C 15 psi D 30 psi E 0.5 psi F 100 psi G 250 psi	E EPDM F Fluorosilicone N Neoprene S Silicone	A Straight B Barbed C Luer D Modular H M5 Thread I 90° Port J Needle K Reverse 98 Port L 1/4 - 28 UNF w/Cable Lock M 1/4 - 28 UNF w/o Cable Lock S Manifold	1 1 x 4 (.400") 2 2 x 2 6 1 x 4 (.600")	G Gage D Differential

**Example:** 24PCFA2G

Standard, non-compensated 1 psi sensor with fluorosilicone seal, straight port, 2 x 2 terminals, and Gage pressure measurement.

\*Other media seal materials may be available.

See **Accessory Guide**, page 27.

Not all combinations are established. Contact 800 number before final design.



## DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer

### DESCRIPTION

The DS18B20 digital thermometer provides 9-bit to 12-bit Celsius temperature measurements and has an alarm function with nonvolatile user-programmable upper and lower trigger points. The DS18B20 communicates over a 1-Wire bus that by definition requires only one data line (and ground) for communication with a central microprocessor. It has an operating temperature range of -55°C to +125°C and is accurate to ±0.5°C over the range of -10°C to +85°C. In addition, the DS18B20 can derive power directly from the data line (“parasite power”), eliminating the need for an external power supply.

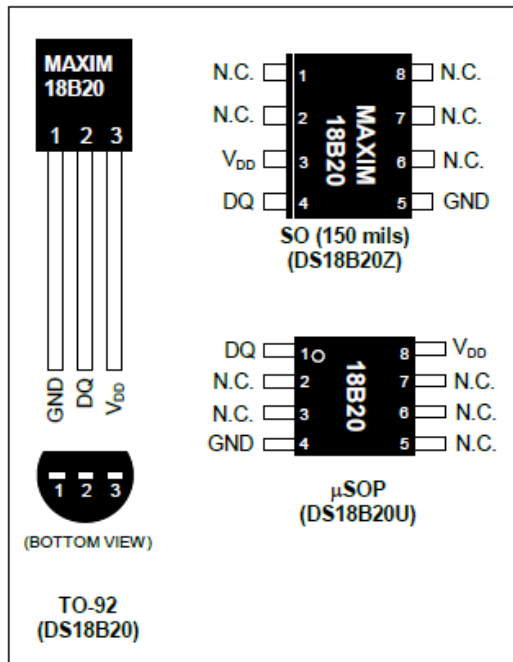
Each DS18B20 has a unique 64-bit serial code, which allows multiple DS18B20s to function on the same 1-Wire bus. Thus, it is simple to use one microprocessor to control many DS18B20s distributed over a large area. Applications that can benefit from this feature include HVAC environmental controls, temperature monitoring systems inside buildings, equipment, or machinery, and process monitoring and control systems.

### FEATURES

- Unique 1-Wire® Interface Requires Only One Port Pin for Communication
- Each Device has a Unique 64-Bit Serial Code Stored in an On-Board ROM
- Multidrop Capability Simplifies Distributed Temperature-Sensing Applications
- Requires No External Components
- Can Be Powered from Data Line; Power Supply Range is 3.0V to 5.5V
- Measures Temperatures from -55°C to +125°C (-67°F to +257°F)
- ±0.5°C Accuracy from -10°C to +85°C
- Thermometer Resolution is User Selectable from 9 to 12 Bits
- Converts Temperature to 12-Bit Digital Word in 750ms (Max)

- User-Definable Nonvolatile (NV) Alarm Settings
- Alarm Search Command Identifies and Addresses Devices Whose Temperature is Outside Programmed Limits (Temperature Alarm Condition)
- Available in 8-Pin SO (150 mils), 8-Pin  $\mu$ SOP, and 3-Pin TO-92 Packages
- Software Compatible with the DS1822
- Applications Include Thermostatic Controls, Industrial Systems, Consumer Products, Thermometers, or Any Thermally Sensitive System

### PIN CONFIGURATIONS



1-Wire is a registered trademark of Maxim Integrated Products, Inc.

For pricing, delivery, and ordering information, please contact Maxim Direct at 1-888-629-4642, or visit Maxim's website at [www.maximintegrated.com](http://www.maximintegrated.com).

REV: 042208



**TruStability®**  
**Silicon Pressure Sensors:**  
**SSC Series—Standard Accuracy**  
**±2% Total Error Band,**  
**Amplified Compensated Digital Output,**  
**1 psi to 150 psi (60 mbar to 10 bar)**



**DESCRIPTION**

The TruStability® Standard Accuracy Silicon Ceramic (SSC) Series is a piezoresistive silicon pressure sensor offering a digital output for reading pressure over the specified full scale pressure span and temperature range.

The SSC Series is fully calibrated and temperature compensated for sensor offset, sensitivity, temperature effects, and non-linearity using an on-board Application Specific Integrated Circuit (ASIC). Calibrated output values for pressure are updated at approximately 2 kHz.

The SSC Series is calibrated over the temperature range of -20 °C to 85 °C [-4 °F to 185 °F]. The sensor is characterized for operation from a single power supply of either 3.3 Vdc or 5.0 Vdc.

These sensors measure absolute, differential, and gage pressures. The absolute versions have an internal vacuum reference and an output value proportional to absolute pressure. Differential versions allow application of pressure to either side of the sensing diaphragm. Gage versions are referenced to atmospheric pressure and provide an output proportional to pressure variations from atmosphere.

The TruStability® pressure sensors are intended for use with non-corrosive, non-ionic gases, such as air and other dry gases. An available option extends the performance of these sensors to non-corrosive, non-ionic liquids.

All products are designed and manufactured according to ISO 9001 standards.

**FEATURES**

- Industry-leading long-term stability
- Extremely tight accuracy of ±0.25% FSS BFSL (Full Scale Span Best Fit Straight Line)
- Total error band of ±2% full scale span maximum
- Modular and flexible design offers customers a variety of package styles and options, all with the same industry-leading performance specifications
- Miniature 10 mm x 10 mm [0.39 in x 0.39 in] package
- Low operating voltage
- Extremely low power consumption
- I<sup>2</sup>C- or SPI- compatible 14-bit digital output (min. 12-bit sensor resolution)
- Precision ASIC conditioning and temperature compensated over -20 °C to 85 °C [-4 °F to 185 °F] temperature range
- RoHS compliant
- Virtually insensitive to mounting orientation
- Internal diagnostic functions increase system reliability
- Also available with analog output
- Absolute, differential, and gage types
- Pressure ranges from 1 psi to 150 psi (60 mbar to 10 bar)
- Custom calibration available
- Various pressure port options
- Liquid media option

## TruStability® Silicon Pressure Sensors: SSC Series–High Accuracy

### POTENTIAL APPLICATIONS

- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Medical:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Airflow monitors</li> <li>- Anesthesia machines</li> <li>- Blood analysis machines</li> <li>- Gas chromatography</li> <li>- Gas flow instrumentation</li> <li>- Kidney dialysis machines</li> <li>- Oxygen concentrators</li> <li>- Pneumatic controls</li> <li>- Respiratory machines</li> <li>- Sleep apnea equipment</li> <li>- Ventilators</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Industrial:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Barometry</li> <li>- Flow calibrators</li> <li>- Gas chromatography</li> <li>- Gas flow instrumentation</li> <li>- HVAC</li> <li>- Life sciences</li> <li>- Pneumatic controls</li> </ul> </li> </ul> |
|---|--|

**Table 1. Absolute Maximum Ratings<sup>1</sup>**

Parameter	Min.	Max.	Unit
Supply voltage ( $V_{\text{supply}}$ )	-0.3	6.0	Vdc
Voltage on any pin	-0.3	$V_{\text{supply}} + 0.3$	V
Digital interface clock frequency:			
I <sup>2</sup> C	100	400	kHz
SPI	50	800	
ESD susceptibility (human body model)	3	-	kV
Storage temperature	-40 [-40]	85 [185]	°C [°F]
Soldering time and temperature:			
Lead solder (SIP, DIP)	4 s max. at 250 °C [482 °F]		
Peak reflow (SMT)	15 s max. at 250 °C [482 °F]		

**Table 2. Operating Specifications**

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
Supply voltage ( $V_{\text{supply}}$ ) <sup>2</sup> :				Vdc
3.3 Vdc	3.0	3.3 <sup>3</sup>	3.6	
5.0 Vdc	4.75	5.0 <sup>3</sup>	5.25	
<i>Sensors are either 3.3 Vdc or 5.0 Vdc based on listing selected.</i>				
Supply current:				mA
3.3 Vdc supply	-	1.6	2.1	
5.0 Vdc supply	-	2	3	
Compensated temperature range <sup>4</sup>	-20 [-4]	-	85 [185]	°C [°F]
Operating temperature range <sup>5</sup>	-40 [-40]	-	85 [185]	°C [°F]
Startup time (power up to data ready)	-	2.8	7.3	ms
Response time	-	0.46	-	ms
I <sup>2</sup> C voltage level low	-	-	0.2	$V_{\text{supply}}$
I <sup>2</sup> C voltage level high	0.8	-	-	$V_{\text{supply}}$
Pull up on SDA and SCL	1	-	-	kOhm
Accuracy <sup>6</sup>	-	-	±0.25	%FSS BFLS
Total error band <sup>7</sup>	-	-	±2	%FSS <sup>8</sup>
Output resolution	12	-	-	bits