

2013•2014  
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN  
*master in de industriële wetenschappen: elektronica-ICT*

## Masterproef

Product design en ontwikkeling van een Biogasinstallatie voor thuisgebruik

Promotor :  
ing. Frank APPAERTS

Promotor :  
Prof. dr. ir. WIM DEFERME

Sebastiaan Bosmans

*Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektronica-ICT*

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

2013•2014

Faculteit Industriële

ingenieurswetenschappen

*master in de industriële wetenschappen: elektronica-ICT*

## Masterproef

Product design en ontwikkeling van een Biogasinstallatie  
voor thuisgebruik

Promotor :  
ing. Frank APPAERTS

Promotor :  
Prof. dr. ir. WIM DEFERME

Sebastiaan Bosmans

*Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële  
wetenschappen: elektronica-ICT*

## Voorwoord

Na vier jaar studeren en kennis opdoen, is deze thesis een afsluiting van een zeer boeiende periode. Ik had het geluk dat ik deze periode kon samenwerken met twee fijne medestudenten elektro-mechanica, namelijk Pieter Brebels en Bram Van de Kerkhof. Ik wil hun bedanken voor de bouw van de vergister en het altijd streven naar verbeteringen in de biogasinstallatie. Doorheen het jaar hebben we een band met elkaar gesmeed.

Graag zou ik ook mijn promotoren willen bedanken voor het tot stand komen van deze thesis. Frank Appaerts wil ik bedanken voor zijn raad en nieuwe inzichten die hij me bijbracht. De opbouwende kritiek die hij gaf dwong mij verder in de juiste richting. Ook Wim Deferme wil ik bedanken voor zijn altijd aanstekelijk positieve ingesteldheid en het geduld waarmee hij mij begeleidde. Zijn ideeën en tips gaven ons een nieuwe kijk op het project. De vrijheid die hij ons gaf was van onschatbare waarde voor het slagen van dit project.

De gebruikte mest was afkomstig van Willem Theuwis. Ik wil hem ervoor bedanken dat hij altijd bereid was om ons te voorzien van verse mest in weer in wind. Ook de uiteenzetting van de werking van zijn biogasinstallatie was een meerwaarde aan de thesis. Bedankt Willem.

Voor de gasanalyses konden we altijd rekenen op de expertise van Jan Czech van de U Hasselt. Soms wilde de analyse niet lukken maar hij gaf nooit op en wilde altijd de perfecte meting uitvoeren. Hierbij had hij telkens een zee van geduld om ons voort te helpen.

Het bezoek aan het Varkens Innovatie Centrum gelegen te Sterksel in Nederland gaf ons een klare kijk op de problemen die we gingen tegen komen tijdens het jaar. Ik dank hun voor het delen van hun ervaring in biogasinstallaties en de leerrijke rondleiding.

Ook Banden de Condé gelegen te Hechtel verdient een woordje van dank. Bij hun konden we gratis de binnenbanden gaan halen die ons uit de nood hielpen. Naarmate de gasproductie toenam konden wij bij hun terecht voor binnenbanden, bedankt daarvoor.

Als laatste wil ik ook de mensen bedanken die mij altijd hebben gesteund gedurende het jaar. Speciaal wil ik mijn vriendin bedanken die mij heeft bijgestaan met raad en daad tijdens het schrijven van de thesis.

Sebastiaan Bosmans

Juni 2014



# Inhoud

|  |      |
|--|------|
| Voorwoord .....                          | I    |
| Lijst van afkortingen en symbolen .....  | V    |
| Lijst van figuren .....                  | VII  |
| Lijst van tabellen.....                  | IX   |
| Abstract .....                           | XI   |
| Summary .....                            | XIII |
| Inleiding.....                           | 1    |
| Motivering.....                          | 1    |
| Probleemstelling.....                    | 1    |
| Doelstelling.....                        | 2    |
| Methode.....                             | 2    |
| 1    Literatuurstudie.....               | 3    |
| 1.1    Anaerobe vergisting .....         | 3    |
| 1.2    Sensor interface.....             | 5    |
| 1.2.1    Sensoren .....                  | 5    |
| 1.2.2    Controller.....                 | 6    |
| 1.2.3    Relais.....                     | 9    |
| 1.2.4    Verwarmingslint .....           | 9    |
| 1.3    KWh meter .....                   | 9    |
| 1.4    Toepassing biogas.....            | 10   |
| 2    Materialen en methode .....         | 13   |
| 2.1    Voeding.....                      | 13   |
| 2.2    Digestaat.....                    | 14   |
| 2.3    Gasopvang .....                   | 15   |
| 2.4    Verwarmingselement .....          | 16   |
| 2.5    Menger .....                      | 17   |
| 2.6    Energie verbruik .....            | 17   |
| 2.7    Regelsysteem.....                 | 17   |
| 2.7.1    Problemen .....                 | 20   |
| 2.8    Geoptimaliseerd regelsysteem..... | 22   |
| 2.8.1    Sensoren .....                  | 22   |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.8.2 | Software .....                                | 27 |
| 3     | Onderzoeksresultaten en discussie .....       | 31 |
| 3.1   | Temperatuursverloop.....                      | 31 |
| 3.2   | Gasopbrengst .....                            | 35 |
| 3.3   | Kwaliteit.....                                | 37 |
| 3.4   | Kosten-batenanalyse .....                     | 38 |
| 4     | Conclusie .....                               | 41 |
|       | Appendix A: Datasheet temperatuursensor ..... | 43 |
|       | Appendix B: Datasheet druksensor .....        | 45 |
|       | Referenties .....                             | 47 |

## Lijst van afkortingen en symbolen

|                  |   |
|------------------|---|
| ACK              | Bevestiging                                   |
| ADC              | Analoog digitaal converter                    |
| ADP              | Adenosinedifosfaat                            |
| ASIC             | Applicatiespecifieke geïntegreerde schakeling |
| ATP              | Adenosinetrifosfaat                           |
| EGR              | Uitlaatgasrecirculatie                        |
| GPIO             | General-purpose input/output                  |
| GPU              | Graphics processing unit                      |
| Hex              | Hexadecimaal                                  |
| I2C              | Inter-ic-bus                                  |
| IC               | Geïntegreerde schakeling                      |
| NAD <sup>+</sup> | Nicotinamide adenine dinucleotide             |
| NADH             | Nicotinamideadeninedinucleotide               |
| opamp            | Operationele versterker                       |
| OS               | Besturingssysteem                             |
| pH               | Zuurtegraad                                   |
| SCL              | Kloklijn                                      |
| SDA              | Datalijn                                      |
| SMbus            | System Management Bus                         |





## Lijst van figuren

|   |    |
|---|----|
| Figuur 1: Kleine biogasinstallatie in India [1] .....                     | 1  |
| Figuur 2: Overzicht anaeroob vergistingsproces .....                      | 3  |
| Figuur 3: Honeywell 24PCAFA6G druksensor [8] .....                        | 5  |
| Figuur 4: Arduino Uno [5] .....   | 6  |
| Figuur 5: Raspberry Pi [6] .....  | 8  |
| Figuur 6: Electrothermal MC227 [11] .....                                 | 9  |
| Figuur 7: Smart circuit 20 kWh meter [12] .....                           | 10 |
| Figuur 8: DualFuel compressiekamer [15] .....                             | 10 |
| Figuur 9: Doorsnede vergistervat [16] .....                               | 13 |
| Figuur 10: Gaszakken met een gecombineerd volume van 50 liter .....       | 15 |
| Figuur 11: Binnenbanden met een gecombineerd volume van 1000 liter .....  | 15 |
| Figuur 12: Spiraalvormige alpeX buis op de bodem van het vat .....        | 16 |
| Figuur 13: Vergistervat met isolatie .....                                | 16 |
| Figuur 14: Analoge kilowattuur-meter .....                                | 17 |
| Figuur 15: Schema regelsysteem .....                                      | 18 |
| Figuur 16: laptop met Java-applicatie .....                               | 19 |
| Figuur 17: Schema geoptimaliseerd regelsysteem .....                      | 22 |
| Figuur 18: DSB18B20temperatuursensor in RVS huls [17] .....               | 23 |
| Figuur 19: Tijd weergaven van de initialisatiefase[19] .....              | 24 |
| Figuur 20: Pakket samenstelling met druk- en temperatuur -data[20]. ..... | 25 |
| Figuur 21: Uitbreidingskaart met flatkabel .....                          | 26 |
| Figuur 22: Biogasinstallatie met geoptimaliseerd regelsysteem .....       | 27 |
| Figuur 23: Virtueel bestand one-wire temperatuursensor .....              | 27 |
| Figuur 24: Temperatuur verloop biogasinstallatie .....                    | 31 |
| Figuur 25: Schema glucose omzetting naar ethanol [21] .....               | 32 |
| Figuur 26: Temperatuur en druk verloop biogasinstallatie .....            | 33 |
| Figuur 27: Gasopbrengst biogasinstallatie .....                           | 35 |
| Figuur 28: Voedingpatroon biogasinstallatie .....                         | 36 |



## **Lijst van tabellen**

|  |    |
|--|----|
| Tabel 1: Kalibratiewaarden van de druksensor .....         | 28 |
| Tabel 2: Methaangehalte van het geproduceerde biogas ..... | 37 |
| Tabel 3: Gemiddelde methaangehalte biogas.....             | 37 |
| Tabel 4: Kostprijs biogasinstallatie .....                 | 38 |



## **Abstract**

Op de particuliere markt is er veel interesse om actief in duurzame energieproductie te participeren. Gebruik van biomassa om energie te produceren is reeds zeer bekend door grote installaties bij industriële bedrijven en grote boerderijen. Kleine installaties voor particulier gebruik zijn in onze contreien echter niet gekend en de vraag is of deze installaties op kleine schaal efficiënt kunnen werken.

Het doel van dit onderzoek is daarom het ontwerpen van een particuliere biogasinstallatie die ondanks het klimaat in West-Europa toch een bruikbare efficiëntie haalt. De biogasinstallatie moet volledig automatisch kunnen werken zodat het vergistingsproces continu kan doorlopen. Deze masterproef omvat het optimaliseren van een werkende vergistingsinstallatie op huishoudschaal, inclusief de benodigde meet-, controle- en regeltechnieken. Een grote uitdaging is om de investerings- en operationele kosten te drukken voor huishoudtoepassingen.

Het automatiseren van de biogasinstallatie gebeurt op basis van een aantal continu te meten parameters zoals de temperatuur en de druk. We gebruiken voor de verwerking en uitlezing van de sensoren een singleboardcomputer (de Raspberry Pi). Aan de hand van de metingen zal de toevoeging van biomassa, het sturen van warmte in de installatie en het regelen van de interne druk kunnen gebeuren om een zo optimaal mogelijke werking van de installatie te voorzien.



## **Summary**

There is a lot of interest to participate in the production of sustainable energy on the private market. The use of biomass to produce energy is already well known in industrial and farming sector. These are commonly large biogas plants. Small biogas plants for private use are not known in our regions. It will be the question of these small plants are efficient enough on a small scale.

The purpose of this study is therefore to design a private plant that still has a useful efficiency despite the climate in Western Europe. The biogas plant must be able to work on a way so that the fermentation process can go through continuously. This master thesis includes optimizing a working digester at the house hold scale, including the required measurement and control techniques. A major challenge is to push the investment and operational costs for home use application.

The automation of the biogas installation is done on the basic of a number of continuously measured parameters such as the temperature and the pressure. For processing and readout of the sensors we use a single board computer (the Raspberry Pi). Based on the measurements it can send heat into the installation and can control the internal pressure to accomplish an optimal working of the plant.





## Inleiding

### Motivering

De aanleiding van deze masterproef vloeit voort uit de masterproef van Inge Verboven. In haar masterproef “Toepassing van anaerobe vergisting in Senegal “[2] werd er onderzoek gevoerd naar de bouw van een biogasinstallatie voor een schooltje in Warang. De biogasinstallatie moest de school voorzien van gas om mee te kunnen koken. Na het bouwen van de biogasinstallatie in Warang kwam Wim Deferme, de promotor van Inge, met de vraag of zo een kleinschalige biogasinstallatie ook mogelijk is in ons klimaat. Vervolgens ontstond de masterproef “Product design en ontwikkeling van een biogasinstallatie voor thuisgebruik”.

België heeft als doel tegen 2020 13% van het totale energieverbruik op te wekken met duurzame energiebronnen. Op industriële schaal wordt er al volop geïnvesteerd in duurzame energie, denk hierbij aan windmolenparken en biomassacentrales. Ook op de particuliere markt is er steeds meer interesse om duurzame energie op te wekken. De stijgende populariteit van zonnepanelen de afgelopen 5 jaar is hier een voorbeeld van. Energie opwekken uit biomassa bij particulieren is in België nog een onbekend gegeven.

### Probleemstelling

Kleine biogasinstallaties zijn al geruime tijd populair in delen van Azië en Afrika. Gezinnen gebruiken de kleine biogasinstallaties om hun keukenafval te verwerken en het geproduceerde gas wordt gebruikt voor te koken. In Figuur 1 is een biogasinstallatie uit India te zien.



Figuur 1: Kleine biogasinstallatie in India [1]

De populariteit van kleine biogasinstallaties in delen van Azië en Afrika is te wijten aan het warme klimaat. Er is geen extra warmte nodig om de biomassa op de juiste temperatuur te houden en zo een optimale vergisting te krijgen.

In Europa, waar het klimaat gematigd is zijn er grote biogasinstallaties in gebruik, vooral bij boeren die de mest van hun vee als biomassa voor de vergister gebruiken. Kleine installaties hebben een te laag

rendement in gematigd klimaat. Door de lage temperatuur verloopt het vergistingsproces niet ideaal. Om tot een betere gasopbrengst te komen van de kleine biogasinstallaties moet de biomassa worden verwarmd en op een ideale temperatuur worden gehouden. De toegevoegde warmte moet zo beperkt mogelijk blijven om de operationele kost van de vergister laag genoeg te houden en winst te bekomen.

## **Doelstelling**

De hoofddoelstelling van deze masterproef is tot een ontwerp komen van een kleine biogasinstallatie voor particulier gebruik. Daarboven moet de biogasinstallatie rendabel zijn in het gebruik en een hoog gebruikscomfort bieden door geautomatiseerd te worden. De te automatiseren aspecten zijn: de voeding van de biogasinstallatie, de regeling voor de temperatuur van de biomassa, parameters van de biogasinstallatie opslaan voor analyse en als laatste moet het gas worden omgezet in bruikbare energie.

## **Methode**

De masterproef is opgedeeld in verschillende delen. Eerst werd een literatuurstudie uitgevoerd. Vervolgens werd een opstelling van de biogasinstallatie gebouwd. Op deze installatie werden metingen verricht om het vergistingsproces te optimaliseren. Ten laatste werden de metingen geanalyseerd om een conclusie te vormen over de werking van de biogasinstallatie.

De literatuurstudie spits toe op de anaerobe vergisting en het regelsysteem. De verschillende fases van de anaerobe vergisting worden besproken samen met de eindproducten van de vergisting. Vervolgens worden verschillende aspecten van het regelsysteem besproken. Mogelijke sensoren en controllers komen aan bod.

In materiaal en methode wordt de opbouw van de biogasinstallatie besproken. De verschillende delen van de biogasinstallatie worden besproken. In de opbouw van het regelsysteem wordt er dieper op ingegaan omdat deze thesis specifiek gericht is op de elektroniekant van het project.

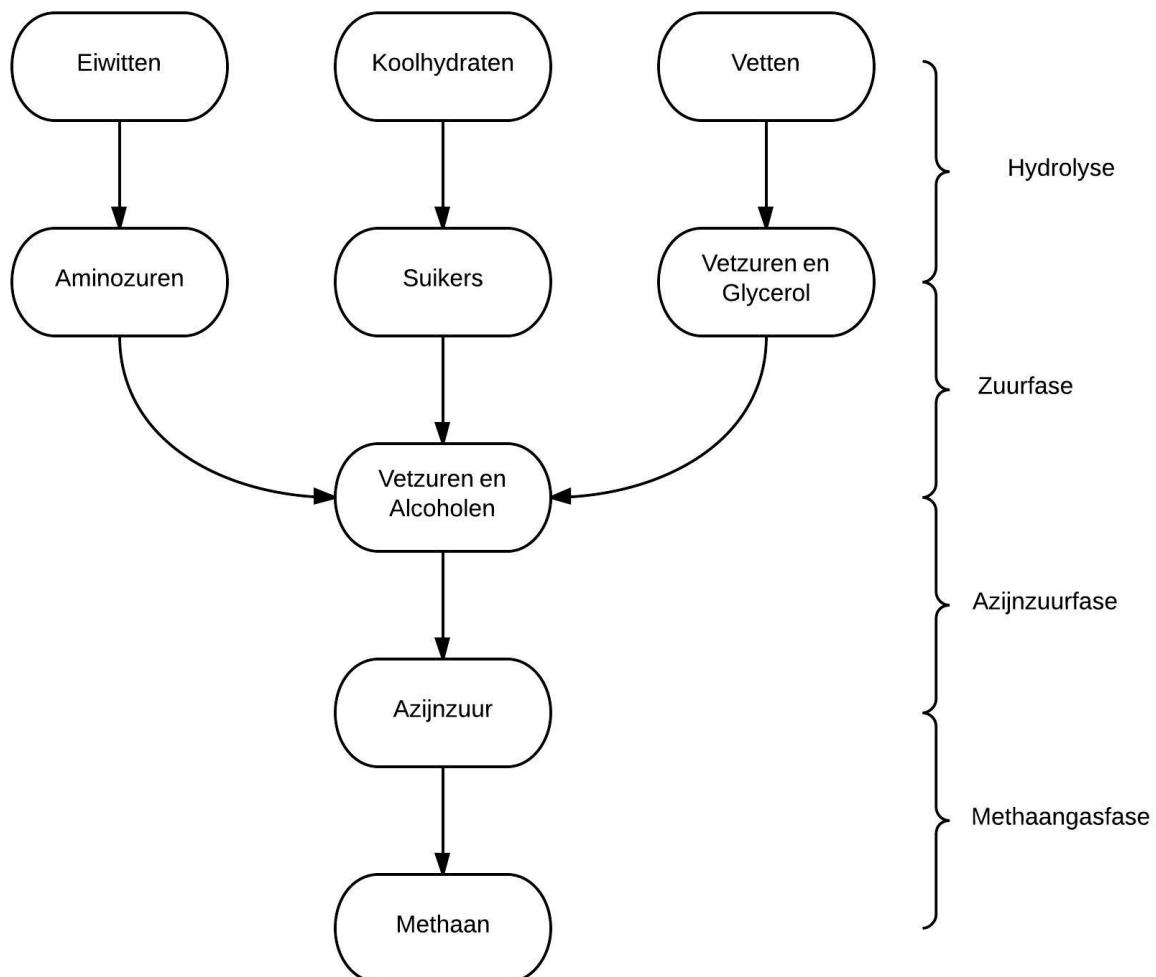
Tenslotte worden in resultaten en discussie de metingen geanalyseerd. De werking van de biogasinstallatie wordt onderzocht a.d.h.v. temperatuur en drukmetingen. De energieopbrengst van de biogasinstallatie wordt bepaald samen met de financiële haalbaarheid van de installatie.

# 1 Literatuurstudie

## 1.1 Anaerobe vergisting

Anaerobe vergisting gebeurt wanneer bacteriën organisch materiaal afbreken in een zuurstofloze omgeving. Als organisch materiaal kan biomassa worden gebruikt, bij het vergisten zal dan biogas ontstaan.

Het vergistingsproces verloopt in vier fazen zoals te zien in Figuur 2: hydrolyse, zuurfase, azijnzuurfase en methaangasfase. Tijdens de eerste fase vindt hydrolyse plaats: niet-oplosbare polymeren worden door bacteriën omgezet in oplosbare organische stoffen. Tijdens de zuurfase worden deze organische stoffen omgezet in vetzuren en alcoholen. Vervolgens worden in de azijnzuurfase de vetzuren en alcoholen omgezet in azijnzuur. In de laatste fase of methaangasfase wordt er methaan gevormd [2][3].

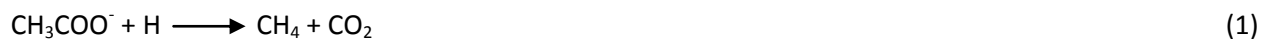


Figuur 2: Overzicht anaeroob vergistingsproces

Tijdens de hydrolysefase worden polymeren zoals koolhydraten en eiwitten omgezet in oplosbare oligomeren en monomeren. Polymeren zijn macromoleculen die moeten worden omgevormd tot oligomeren en monomeren anders kunnen ze niet worden opgenomen door bacteriën. De omzetting gebeurt door het inwerken van enzymen en water op de polymeren. De enzymen die de polymeren afbreken zijn afkomstig van bacteriën. De gevormde oligomeren en monomeren zijn afhankelijk van de afgebroken polymeren. Polysachariden (koolhydraten) worden omgezet in monosachariden (suiker) en eiwitten worden in de hydrolysefase omgezet in peptiden en aminozuren. Ook worden vetten omgezet in vetzuren en glycerol.

In de zuurfase worden organische verbindingen, zoals de eindproducten van de hydrolysefase, omgezet in zuurvormende verbindingen. Micro-organismen breken de organische verbindingen verder af in vetzuren (valeriaanzuur, boterzuur en propionzuur) en alcoholen (ethanol). Na de zuurfase volgt de azijnzuurfase. In deze fase worden de vetzuren en alcoholen omgezet in azijnzuur.

Het biogas wordt gevormd in de laatste fase, de methaangasfase. In deze fase wordt methaangas gevormd uit azijnzuur, koolstofdioxide en waterstof. De vorming van methaangas kan worden opgedeeld in twee mogelijke reacties. Bij reactievergelijking 1 wordt methaan gevormd uit azijnzuur en waterstof, samen met methaan komt er ook koolstofdioxide vrij.



De tweede mogelijkheid tot vorming van methaan is gebaseerd op reactievergelijking 2. Bij deze reactie wordt er met waterstof en koolstofdioxide methaan gevormd. Samen met het methaangas komt er ook water als eindproduct uit de reactievergelijking [3][4].



Na het anaerobe vergisten van organisch materiaal blijft er niet alleen methaan over maar ook het digestaat. Alles van de biomassa dat niet anaeroob kan worden vergist blijft in de vergister zitten en wordt samen met de eindproducten van de vergisting (buiten het methaangas) het digestaat genoemd. De samenstelling van het digestaat is sterk afhankelijk van de gebruikte biomassa voor de anaerobe vergisting. Door de vergisting van het organisch materiaal dat zich in de inputstroom bevindt, bevat het digestaat veel minder droge stof en organisch materiaal. De zware metalen (zink en koper) die aanwezig zijn in de inputstroom, zijn ook aanwezig in het digestaat. Maar doordat de concentratie aan droge stof in het digestaat afneemt t.o.v. in de inputstroom is de concentratie van zware metalen in het digestaat hoger. Doordat enkel de gemakkelijk afbreekbare organische stoffen tijdens de anaerobe vergisting worden afgebroken blijven complexe stoffen zoals lignine aanwezig in het digestaat. Lignine is een organisch materiaal dat aanwezig is in de celwand van cellen, het is het tweede meest voorkomende organisch materiaal op aarde. De lignine geeft het digestaat de meststofeigenschappen. Het digestaat kan dus worden gebruikt als bodemverbeteraar [4].

Dierlijk mest omzetten in methaangas met een biogasinstallatie wordt niet gezien als mestverwerking maar als mestbewerking. Bij mestbewerking valt het eindproduct nog altijd onder norm meststof. Wanneer het digestaat afkomstig is van een biogasinstallatie, die gevoed werd met dierlijk mest, valt het

digestaat onder de wetgeving van dierlijk mest. Als de biogasinstallatie uitsluitend gevoed is met organisch materiaal dat geen mest bevat, valt het digestaat onder de wetgeving van andere meststoffen[6]

## **1.2 Sensor interface**

### **1.2.1 Sensoren**

Om het gistingsproces te kunnen automatiseren moeten parameters worden gemeten. Er zijn drie factoren die een belangrijke rol spelen tijdens de vergisting. De temperatuur, druk en pH-waarde geven weer hoe de vergisting verloopt en of er wel degelijk gasvorming is. De gebruikte meetschakeling is afkomstig van de bachelorproef: "Sensor interfacing biogasinstallatie"[7].

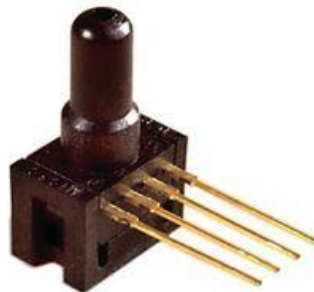
#### **1.2.1.1 Temperatuur**

Een mesofiele vergisting gebeurt bij een temperatuur tussen 20 en 40°C. Bij een temperatuur tussen 30 en 35°C is het rendement het hoogst.

Het circuit van de temperatuursensor geeft een recht evenredig verband tussen de temperatuur en de uitgangsspanning. Als temperatuursensor wordt er gebruik gemaakt van een pT100 in smd uitvoering. De pT100 staat bekend voor zijn lineair verloop in weerstandwaarden over een groot temperatuurbereik. De schakeling kan aan de hand van twee trimmers worden aangepast aan een bepaald temperatuurbereik. De maximale gewenste uitgangsspanning kan ook worden geregeld m.b.v. deze potentiometers [7].

#### **1.2.1.2 Druk**

De gebruikte druksensor is een Honeywell 24PCAFA6G niet-compenserende druksensor (Figuur 3). De sensor werkt op het principe van een Wheatstone-brug. Bij een drukverandering zullen de vier weerstanden van de Wheatstone-brug recht evenredig veranderen. Ook bij de analoge schakeling voor de druksensor kan m.b.v. potentiometers het bereik worden aangepast.



**Figuur 3: Honeywell 24PCAFA6G druksensor [8]**

De druksensor bevindt zich aan de bovenkant van de vergister en meet de druk van het geproduceerde biogas. Dit gas wordt afgevoerd naar gaszakken waar het gas wordt opgeslagen. Bij normale werking zal er nauwelijks een drukstijging zijn in de vergister. Pas wanneer de gaszakken zijn uitgezet tot hun volledig volume, is er een drukstijging in de vergister en in de gasleidingen.

### 1.2.1.3 Zuurtegraad

In de methaangasfase heeft de biomassa een pH-waarde rond 7,5. Wanneer de pH-waarde lager is en de biomassa dus zuurder is zal de gasproductie stilvallen. Omgekeerd zal een biomassa die meer basisch is geen invloed hebben op de gasproductie.

Om de zuurtegraad te meten wordt gebruik gemaakt van een pH-elektrode. De werking van een pH-elektrode berust op het aantal  $H^+$ -ionen in de te meten oplossing. Bij een zure oplossing zal de spanning gemeten aan de pH-elektrode positief zijn en een maximale grootte hebben van 0,355 volt. Een basische oplossing zal leiden tot een negatieve spanning met een maximum van -0,414 volt bij pH 14.

## 1.2.2 Controller

Het is noodzakelijk de analoge waarden om te zetten tot digitale waarden om de biogasinstallatie volledig automatisch te laten werken. De omzetting naar digitale waarden en de verwerking van de meetgegevens kan gebeuren met een microcontroller zoals de Arduino Uno, of met een single-board computer zoals de Raspberry Pi.

### 1.2.2.1 Arduino Uno

De Arduino is een microcontrollerbord met een ATmega328 controller. Deze controller, te zien in Figuur 4, beschikt over een klokfrequentie van 16MHz. De Arduino bestaat verder uit: een geheugen, ADC, veertien I/O-pinnen, een voltage regulator, zes analoge pinnen en een USB type B connector [7][9].



Figuur 4: Arduino Uno [5]

Het geheugen bestaat uit drie delen. 32kB waarvan 0,5 kB in gebruik is voor de bootloader, 2kB SRAM en 1kB EEPROM. De 32kB wordt gebruikt voor het opslaan van de programmeercode. De onboard-ADC heeft een goede nauwkeurigheid dankzij de 10 bits. Het meetbereik van de ADC ligt tussen de 0 en 5 volt. Eventueel kan het meetbereik beperkt worden tussen 0 en 3,3 volt. De ADC geeft een digitale waarde terug die tussen 0 en 1024 ligt. Zo wordt een meetnauwkeurigheid bekomen van 0,0048 volt (bij een meetbereik tussen 0 en 5 volt).

Elk van de veertien digitale pinnen werkt op 5 volt. De pinnen hebben een interne pull-up weerstand van 25 kOhm en kunnen een stroom leveren en afvoeren van 40mA. Zes van de veertien digitale I/O pinnen hebben een PWM output van 8 bits breed.

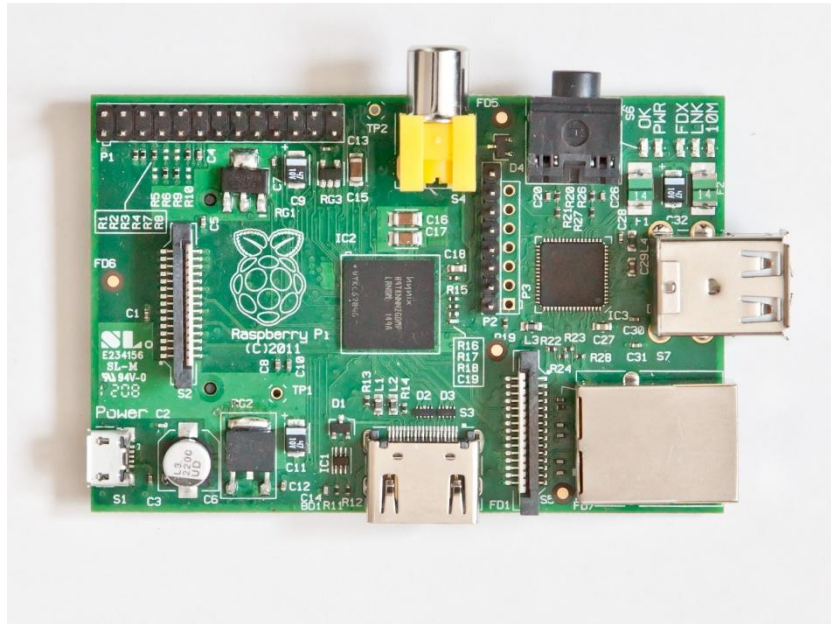
De Arduino kan gevoed worden via de USB-poort of via een externe voedingsbron. De Arduino heeft een resetbare zekering die de USB-poort van de computer beschermt. De externe voeding kan aangesloten worden via een 2.1mm jack of via de massa- en Vin-pinnen op het bord. De externe voeding mag variëren tussen de 6 en 20 volt. Het bord beschikt over een 5 aansluiting, deze pin levert 5 volt afkomstig van een regulator. Ook is er een pin voor 3,3 volt van een regulator.

Om analoge signalen om te zetten naar digitale waarden beschikt de Arduino Uno over zes analoge ingangskanalen. Deze pinnen zijn rechtstreeks verbonden met de eerder vernoemde ADC.

De Communicatie met de microcontroller kan verlopen via UART TTL (5 volt) seriële communicatie met de pinnen RX en TX. De seriële communicatie via de USB verschijnt als een virtuele com-poort op de computer. Met de Arduinosoftware kan de microcontroller worden geprogrammeerd en kan de seriële communicatie worden uitgelezen met de seriële monitor [7][9].

### **1.2.2.2 Raspberry Pi**

De Raspberry Pi is een single-board computer met een Broadcom BCM2835 System on Chip (SoC)(Figuur 5). De chip beschikt ook over een ARM-processor met een kloksnelheid van 700 MHz. Het bord bevat verder ook een HDMI-output, twee USB-poorten, Ethernetpoort, composite-out en een 3,5mm audiojack.



Figuur 5: Raspberry Pi [6]

De HDMI-output ondersteunt veertien verschillende resoluties van 640x350 tot full HD 1920x1200. Ook audio uit wordt ondersteund door de HDMI-poort. De GPU is een BroadcomVideoCore met een kloksnelheid van 250 MHz. De Raspberry Pi beschikt ook over een video input. De CSI-input connector laat toe om een Raspberry Pi cameramodule aan te sluiten.

De twee USB 2.0 poorten en de Ethernetpoort zijn met een 3-poorts USB hub verbonden met de SoC. De Ethernetpoort is een 10/100 type.

De Raspberry Pi wordt gevoed via de micro-USB-connector. De voedingsspanning moet 5 volt bedragen. De single-board computer wordt beschermd tegen te grote stromen door een resetbare zekering die zich achter de micro-USB-poort bevindt. De voedingsspanning wordt met een on-board voltage regulator omgezet in 3,3 volt.

De 26 GPIO pinnen geven de Raspberry Pi verdere uitbreidingsmogelijkheden. Twee pinnen zijn verbonden met de 5 volt voedingsspanning, twee pinnen met 3,3 volt, 5 pinnen met de massa, twee UART-pinnen, twee I<sup>2</sup>C pinnen, vijf SP10 pinnen en acht GPIO pinnen.

De 5 volt spanning is rechtstreeks afkomstig van de micro-USB-poort en wordt dus niet stabiel gehouden door een voltage regulator. De 3,3 volt is wel afkomstig van de on-board voltage regulator.

Alle GPIO-pinnen van de Raspberry Pi zijn niet gebufferd en werken op 3,3 volt.

De Raspberry Pi maakt gebruik van 512 Mb SRAM-geheugen. Dit RAM-geheugen deelt de cpu met de gpu. Een SD-slot bevindt zich aan de onderkant van de single-board pc. De software moet zich op een SD-kaart bevinden om de Raspberry Pi te gebruiken.



Specifiek voor de hardware van de Raspberry Pi is Raspbian ontwikkeld. Raspbian is een gratis operation system dat gebaseerd is op Debian [10].

### 1.2.3 Relais

Om een verwarmingslint of een mixer aan te sturen kan gebruik worden gemaakt van een relaismodule. De Funduino-relaismodule van Keyes beschikt over twee kanalen. Elke relais kan een spanning schakelen van 230 volt ac en een maximale stroom aan van 10 A. De relaismodule werkt op een stuursignaal van 5 volt. Het stuursignaal en de relais zijn van elkaar gescheiden m.b.v. opto-koppelaars. De stuurpinnen zijn actief hoog.

### 1.2.4 Verwarmingslint

De Electrothermal MC227 (Figuur 6) is een stureenheid voor warmte-elementen toegepast in het labo. De voedingsspanning moet 230 Volt ~AC 50/60 Hz bedragen. Via een draaischakelaar kunnen er tien verschillende standen worden ingesteld. Op de hoogste stand zal de controller continu het maximale vermogen van 2300 Watt leveren aan het verwarmingslint. De controller is beveiligd met een smeltzekering van 10A [11].



Figuur 6: Electrothermal MC227 [11]

## 1.3 kWh meter

Om de energieopbrengst van de biogasinstallatie te berekenen moet ook het energieverbruik van de biogasinstallatie worden gemeten. Een mogelijke kWh meter is de "Smart Circuit 20". Deze digitale kWh meter is geschikt voor het meten van één fase, spanningen van 100 tot 250 volt en een stroom tot 20 Ampère." De Smart Circuit 20" (Figuur 7: Smart circuit 20 kWh meter [12]) beschikt over een ingebouwde webserver, dit maakt het online monitoren van het gebruik mogelijk. De kostprijs van de "Smart Circuit 20" bedraagt 164,95 euro [12].

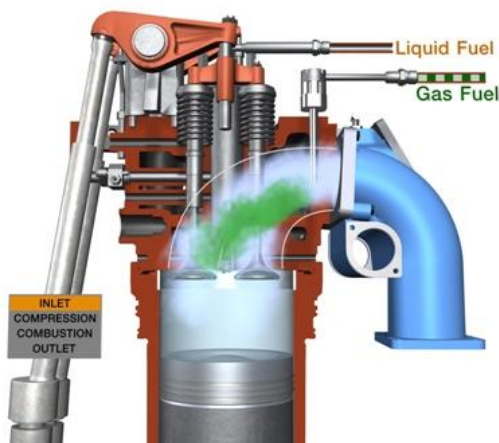


Figuur 7: Smart circuit 20 kWh meter [12]

## 1.4 Toepassing biogas

Het geproduceerde biogas kan worden gebruikt om elektriciteit en warmte op te wekken. Een toepassing hiervan is te vinden in een warmtekrachtkoppeling (WKK). Bij een WKK drijft een verbrandingsmotor een generator aan. De generator wekt op zijn beurt elektriciteit op die op het elektriciteitsnet kan worden gestuurd of rechtstreeks kan worden gebruikt voor de biogasinstallatie zelf. Naast de geproduceerde elektriciteit komt er ook warmte vrij bij de verbranding van biogas. De vrijgekomen warmte kan dan terug worden gebruikt om de biogasinstallatie op temperatuur te houden. Een WKK heeft gemiddeld een mechanisch rendement van 25 tot 38%. Bij gebruik van de vrijgekomen warmte kan een totaal rendement van 80 tot 90% worden bereikt [13].

De verbrandingsmotor van de WKK kan op twee manieren werken. Wanneer er wordt gekozen voor een standaard gasmotor wordt het gas tot ontsteking gebracht d.m.v. een vonk. Dit noemt het Otto-principe. Een ander type verbrandingsmotor is de DualFuel methode. DualFuel verwijst naar de hoeveelheid brandstoffen die samen in de verbrandingskamer worden ingespoten. Biogas en diesel worden samen in de verbrandingskamer geïnjecteerd onder hoge druk. Door deze hoge druk komt het brandstofmengsel spontaan tot ontbranding [2][14]. Dit principe wordt geïllustreerd in Figuur 8.



Figuur 8: DualFuel compressiekamer [15]

De concentraties van zwavel en waterdamp in biogas hebben een grote invloed op de werking van de verbrandingsmotor. Zwavel en waterdamp hebben als gevolg dat de motor intern corrodeert. Op lang termijn leidt dit tot het falen van de motor en hoge onderhoudskosten. Het zuiveren en drogen van het biogas is noodzakelijk [2][14].

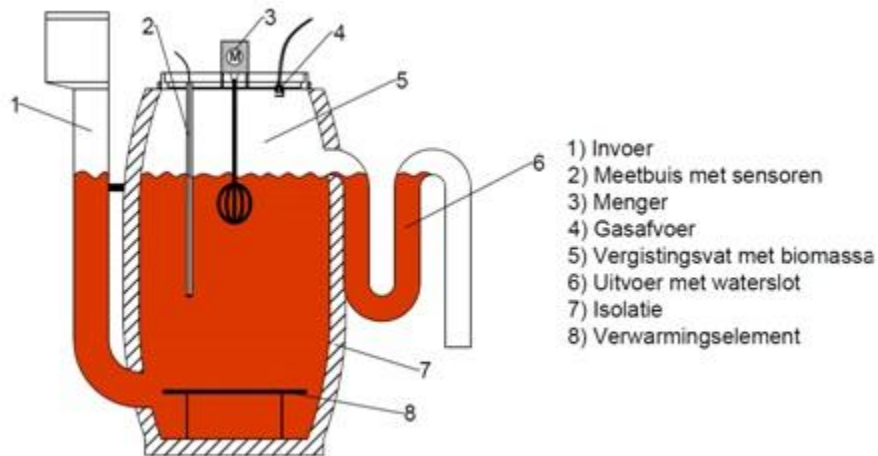
Het gebruik van biogas in een verbrandingsmotor heeft als voordeel dat de uitstoot minder schadelijk is. Wanneer Het EGR-systeem (uitlaatgasrecirculatie systeem) bij een dieselmotor wordt uitgeschakeld daalt de schadelijke uitstoot in vergelijking met een werkend EGR-systeem, maar is er wel een toename van de concentratie stikstofoxide. Echter daalt de concentratie stikstofoxide bij het inspuiten van biogas samen met diesel. Door CO<sub>2</sub> in biogas daalt de maximale temperatuur van het ontvlambaar mengsel, het methaan in biogas verlengt de verbrandingstijd, hierdoor daalt ook de temperatuur van de verbranding. De daling van stikstof oxide is evenredig met het methaan gehalte in biogas [13].

Op plaatsen waar er nauwelijks toegang is tot elektriciteit zijn biogasinstallaties een hoofdbron van energie. Kleine biogasinstallaties zoals die worden gebruikt in Afrika en India zijn uitermate geschikt om energie te leveren aan een gezin. Met het geproduceerde biogas kan een gemiddeld gezin dagelijks koken. Het voordeel van het gas te gebruiken om te koken is dat het geproduceerde gas niet gezuiverd moet worden voor dat het gebruikt wordt in een gasvuur[1].



## 2 Materialen en methode

Bij de start van deze thesis is er begonnen met een wit blad. Op basis van de proefopstelling van Inge Verboven werd een nieuwe biogasinstallatie gebouwd. De installatie bestaat uit een aantal onderdelen zoals te zien is op Figuur 9. Het hoofdonderdeel van de biogasinstallatie is het vergistervat. Dit vat bevat de biomassa die de anaerobe vergisting ondergaat en gas produceert. Aan het vat zijn de inlaat- en uitlaatopeningen gemonteerd. Deze zorgen dat er biomassa kan worden toegevoegd en dat het digestaat het vat kan verlaten zonder dat er gas ontsnapt.



Figuur 9: Doorsnede vergistervat [16]

Op de bodem van het vat bevindt zich het verwarmingselement. Dit is nodig om de biomassa op een ideale temperatuur te houden en een efficiënte vergisting van de biomassa te krijgen. Omdat een constante temperatuur belangrijk is voor het biochemisch proces is de vergister omhuld met isolatiemateriaal. De gasopvang gebeurt aan de bovenkant van de vergister, hier is een leiding bevestigd die het geproduceerde gas wegleidt voor opslag. Naast de gasafvoer op het deksel van de vergister bevindt zich de menger die de biomassa mixt. De sensoren die informatie verzamelen over de biogasinstallatie bevinden zich in een buis die loopt van de bovenkant van het deksel tot in de biomassa.

In dit hoofdstuk worden alle deelaspecten van de biogasinstallatie verder besproken.

### 2.1 Voeding

De vergister kan worden gevoed via de verticale buis die zich aan de zijkant van het vat bevindt. Wanneer er biomassa wordt gevoed aan de vergister komt deze nieuwe biomassa onder in het vat terecht. Naarmate er biomassa wordt toegevoegd stijgt de eerder toegevoegde biomassa naar boven om uiteindelijk het vat te verlaten via de uitvoer. Dit geeft de biomassa een vaste verblijftijd van ongeveer 30 dagen. Rekening houdend met de hoeveelheid biomassa die er dagelijks aan de vergister wordt toegevoegd werd een vat gekozen met een volume van 220 liter [16]. Het vat is afsluitbaar door een verwijderbaar luchtdicht deksel.

Het hoofdbestanddeel van de biogasinstallatie zijn de bacteriën die het organisch materiaal afbreken en omvormen tot methaan. Om de opstart van de installatie te versnellen werd de vergister gevoed met mest uit een alreeds werkende biogasinstallatie. De gebruikte mest is afkomstig van een biogasinstallatie gelegen op een melkboerderij. De mest van de koeien wordt verzameld in de stallen en gepompt naar de vergister gelegen langs de stallen.

De mest die gebruik werd voor het voeden van de biogasinstallatie was afkomstig van de vergister van de boerderij. De gebruikte mest had dus al enkele dagen doorgebracht in de biogasinstallatie van de boerderij en was al voor een deel vergist.

Om het proces continu te laten doorgaan moest de biogasinstallatie elke dag worden gevoed. De dagelijkse voeding bestond uit 2 liter mest. Na verloop van tijd werd er een mengsel van organisch afval en mest gevoed aan de vergister. De verhouding van dit mengsel varieerde om de overgang van voeding volledig bestaand uit mest naar organisch afval stapsgewijs te laten verlopen.

Het organisch afval was afkomstig van keukenafval. Het organisch materiaal werd eerst kleingemaakt zodat het beter kon worden afgebroken door de bacteriën. Het keukenafval werd eerst m.b.v. een vleesmolen in kleine stukjes gemaald. Vervolgens werden de kleine stukjes gemixt tot een brij. Daarna werd de brij van organisch materiaal aangelengd met water om een juiste verhouding van de droge stof te verkrijgen.

## **2.2 Digestaat**

Het digestaat dat het vergistervat verliet via de uitvoer werd opgevangen in een bak om te gebruiken als bodemverbeteraar. Het digestaat is vloeibaarder dan de biomassa waarmee de biogasinstallatie werd gevoed. Het waterslot dat zich aan de uitvoeropening bevindt is noodzakelijk om ontsnappend gas tegen te houden en dus zo ook geurhinder te beperken.

## 2.3 Gasopvang

Om een analyse te kunnen maken van de biogasinstallatie moest het geproduceerde gas onderzocht worden. De opvang van het gas was dus noodzakelijk. Het gevormde gas komt vrij aan de oppervlakte van de biomassa en verzamelt zich in de ruimte tussen de biomassa en het deksel van de vergister. Een leiding bevestigd aan het deksel van de vergister leidt het gas weg voor opslag.

Toen de installatie pas was opgestart was de gasopbrengst beperkt tot 30 liter per dag. Er werd toen gebruik gemaakt van gaszakken met een volume van 5 liter om het geproduceerde gas op te vangen. De gaszakken werden met leidingen met elkaar verbonden tot er totaal volume van 50 liter beschikbaar was. In Figuur 10 zijn deze gaszakken met een gecombineerd volume van 50 liter te zien.



**Figuur 10: Gaszakken met een gecombineerd volume van 50 liter**

Naarmate het vergistingsproces van de biogasinstallatie evolueerde en de gasproductie steeg was de 50 liter aan opvangcapaciteit te weinig om het weekend te overbruggen. Om de opvangcapaciteit te vergroten werd er gebruik gemaakt van grote rubberen binnenbanden afkomstig van vrachtwagenbanden en tractorbanden. In totaal bestond de opvangcapaciteit uit drie banden met respectievelijk een volume van 200, 230 en 570 liter. De totale opvangcapaciteit bedroeg 1000 liter. De verschillende binnenbanden staan in Figuur 11.



**Figuur 11: Binnenbanden met een gecombineerd volume van 1000 liter**

## 2.4 Verwarmingselement

Een mesofiele vergisting gebeurt bij een temperatuur tussen 34 en 37 graden Celcius. Om dit te bereiken in het Europees klimaat moet de biomassa worden verwarmd. De biomassa in de vergister werd verwarmd met een warmtelint. Dit warmtelint werd in een spiraalvormige alpex buis geplaatst. De spiraalvormige alpex buis bevindt zich op de bodem van het vat, afgebeeld in Figuur 12. Dit zorgt voor een optimale warmteoverdracht aan de biomassa. Door de biomassa te verwarmen aan de onderkant zal er stroming worden opgewekt in het vat. De biomassa die uitzet door de warmte zal naar boven stijgen waardoor de koude biomassa naar beneden zakt om vervolgens te worden opgewarmd. Het warmtelint levert een vermogen van 800 Watt. De stuureenheid van het warmtelint is de eerder besproken Electrothermal MC227, deze kan een vermogen leveren tot 2300 Watt.



Figuur 12: Spiraalvormige alpex buis op de bodem van het vat

Om warmteverlies tot een minimum te beperken werd het vat geïsoleerd. Als isolatiemateriaal is er gebruik gemaakt van isolatieplaten met een dikte van 5 cm om de bodem en het deksel van het vat te isoleren. De mantel van het vat werd geïsoleerd met 12 cm dik glaswol zoals te zien is op Figuur 13.



Figuur 13: Vergistervat met isolatie



## 2.5 Menger

Na de opstart van de biogasinstallatie bereikte de biomassa zijn ideale temperatuur van 37 °C en vormden er zich de eerste gasbellen. Door de opstijgende gasbellen vormde er zich een schuimlaag op de biomassa. Deze schuimlaag blokkeerde de gasleiding waardoor het geproduceerde gas niet kon ontsnappen uit de vergister. Het schuim vormde zich ook in de leiding van de druksensor, hierdoor werd de drukstijging in het vat niet gemeten en bleef de biomassa verwarmd. Dit leidde tot een grote druktoename in de vergister. Om schuimvorming tegen te gaan moest de bovenste laag van biomassa worden gemixt. Het roeren gebeurt met een boormachine van 800W. De microcontroller stuurt het boormachine aan d.m.v. het relaisbord. Het boormachine roert de biomassa om het uur gedurende 10 minuten.

## 2.6 Energie verbruik

Om een kosten-batenanalyse te kunnen maken van de biogasinstallatie moet het verbruik van de biogasinstallatie gekend zijn. Het verbruik van elektrische energie van de installatie wordt gemeten met een kWh-meter. De gebruikte kWh-meter is een analoge meter type SM14 van het merk Ocobemet (Figuur 14).



Figuur 14: Analoge kilowattuur-meter

De kWh-meter meet het verbruikte vermogen door het verwarmingselement, de menger en het regelsysteem.

## 2.7 Regelsysteem

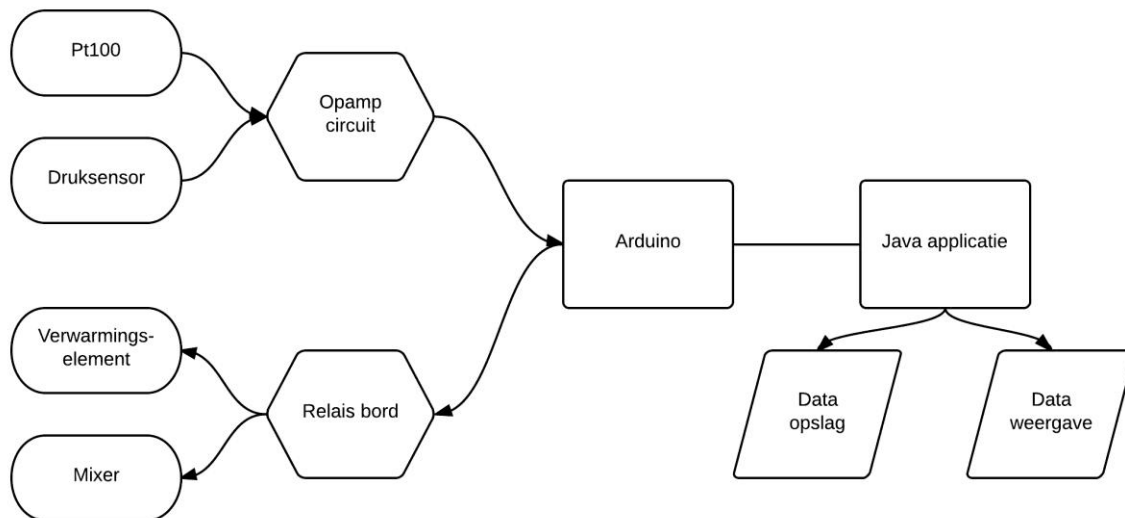
Voor een goede werking van de vergister moet de temperatuur van de biomassa op een constante temperatuur worden gehouden. Voor een mesofiele vergisting van de biomassa ligt deze constante temperatuur tussen 35°C en 37°C. Hiervoor is een controlesysteem nodig dat de temperatuur meet en indien nodig het verwarmingselement aanstuurt. Zo wordt de biomassa op ideale temperatuur gehouden voor de anaerobe vergisting.

Bij de opstart van de biogasinstallatie wordt er gebruik gemaakt van de sensor interface die vorig jaar is ontwikkeld door bachelorstudenten elektronica-ict van de faculteit FIW [7]. De sensorinterface maakt

gebruik van een temperatuursensor, druksensor en pH-sensor voor data-analyse. Deze sensorinterface wordt omgevormd tot een regelsysteem door gebruik te maken van een relaisbord dat het warmte-element aanstuurt.

Het regelsysteem gebaseerd op de sensorinterface werkt met analoge sensoren. Een Pt100 als temperatuursensor en de Honeywell 24PCAFA6G als druksensor. Voor het regelsysteem wordt de pH-sensor, van de oorspronkelijke sensorinterface, niet toegepast. De optimale zuurtegraad voor het vergistingsproces van biomassa ligt op 7,5. Uit resultaten van voorafgaand onderzoek kan er geconcludeerd worden dat de pH constant blijft bij een waarde tussen 7,5 en 7,9 wanneer de temperatuur constant blijft rond 37°C. Het toepassen van de pH-sensor zou de kost van de biogasinstallatie alleen maar onnodig opdrijven. Met dit perspectief is er voor gekozen om de pH-sensor niet te gebruiken voor het regelsysteem [2][7].

De analoge signalen van de sensoren worden door een opamp-circuit geconditioneerd. Vervolgens zet de microcontroller de analoge waarden om in digitale en stuurt deze door naar een Java-applicatie. De softwareapplicatie beslist of het verwarmingselement moet worden geactiveerd en geeft wanneer nodig het commando aan de controller om het warmtelint aan te sturen via het relaisbord. De verschillende onderdelen van het systeem zijn weergegeven in Figuur 15. In wat volgt worden de verschillende onderdelen verder uitgelegd.



**Figuur 15: Schema regelsysteem**

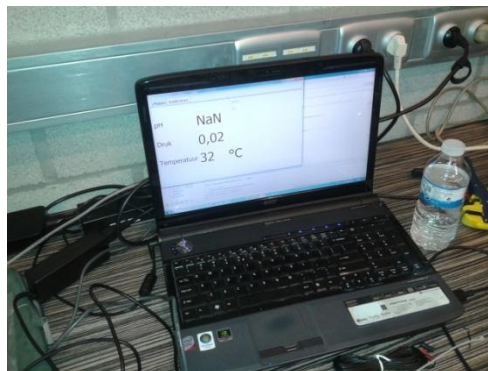
De pt100 is een RTD (resistancetemperature detector) uit platina. De pt100 valt onder de IEC751-standaard die een weerstand van 100 Ohm bij een temperatuur van 0°C beschrijft. Om de veranderlijke weerstandswaarden om te zetten in een veranderlijke spanning wordt de pt100 in een analoog circuit geïmplementeerd. Dit circuit geeft een spanning aan de uitgang die lineair verandert met de weerstandswaarden van de pt100.

De temperatuursensor of pt100 bevindt zich in de biomassa op 50 cm onder het deksel. Door de sensor in een buis te plaatsen die van de bovenkant van het deksel tot in de biomassa loopt, blijft de vergister luchtdicht en kan er geen geproduceerd gas ontsnappen.

De Honeywell 24PCAFA6G druksensor is van het gage type en meet de druk aan de ingang t.o.v. de atmosferische druk. Het meetbereik ligt tussen 0 en 6894 Pascal (69 mbar). Omdat de druksensor intern bestaat uit een Wheatstone-brug moet ook deze sensor worden geïmplementeerd in een analoog circuit. De output van dit circuit is een spanning die lineair verandert met de gemeten druk. De druksensor bevindt zich in een opening in het deksel van de vergister. Het gas verspreidt zich van de bovenkant van de vergister naar de gasleidingen en de gaszakken. De druk die de sensor meet is gelijk aan de druk in zowel de vergister als in de gaszakken.

Het signaal van beide analoge circuits moet worden geconditioneerd om het bruikbaar te maken voor de ADC. Een opamp-schakeling transfereert de signalen van de analoge circuits tot meetbare signalen die het volledig bereik van de ADC benutten.

Als microcontroller wordt er gebruikt gemaakt van de Arduino Uno. De Arduino beschikt over een ADC die het geconditioneerde signaal van de opamp-schakeling omzet in een digitale waarden tussen 0 en 1024. Deze digitale waarden van de druk en temperatuur worden via seriële communicatie doorgestuurd naar een Java-applicatie die draait op een laptop (Figuur 16).



**Figuur 16: laptop met Java-applicatie**

De Arduino stuurt de digitale waarden van de druk en temperatuur door naar de laptop. De Java-applicatie zet de digitale waarden van 0 tot 1024 om in temperatuur- en drukeenheden. De omzetting gebeurt aan de hand van een kalibratievergelijking die het verband weergeeft tussen de gemeten spanning en de gemeten druk en temperatuur aan de sensoren. De temperatuur in °C en de druk in mbar worden vervolgens weergegeven en opgeslagen in een tekstbestand. Wanneer de temperatuur zich onder de 36 °C bevindt, geeft de software de opdracht aan de microcontroller om het verwarmingselement te activeren. Wanneer de temperatuur vervolgens terug stijgt tot boven 37°C wordt het warmte-element terug gedeactiveerd.

De Arduino Uno activeert het verwarmingselement door het relaisbord in te schakelen dat de Electrothermal MC227 stuureenheid met het spanningsnet van 220 volt koppelt. De stuureenheid is zo ingesteld dat deze altijd het maximale vermogen van 800 watt geeft aan het warmtelint. Het verwarmingselement zal dus een aan/uit gedrag vertonen bij in- of uitschakelen van het relaisbord.

### **2.7.1 Problemen**

Enkele weken na het in gebruik nemen van het regelsysteem werden er onregelmatigheden vastgesteld. Het eerste probleem dat zich voordeed was het uitvallen van het regelsysteem op willekeurige momenten. Dit had als gevolg dat de biomassa niet meer werd verwarmd, het chemisch proces werd afgeremd en er geen mesofiele vergisting meer gebeurde. De oorzaak van het falen van het regelsysteem werd gevonden in de communicatie tussen Arduino en de Java-applicatie.

Op de Arduino wordt een softwareprogramma iedere seconde herhaald. In het softwareprogramma worden eerst de tweegeconditioneerde signalen van de sensoren ingelezen. Vervolgens worden de gemeten analoge waardes digitaal gestuurd naar de laptop. Deze communicatie verloopt serieel over de USB. Het uitvallen van het regelsysteem is het gevolg van het softwareprogramma dat niet meer werd herhaald op de Arduino.

Wanneer dit programma niet wordt herhaald ontvangt de Java-applicatie geen gegevens van de sensoren en kan deze niet beslissen of het verwarmingselement geactiveerd moet worden.

Een mogelijke oplossing was het toepassen van een Watchdogtimer. De Watchdogtimer kijkt of in een bepaalde tijd het programma op de Arduino wordt herhaald. Wanneer de bepaalde tijd is verstreken zonder dat het programma is herhaald zal de Watchdogtimer het programma terug opstarten. Na het installeren van de Watchdog op de Arduino bleef het probleem zich voordoen. Na een diepgaande zoektocht op verschillende internetfora werd er geen concrete oplossing gevonden [17].

Het tweede probleem dat zich manifesteerde was een gevolg van het eerste probleem. Wanneer het regelsysteem uitviel en dus heel de biogasinstallatie kon deze alleen manueel terug worden opgestart door de Arduino hardwarematig te resetten. Omdat het uitvallen van de biogasinstallatie alleen kon worden vastgesteld als er fysiek iemand de installatie kwam controleren, bleef de installatie soms lange tijd uitstaan.

Een derde probleem dat zich voordeed was de gevoeligheid voor ruis van zowel de analoge sensoren als het analoge circuit dat de signalen moest conditioneren. Naarmate de afstand tussen de analoge sensoren en het opamp-circuit groter werd was er meer ruis aanwezig op het gemeten analoge signaal.

Het vierde en laatste probleem situeert zich in het energieverbruik van het regelsysteem. Doordat een laptop werd gebruikt in het regelsysteem lag het energie verbruik van het regelsysteem zonder het verwarmingselement tussen 1,2 kWh en 2,4 kWh per dag. Een verbruik van 2,4 kWh ligt hoog in vergelijking met het verbruik van een Raspberry Pi (0,084 kWh per dag) die over voldoende rekenkracht bezit om dezelfde functies als de laptop uit te voeren.

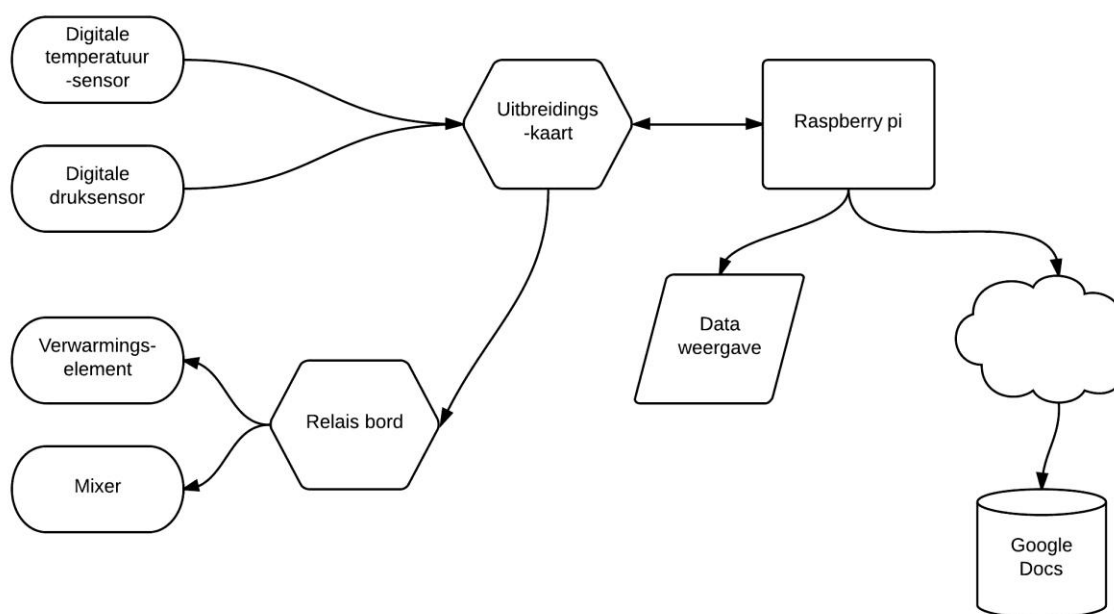
Door de som van de vier problemen werd besloten om een eigen regelsysteem te ontwikkelen. De vereiste voor dit nieuw systeem waren een onderhoudsvrij regelsysteem met de mogelijkheid om de biogasinstallatie van op afstand te monitoren. Daarenboven moest het nieuwe systeem energiezuiniger zijn en een nauwkeurige meting kunnen uitvoeren zonder ruisgevoelig te zijn.

## 2.8 Geoptimaliseerd regelsysteem

Het nieuwe geoptimaliseerde regelsysteem maakt gebruik van digitale sensoren. Digitale sensoren hebben het voordeel dat ze een gekende nauwkeurigheid hebben en minder ruisgevoelig zijn door de digitale communicatie. De gebruikte temperatuursensor en druksensor zijn respectievelijk de DSB1820 en een Honeywell druksensor uit de SSC Serie.

Om de biogasinstallatie van op afstand te kunnen monitoren wordt er gebruik gemaakt van een single-board computer. De keuze voor de Raspberry Pi als single-board computer is gebaseerd op de uitgebreide connectiviteit van de Raspberry Pi. De single-board computer communiceert met de digitale sensoren en leest de gemeten waarden in. Vervolgens stuurt de Raspberry Pi indien nodig het warmte-element aan. Om schuimvorming tegen te gaan activeert de Raspberry Pi periodisch de menger.

De ontvangen data van de sensoren wordt via Google Docs online opgeslagen en weergegeven. Dit is uitgewerkt in volgend schema.



Figuur 17: Schema geoptimaliseerd regelsysteem

### 2.8.1 Sensoren

De gebruikte temperatuursensor is de DSB18B20 (Figuur 18). Dit is een digitale temperatuursensor van Maxim ic. De sensor heeft een bereik van  $-55^{\circ}\text{C}$  tot  $+125^{\circ}\text{C}$ . Over een bereik van  $-10^{\circ}\text{C}$  tot  $+85^{\circ}\text{C}$  heeft de sensor een nauwkeurigheid van  $0,5^{\circ}\text{C}$ . De interface van de sensor maakt gebruik van het one-wire protocol. Dit heeft als gevolg dat de temperatuursensor maar drie pinnen gebruikt. Twee pinnen zorgen uitsluitend voor de voeding en massa, de derde pin is de data pin. De voeding voor de sensor mag variëren tussen 3,0 volt en 5,5 volt. Dit maakt de sensor toepasbaar voor verschillende microcontrollers

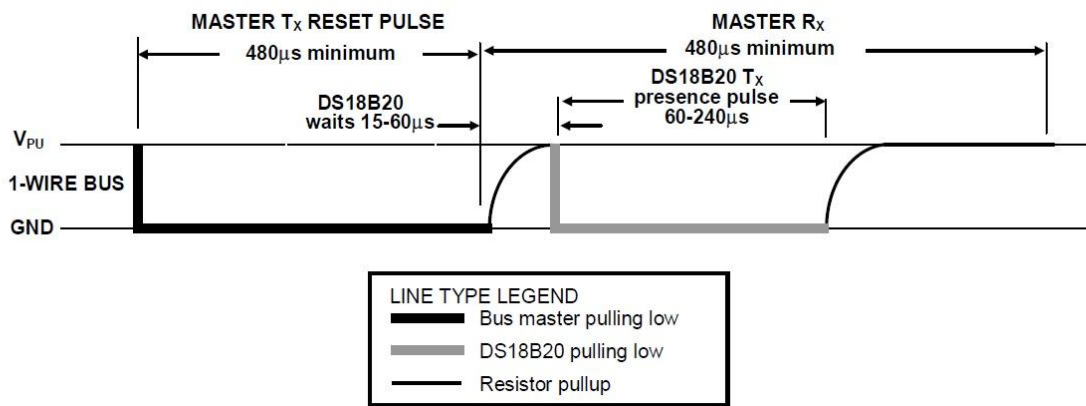
of single-board computers. De temperatuursensor is geplaatst in een bus uit RVS. Hierdoor is de sensor waterdicht en bestand tegen de basische biomassa. Net zoals bij de eerder gebruikte pt100 zit de temperatuursensor in een buis die loopt van het deksel tot onder de biomassa. De datasheet van de temperatuursensor bevindt zich in appendix A.



**Figuur 18: DSB18B20temperatuursensor in RVS huls [17].**

Het one-wire protocol maakt gebruik van één datalijn. Alle communicatie tussen de master en de slave (temperatuursensor) begint met een initialisatiefase. Deze fase bestaat uit een reset verstuurd door de master gevolgd door een puls van de temperatuursensor. De sensor stuurt deze puls als erkenning dat de sensor actief is op de bus en klaar is om de temperatuur te meten.

De initialisatiefase begint met het laag trekken van de one-wire bus door de master. Dit gebeurt minimum gedurende een periode van  $480\mu\text{s}$ . Vervolgens gaat de master in ontvangstmode en wordt de one-wire bus niet meer laag getrokken. De pull-up weerstand brengt de one-wire bus nu tot op het niveau van de voedingspanning. De sensor detecteert deze stijgende flank op de one-wire bus en wacht vervolgens  $15\mu\text{s}$  tot  $60\mu\text{s}$  alvorens een puls uit te sturen. Deze puls wordt gegenereerd door de one-wire bus laag te trekken gedurende  $60\mu\text{s}$  tot  $240\mu\text{s}$ .



Figuur 19: Tijd weergaven van de initialisatiefase[19]

De master schrijft data naar de DS18B20 tijdens Write timeslots en leest data van de DS18B20 tijdens Read timeslots.

De master kan Write 1 timeslot gebruiken om een logische 1 naar de sensor te sturen en een Write 0 timeslot om een logische 0 naar de sensor te sturen. De master kan een Write 1 timeslot toepassen door de bus laag te trekken en binnen de 15 µs de bus terug hoog te maken. Een Write 0 slot ontstaat door de bus laag te trekken gedurende de volledige tijd van het timeslot

Een Read timeslot wordt geïnitieerd wanneer de master de bus laag trekt voor een minimale periode van 1 µs en dan de bus terug hoog laat gaan. Na het initialiseren van de Read timeslot verstuurt de sensor de data over de bus. De sensor stuurt een 1 door de bus hoog te laten en een 0 door de bus laag te trekken. De data van de temperatuursensor is geldig binnen 15 µs na de dalende flank die de Read timeslot initialiseerde.

De druksensor, die de druk in de leidingen en in de vergister meet, is een Honeywell SSCMRNN001PG2A3. Deze sensor komt uit de TruStabilitySiliconPressure Sensors reeks en is een digitale druksensor. De druksensor heeft een bereik van 0 tot 1 psi (69 mbar) en is gekalibreerd voor een gebruik tussen -20°C en 85°C. De werking van de druksensor berust op piëzoresistieve silicium, een ingebouwde ASIC zorgt voor de omzetting naar een digitale output. De druksensor meet de druk en past een temperatuurscompensatie toe door ook de temperatuur intern te meten. Over het maximale bereik is de maximale fout  $\pm 2\%$ . De maximale meetfrequentie bij een geldige meting bedraagt 2kHz. De voedingsspanning ligt tussen 3,3,3 volt en 5,0 volt. Dit maakt de sensor ruim toepasbaar op verschillende microcontrollers en single-board computers. De datasheet bevindt zich in appendix B.

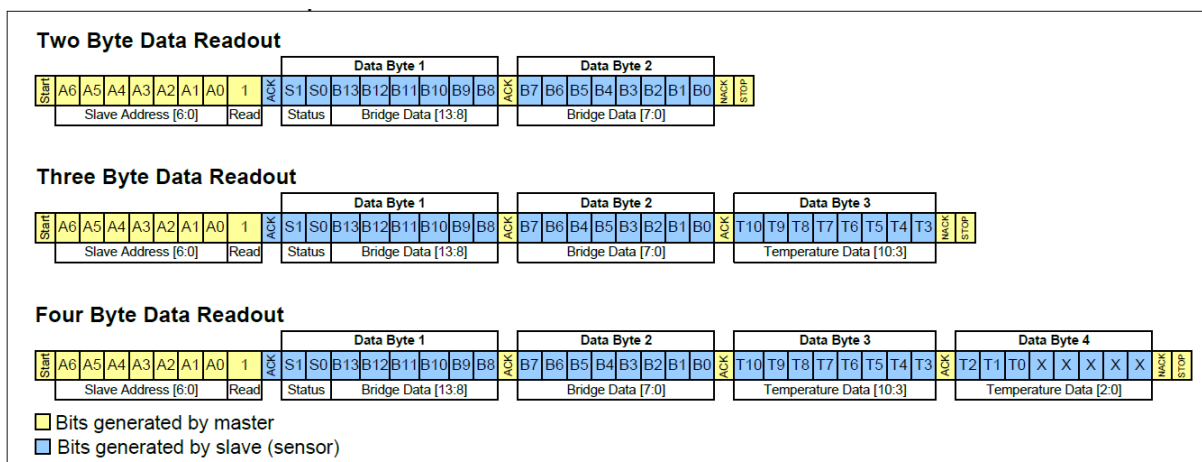
De I2C bus werd uitgevonden in 1980 door Philips en sinds 2006 draag NXP de verantwoordelijkheid van het I2C-protocol. De Seriële bus was ontwikkeld voor de communicatie tussen verschillende microprocessors of IC's op dezelfde printplaat. De maximale lengte van de I2C bus is 1 meter. De lengte tussen de communicerende IC's kan worden vergroot door gebruik te maken van buffers. Een andere benaming voor het I2C protocol is two-wire interface, dit omwille dat de I2C bus bestaat uit maar twee lijnen buiten de voeding en de massa.



De twee lijnen zijn de datalijn (SDA) en de kloklijn (SCL). Gegevens over de datalijn worden verstuurd door de lijn laag en/of hoog te maken. Door een opencollector architectuur kunnen de lijnen laag worden getrokken door zowel de master als de slave. De lijnen worden terug hoog gemaakt door de pull-up weerstand die verbonden is met de voedingsspanning.

De Honeywell digitale druksensor werkt als een slave op de I2C bus. Elke slave heeft een specifiek adres, het adres van de gebruikte druksensor is 40 (28 hex). Om de drukmeting uit te lezen start de master de communicatie door het adres van de slave te sturen gevolgd door een leesbit. Nadat de sensor het ontvangen van de leesbit erkent stuurt de sensor 4 bytes met data terug. Na elke ontvangen Byte stuurt de master een acknowledgment zodat de slave de volgende byte kan sturen. Het kloksignaal aangemaakt door de Raspberry Pi zorgt dat de communicatie synchroon gebeurt. De digitale druksensor van Honeywell heeft een klok nodig met een minimale frequentie van 100Hz en mag maximum een frequentie hebben van 400 Hz.

De eerste twee bytes bevatten de gemeten druk. De laatste twee bytes bevatten de temperatuur die de sensor meet om temperatuurscompensatie toe te passen op de drukmeting. In Figuur 20 staat de pakquetsamenstelling geïllustreerd met de druk- en temperatuurdata.



**Figuur 20: Pakket samenstelling met druk- en temperatuur -data[20].**

De sensor stuurt bij elke leesvraag van de master de status van de sensor door. De eerste twee bits van de eerste verstuurde byte bevat de status van de druksensor. Wanneer de status bits de waarde '00' hebben is de gemeten druk geldig. Bij '10' als status bits is de mee doorgestuurde data van de vorige drukmeting dus ongeldig als nieuwe drukwaarde.

De Raspberry Pi beschikt over de interfaces die nodig zijn voor het nieuwe regelsysteem. De single-board computer ondersteunt de I2C en one-wire protocol, eveneens geeft de standaard ingebouwde Ethernetpoort de mogelijkheid om de data online op te slaan en weer te geven.

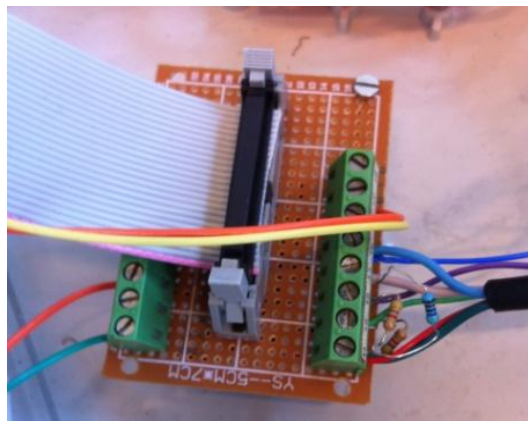
De gebruikte sensoren werken op zowel 3,3 volt als op 5 volt maar omdat de logische pinnen van de Raspberry Pi alleen maar werken op 3,3 volt moeten de sensoren gevoed worden met 3,3 volt.

De Raspberry Pi ondersteunt het one-wire protocol alleen maar op pin 7 (GPIO4). De datalijn van de DS18B20-one-wire temperatuursensor, moet dus op pin 7 worden aangesloten. Een pull-up weerstand van 4700 Ohm verbindt de one-wiredatalijn met de voedingslijn waar respectievelijk een spanning van 3,3 volt opstaat. De weerstand trekt de datalijn hoog wanneer de temperatuursensor en de Raspberry Pi de lijn niet laag trekken.

De druksensor die gebruik maakt van het I2C-protocol heeft nog twee lijnen nodig buiten de massa en voeding. De SDA is de datalijn waarover bytes met de meetwaarden worden gestuurd. De SCL is de lijn waardoor het kloksignaal wordt gestuurd. Dit kloksignaal is nodig om de data overdracht tussen de master (Raspberry Pi) en de slave (druksensor) te synchroniseren. De SDA en SCL bevinden zich op pin 3 en 5 van de Raspberry Pi. Ook hier moeten pull-up weerstanden worden geplaatst tussen de voedingslijn van 3,3 volt en de SDA lijn en de SCL lijn. De twee pull-up weerstanden zijn 4700 Ohm groot.

Het Funduino relaisbord met twee relaismodules moet gevoed worden met 5 volt. Het sturen van de relais zelf kan gebeuren met 3,3 volt tot 5 volt logica. Pinnen 11 en 13 van de Raspberry Pi zijn verbonden met de Opto-koppelaars van de twee relais. Het stuursignaal van 3,3 volt is voldoende om het circuit van de relais te activeren. De 5 volt spanning afkomstig van de Raspberry Pi schakelt dan het relais in.

Om het aansluiten van het relaisbord en sensoren gemakkelijk te laten verlopen zijn de 24 GPIO pinnen van de Raspberry Pi verbonden met een uitbreidingskaart. Op de uitbreidingskaart, die te zien is in Figuur 21, zijn twee keer acht schroefklemmen gesoldeerd. De drie pull-up weerstanden bevinden zich ook op de printplaat tussen de drie communicatielijnen en de voeding. De uitbreidingskaart en de Raspberry Pi zijn met elkaar verbonden met een 2x12 flatkabel.



**Figuur 21: Uitbreidingskaart met flatkabel**

Het weergeven van de status van de Raspberry Pi en de biogasinstallatie gebeurt op de aangesloten monitor. Met de muis en toetsenbord als invoerapparaten kan de werking van de Raspberry Pi worden aangepast en zo nodig worden gestopt om de biogasinstallatie stil te leggen. Op Figuur 22 is de biogasinstallatie met geoptimaliseerd regelsysteem te zien.



Figuur 22: Biogasinstallatie met geoptimaliseerd regelsysteem

### 2.8.2 Software

Het gebruikte besturingssysteem op de Raspberry Pi is Raspbian. Dit is het meest gebruikte OS in de Raspberry community. Voor de uitlezing van de sensoren en het aansturen van het relaisbord wordt gebruik gemaakt van een Pythonscript. De keuze van Python als programmeertaal vloeit voort uit de grote beschikbaarheid van bibliotheken voor Python en de ondersteuning die Python heeft voor de Raspberry Pi-hardware.

De Raspberry Pi leest de digitale temperatuursensor uit door gebruik te maken van Python. Om de digitale sensor te laten communiceren met de Raspberry Pi wordt er gebruik gemaakt van het Linuxcommando Modprobe. Modprobe is een programma dat automatisch gedetecteerde hardware installeert, dit gebeurt door de hardware specifieke drivers in te laden in de kernel. Voor de DS18B20 zijn dit respectievelijk w1-gpio en w1-therm. Raspbian herkent de temperatuursensor vanaf dit moment als een virtueel bestand.

Om de temperatuur uit te lezen wordt de inhoud van het bestand opgevraagd. In het bestand zitten twee regels tekst. Op het einde van de eerste regel tekst staat vermeld of de meting is gelukt. Wanneer de meting is gelukt bevindt er zich op het einde van de eerste regel: "YES". Op het einde van de 2<sup>de</sup> regel tekst is dan de temperatuur te lezen die de sensor meet. In Figuur 23 is er een virtueel bestand van een one-wire temperatuursensor afgebeeld.

```
pi@raspberrypi /sys/bus/w1/devices/28-0000054a45dd $ cat w1_slave
48 01 4b 46 7f ff 08 10 ad : crc=ad YES
48 01 4b 46 7f ff 08 10 ad t=20500
```

Figuur 23: Virtueel bestand one-wire temperatuursensor

Wanneer de meting niet geldig is en er dus een "NO" op het einde van de eerste regel staat, zal de Raspberry Pi terug opnieuw de temperatuur opvragen van de sensor tot er een meting ontvangen wordt die geldig is.

De temperatuur wordt weergegeven met vijf karakters met drie getallen achter de komma. Omdat de temperatuursensor maar nauwkeurig is op 0,5°C wordt de temperatuur afgerond op 0,5°C.

Voor communicatie over I2C met de druksensor maakt Python gebruik van de SMBuslibrary. SMBus of System Management Bus is vergelijkbaar met I2C en werkt ook samen met I2C-applicaties zolang de snelheid onder de 100kHz blijft.

Eerst wordt het adres (0x28) van de druksensor samen met de leesbit op de datalijn gezet vervolgens wacht het Python script 0,5 seconden en leest het de ontvangen data van de druksensor. De ontvangen data bestaat uit vier bytes. De bytes worden gesplitst en alleen de eerste twee bytes worden opgeslagen. Deze eerst twee bytes bevatten de status bits van de druksensor en de data van de druk meting zelf.

Wanneer de twee statusbits aangeven dat de meting niet geldig is gaat het Python script opnieuw een leesbit versturen om een nieuwe meting op te vragen. Bij een geldige meting worden de laatste zes bits van de eerste byte en de volledige acht bits van de tweede byte opgeslagen voor verdere verwerking. Deze veertien bits bevatten de waarde van de gemeten druk.

De transfertfunctie van de digitale druksensor wordt gegeven door volgende vergelijking:

$$Output = \frac{Output_{max} - Output_{min}}{Druk_{max} - Druk_{min}} \times (Druk - Druk_{min}) + Output_{min} \quad (3)$$

De formule omgevormd:

$$Druk = \frac{(Output - Output_{min}) \times (Druk_{max} - Druk_{min})}{(Output_{max} - Output_{min})} + Druk_{min} \text{ psi} \quad (4)$$

De maximale output en de minimale output moeten worden bepaald door kalibratie. Zonder aangelegde druk heeft de output een waarde van 1648, Dit komt overeen met de minimale output. Bij een aangelegde druk van 1 psi (6894 Pascal of 69mbar) heeft de output een waarde van 14760, dit komt overeen met de maximale output. In Tabel 1 zijn de kalibratiewaarden van de druksensor nog eens samengevat.

**Tabel 1: Kalibratiewaarden van de druksensor**

|                       |       |        |
|-----------------------|-------|--------|
| Output <sub>max</sub> | 14760 | counts |
| Output <sub>min</sub> | 1648  | Counts |
| Druk <sub>max</sub>   | 1     | psi    |
| Druk <sub>min</sub>   | 0     | psi    |

Formule 2 zet de data van de veertien bits om in een druk tussen 0 en 1 Psi. Om een metingen te bekomen in mbar moet de uitkomst worden omgerekend. De volledige Formule wordt dan:

$$Druk = \left[ \frac{(Output - Output_{min}) \times (Druk_{max} - Druk_{min})}{(Output_{max} - Output_{min})} + Druk_{min} \right] \times 68.9475729 \text{ mbar} \quad (5)$$

Na het berekenen van de druk wordt deze afgerond op twee decimalen en opgeslagen.

Een vereiste voor het nieuwe regelsysteem was de mogelijkheid om de biogasinstallatie van op afstand te kunnen monitoren. Het online beschikbaar stellen van de gemeten waarde en andere parameters van

de biogasinstallatie vergemakkelijkt het beheer van de installatie. Er is gekozen voor Google Docs als online dienst omwille van het open karakter en de eenvoudigheid waarmee data kan worden verwerkt. Met een Google account is er een spreadsheet op Google Drive aangemaakt met de naam "Biogasinstallatie\_Log". Python maakt gebruik van de Gspread library voor de communicatie met Google Drive. De spreadsheet is beveiligd met een wachtwoord zodat alleen het Pythonscript bewerkingen kan uitvoeren in de spreadsheet. Zo blijft de meetdata veilig opgeslagen. De spreadsheet kan wel worden weergegeven zonder een wachtwoord te hoeven gebruiken. Dit maakt het eenvoudig om de biogasinstallatie te laten monitoren door meerdere personen.

De functie "WriteToGoogle" behandelt de opslag van de meetgegevens en andere parameters van de biogasinstallatie. Telkens wanneer de functie "WriteToGoogle" wordt uitgevoerd gaat het systeem eerst de verbinding met de Google servers controleren. Bij een slecht werkende internetverbinding zal de Raspberry Pi geen verbinding kunnen maken met Google Drive. Om de ontvangen data van de sensoren en andere parameters van de biogasinstallatie toch te bewaren voor analyse, schrijft het Pythonscript deze gegevens weg naar een logbestand. Elke set van gegevens wordt eerst uitgebreid met een tijdsaanduiding van wanneer de meting is gebeurd. Deze nieuwe set gegevens wordt telkens weggeschreven als een nieuwe rij in het logbestand.

Als de Raspberry Pi bij het oproepen van de "WriteToGoogle" functie wel verbinding kan maken met Google Docs, wordt de inhoud van het logbestand opgevraagd. Vervolgens wordt elke regel apart terug ingelezen beginnend met de eerste regel. Deze regel die een set gegevens voorstelt wordt dan met de functie "append\_row" toegevoegd aan het Google Drive document "Biogasinstallatie\_Log". De functie verwijdert na elke succesvolle opgeslagen regel in het Google Drive document de oorspronkelijke regel in het logbestand.

Het Pythonscript leest om de seconde de waarde van de temperatuursensor in. Elke 10 minuten wordt de data van de temperatuursensor en druksensor opgeslagen in het Google Drive document "Biogasinstallatie\_Log". Telkens wanneer de temperatuur kleiner of gelijk is aan 36°C wordt het warmte-element geactiveerd. Door pin 11 van de Raspberry Pi hoog te maken wordt de relais van het warmte-element ingeschakeld. Als de temperatuur groter of gelijk aan 37°C is wordt het warmte-element gedeactiveerd. Telkens wanneer het warmte-element in of uit wordt geschakeld zal een dataset met de status van het warmte-element worden opgeslagen in het Google Drive document "Biogasinstallatie\_Log".

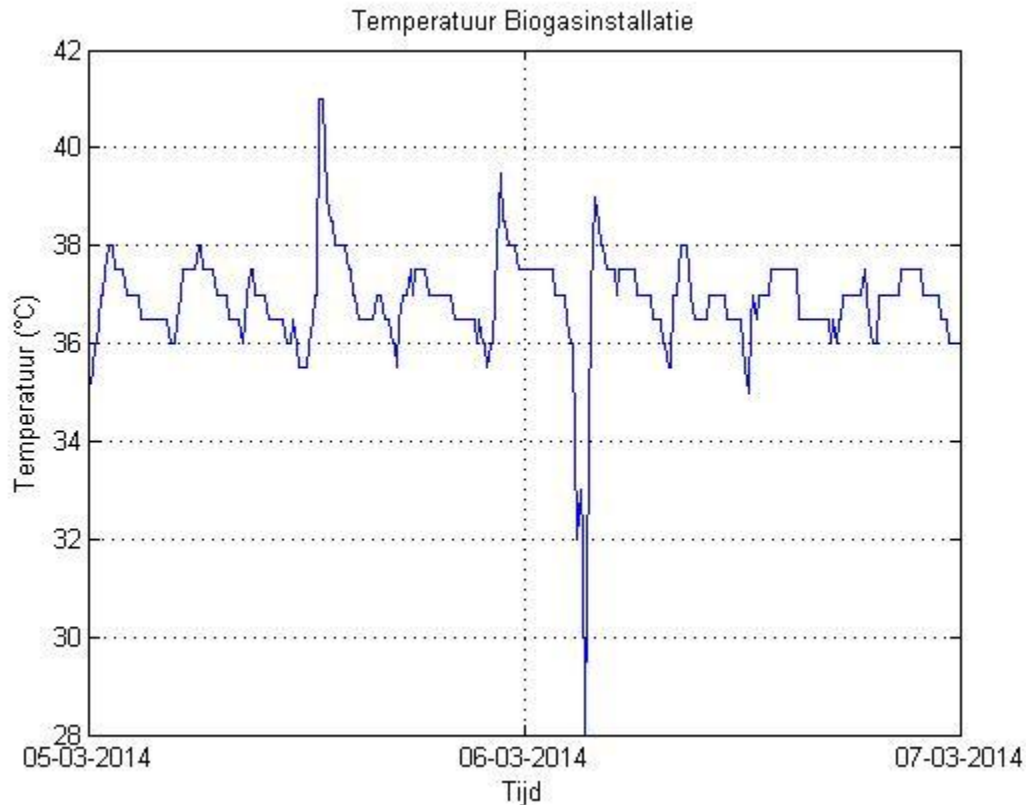
Om schuimvorming tegen te gaan activeert het Pythonscript om het uur de mixer, dit gebeurt door pin 13 van de Raspberry Pi hoog te maken. De mixer werkt gedurende een 15 seconden. Dit is ruim voldoende om de bovenste 20 cm van de biomassa te mixen en het schuim te laten oplossen. Ook hier wordt de status van de mixer opgeslagen in het Google Drive document "Biogasinstallatie\_Log" samen met een tijdsaanduiding.



### 3 Onderzoeksresultaten en discussie

Na optimalisatie van het regelsysteem en het linken van de elektronica aan de ontwikkelde biogasinstallatie, werden er ook metingen uitgevoerd om het ontwikkelde systeem te valoriseren. Er werden 20.000 metingen uitgevoerd door het regelsysteem. Samen met de uitgevoerde gasanalyses kan er een beeld worden gevormd van de werking van de biogasinstallatie. De omzetting van de meetgegevens in grafieken gebeurt met Matlab.

#### 3.1 Temperatuursverloop



Figuur 24: Temperatuur verloop biogasinstallatie

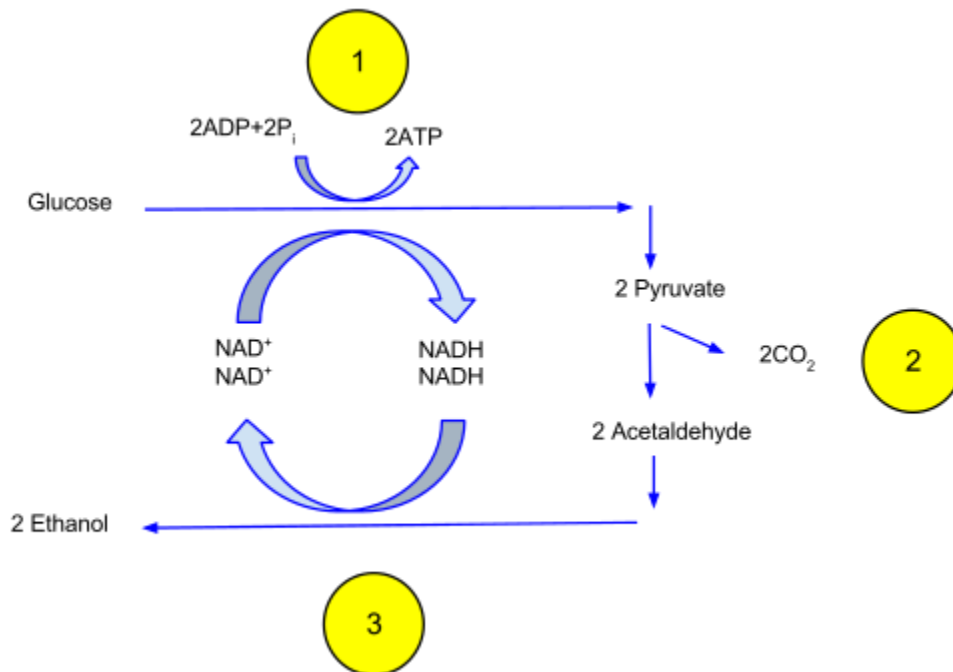
In bovenstaande grafiek wordt de temperatuur van de biomassa weergegeven die gemeten is tussen 5 maart en 7 maart 2014. De werking van het regelsysteem is duidelijk herkenbaar in het verloop van de temperatuur. De biomassa doorloopt telkens een cyclus waar de biomassa afkoelt en dan terug opwarmt. Het warmte-element wordt pas geactiveerd wanneer de temperatuur van de biomassa gelijk of kleiner is dan 36°C en wordt terug uitgeschakeld wanneer de biomassa een temperatuur van 37°C bereikt. Deze grenswaarden verklaren zich in het zigzag patroon van de grafiek.

De piek van 28°C in de temperatuur op 6 maart is te verklaren door menselijk toedoen. Om het vat te controleren op mogelijke lekken werd er water op het deksel gegoten. Dit water met een temperatuur rond 16°C vloeide in de buis waar de temperatuursensor zich bevond en leidde tot een snelle afkoeling van de sensor.

Op de grafiek is te zien dat na drie cyclussen te hebben doorlopen de biomassa blijft stijgen tot het een temperatuur van 41°C heeft bereikt. Deze toename van warmte is niet afkomstig van het verwarmingselement want deze wordt uitgeschakeld bij een temperatuur van 37°C. Twee cyclussen later stijgt de temperatuur van de biomassa weer verder dan 37°C, nu naar 39°C. Een cyclus later doet dit fenomeen zich weer voor en stijgt de biomassa naar 38,5°C.

De energie die de biomassa opwarmt tot temperaturen boven de 37°C moeten afkomstig zijn van een bron anders dan het verwarmingselement.

Een verklaring voor deze temperatuurstijgingen is te vinden in de reactie die de biomassa ondergaat. De vergisting van de biomassa verloopt in vier fasen: hydrolyse, zuurfase, azijnzuurfase en methaangasfase. In de zuurfase worden de organische stoffen omgezet in vetzuren en alcoholen. Organische stoffen zoals glucose worden omgezet in ethanol zoals te zien in Figuur 25.



Figuur 25: Schema glucose omzetting naar ethanol [21].

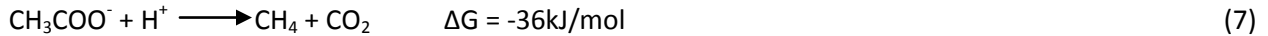
De Glucose wordt samen met 2 mol ADP en 2 mol van het monowaterstoffosfaat  $\text{HPO}_4^{2-}$  omgezet in 2 mol pyruvaat en 2 mol ATP. Vervolgens wordt de 2 mol pyruvaat omgezet in 2 mol acetaldehyde en 2 mol koolstofdioxide. Tenslotte ontstaat 2 mol ethanol uit de 2 mol acetaldehyde. De netto reactie wordt dan gegeven door:



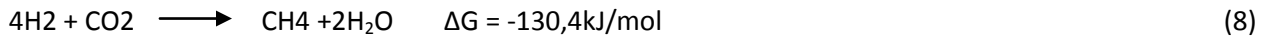
De 24kcal komt overeen met de energetische waarde van 2 mol ATP die vrijkomt. Deze energie komt vrij in de vorm van warmte.



In de laatste fase of methaangas fase wordt azijnzuur, koolstofdioxide en waterstof omgezet in methaan. Deze reactie kan op twee manieren verlopen. Ofwel wordt er methaan en koolstofdioxide gevormd:



Bij de omzetting van azijnzuur naar methaan en koolstofdioxide komt er 36 kilo Joule per mol azijnzuur aan energie vrij. De ander mogelijke reactie die plaats vindt in de methaangasfase is de vorming van methaan en water:

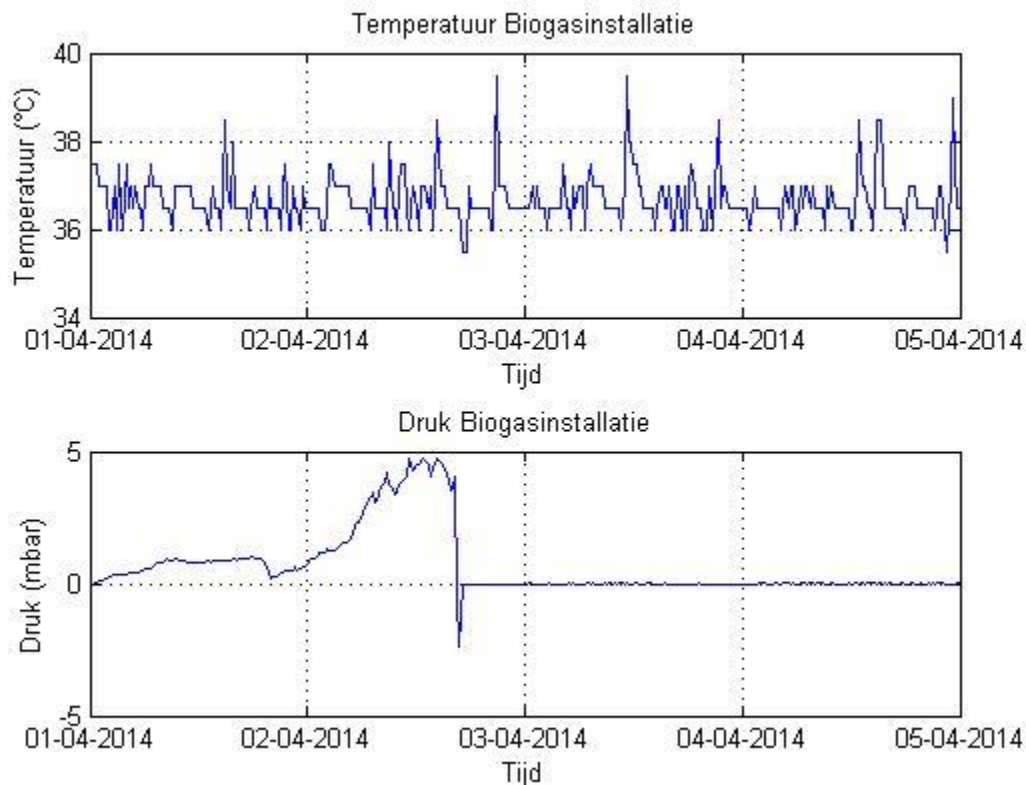


Samen met de vorming van methaan en water komt er 130,4 kJ per mol koolstofdioxide vrij.

De energie die geproduceerd wordt bij de drie reacties komt in de vorm van warmte vrij en draagt dus bij aan de opwarming van de biomassa. De temperatuurstijgingen boven 37°C zijn dus te verklaren door de exotherme reacties van de vergisting[4][22].

De pieken bereiken telkens een lagere temperatuur dan de temperatuur piek ervoor, om dit te verklaren moet er ook rekening gehouden worden met de druk in de biogasinstallatie.

De volgende grafiek geeft de temperatuur en drukmeting weer van de biogasinstallatie van 1 april tot 5 april.



Figuur 26: Temperatuur en druk verloop biogasinstallatie

Net zoals bij de vorige dataset zijn hier ook temperatuur pieken herkenbaar. Op 1 april is er een piek van 38,5°C vervolgens op 2 april nog een piek van 38,5°C. Daarna volgen meer en grotere temperatuurpieken tot 39,5°C. In deze dataset kunnen er twee fases van de biogasinstallatie worden onderscheiden.

In de eerste fase van 1 april tot eind 2 april is er een stijging in de druk. De druk neemt toe van 0 tot 2 mbar om daarna terug te dalen naar 0 mbar. Vervolgens stijgt de druk terug tot 5 mbar. De daling terug naar 0 mbar is een gevolg van het feit dat de gaszakken door de druk openplooiën. Wanneer een gaszak open plooit is er plotseling een toename in het volume en daalt de druk meteen.

De tweede fase loopt van eind 2 april tot 5 april. Op het einde van 2 april werden de gaszakken leeggemaakt en is er dus geen druk in de leidingen en gaszakken. De druk zal pas terug toenemen wanneer de gaszakken volledig gevuld zijn met het geproduceerde gas.

Tijdens de eerste fase zijn er maar twee temperatuurspieken met allebei een temperatuur van 38,5°C. Na het leegmaken van de gaszakken zijn er pieken met een temperatuur van 39,5°C. Dit wijst op een sterkere exotherme reactie in de tweede fase dan in de eerste fase. Een verklaring is te vinden in het principe van Le Châtelier.

Le Châtelier zegt:

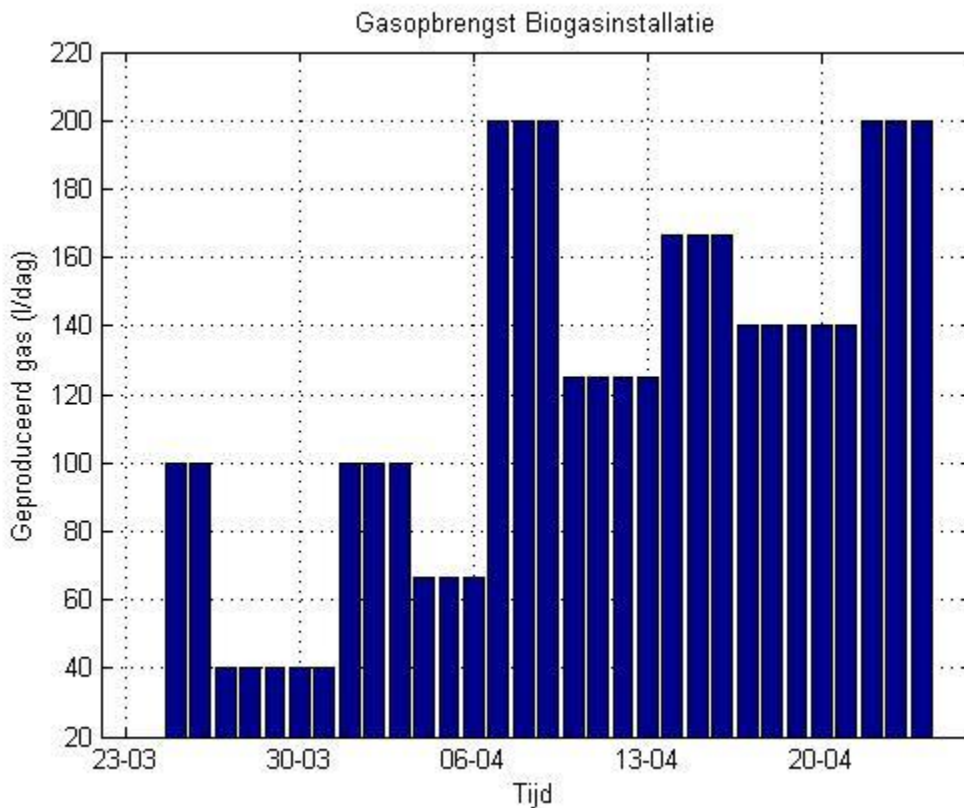
“Als in een chemisch systeem een verandering optreedt in concentratie, temperatuur, volume of totale druk, met andere woorden, een evenwichtsverstoring, dan zal het evenwicht zodanig verschuiven dat die verandering tenietgedaan wordt. Uiteindelijk evolueert het systeem naar een nieuw evenwicht [23].”

Wanneer de druk in de biogasinstallatie 0 mbar bedraagt ligt het chemisch evenwicht van de methaangasproducerende fase helemaal verschoven naar de kant van de reactieproducten (methaan, CO<sub>2</sub> en water). Dan is er dus een aflopende reactie. Naarmate er meer reactieproducten worden gevormd (gas wordt geproduceerd) stijgt de druk. Samen met de druk stijgt ook de concentratie van de reactieproducten. Volgens het principe van Le Châtelier verschuift nu het chemisch evenwicht richting de reagens (CH<sub>3</sub>COOH, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>). Het chemisch evenwicht blijft opschuiven tot de reactie uiteindelijk zeer sterkt vertraagd of stopt [21].

De vertraging van de exotherme reacties heeft als gevolg dat er minder warmte vrijkomt in de biomassa. Dit is zichtbaar in kleinere en minder temperatuurspieken in de eerste fase dan in de tweede fase waar het chemisch evenwicht terug helemaal naar de kant van de reactieproducten ligt.

## 3.2 Gasopbrengst

De gasproductie van de biogasinstallatie is een belangrijke indicator die aangeeft of de biogasinstallatie goed werkt. In volgende grafiek wordt de gasopbrengst weergegeven van 25 maart tot 25 april.



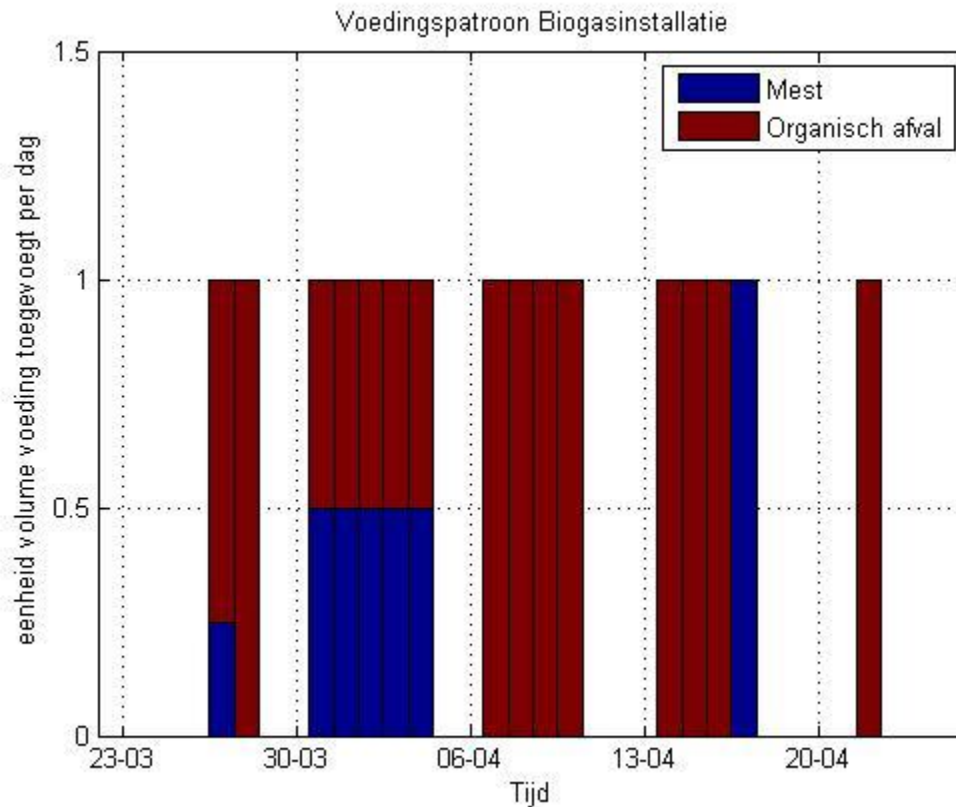
Figuur 27: Gasopbrengst biogasinstallatie

De meting van het geproduceerde gas gebeurt op basis van het volume van de gaszakken. Tot 11 april werd er gebruik gemaakt van gaszakken met een gecombineerd volume van 200 liter. Dit wil zeggen dat tijdens het weekend of op andere dagen, wanneer de gaszakken niet werden leeggemaakt, er maximaal 200 liter gas kon worden opgevangen. Tijdens die dagen kon de gasproductie boven 200 liter dan ook niet worden gemeten. Na 11 april werd er gebruik gemaakt van gaszakken met een gecombineerd volume van 600 liter.

Er zijn duidelijk vier momenten dat de gasproductie gevoelig verminderd. Deze dagen zijn van 27 tot 31 maart, 4 tot 7 april, 10 tot 13 april en 17 tot 22 april. Tijdens deze dagen werden de gaszakken niet geleedigd waardoor er maar een beperkt aantal liter kon worden opgevangen voor meting.

Wanneer deze dagen buiten beschouwing worden gelaten is er een algemene stijging in de gasopbrengst te herkennen. Voor 6 april is bedraagt de gemiddelde gasopbrengst 100 liter per dag, na 6 april verdubbeld de gasopbrengst naar 200 liter per dag.

Deze plotse toename in de gasproductie kan verklaard worden door het voedingspatroon van de biogasinstallatie. De volgende grafiek geeft de verhouding van de voeding weer gedurende de periode van 25 maart tot 25 april:



**Figuur 28: Voedingspatroon biogasinstallatie**

De biogasinstallatie werd gevoed met zowel mest als met organisch afval afkomstig van keukenafval. De installatie werd opgestart met mest maar na een periode werd geleidelijk aan overgeschakeld naar organisch afval als voeding. Deze overschakeling gebeurde in de periode 20 maart tot 7 april. Tussen 31 maart en 4 april bestond de voeding voor de biogasinstallatie uit een mengsel van  $1/2^{\text{de}}$  mest en  $1/2^{\text{de}}$  organisch afval. De dagen tijdens en na deze periode was de gasproductie gemiddeld 100 liter per dag.

Na 6 april verandert het voedingsschema en wordt de biogasinstallatie alleen nog maar gevoed met organisch afval. De gasproductie na 6 april heeft nu een gemiddelde van 200 liter per dag. De energiedichtheid van organisch materiaal ligt hoger dan de energiedichtheid van mest. Dit is te verklaren door het feit dat mest bestaat uit organisch materiaal dat al eens verteerd is geweest en als energiebron heeft gediend. De algemeen hogere energiewaarde van organisch afval is duidelijk terug te zien in de gasproductie. Er kan geconcludeerd worden dat het type voeding een grote impact heeft op de gasvorming.

### 3.3 Kwaliteit

De kwaliteit van het geproduceerde gas kan worden uitgedrukt in percentage methaan aanwezig in het gas. Om dit te bepalen werd er gebruik gemaakt van massaspectroscopie. De metingen werden uitgevoerd Jan Czech van de afdeling Chemie van de universiteit Hasselt. Door een eerder project had hij ervaring in het analyseren van biogas. Tijdens de werking van de biogasininstallatie zijn er acht metingen uitgevoerd op het geproduceerde gas waarvan de resultaten in Tabel 2 zijn weergegeven.

**Tabel 2: Methaangehalte van het geproduceerde biogas**

| Datum     | Methaangehalte (%) |
|-----------|--------------------|
| 26-2-2014 | 9,71               |
| 6-3-2014  | 18,96              |
| 14-3-2014 | 11,31              |
| 28-3-2014 | 6,04               |
| 7-4-2014  | 21,60              |
| 11-4-2014 | 20,04              |
| 17-4-2014 | 41,97              |
| 22-4-2014 | 24,29              |

Het methaangehalte schommelt in de tijd. Om een beter inzicht te krijgen in deze metingen kan er een onderscheid worden gemaakt tussen de periode dat er gevoed werd met mest en de periode dat er gevoed werd met organisch afval. Vanaf 6 april is de biogasininstallatie uitsluitend gevoed geweest met organisch afval. De metingen die voor 6 april zijn gebeurd behoren tot de periode dat er met mest is gevoed.

Volgende tabel geeft het gemiddelde methaangehalte weer van de twee periodes:

**Tabel 3: Gemiddelde methaangehalte biogas**

| Voeding         | Methaangehalte(%) |
|-----------------|-------------------|
| Mest            | 11,51             |
| Organisch afval | 26,98             |

Het gemiddelde methaangehalte tijdens de periode dat er gevoed werd met mest bedraagt 11,51%. Tijdens de periode dat er met organisch afval is gevoed is het methaangehalte van 26,98% beduidend hoger. Een verklaring kan ook hier worden gevonden in de hogere energetische waarde van organisch afval. Per zelfde hoeveelheid mest bevat organisch afval meer organisch afbreekbaar materiaal wat dan voor meer gas- en methaanvorming zorgt.

### 3.4 Kosten-batenanalyse

Om tot een kosten-batenanalyse te komen moeten de totale kosten in acht worden genomen. Onderstaande tabel geeft alle kosten weer die gemaakt zijn om de biogasinstallatie te bouwen.

Tabel 4: Kostprijs biogasinstallatie

| Omschrijving               | Totale prijs<br>(Euro)<br>(incl. btw) |
|----------------------------|---------------------------------------|
| Vat 220 l                  | 20                                    |
| Bocht 80 mm                | 2,09                                  |
| Verbindingsstuk 80 mm      | 8                                     |
| Rioolbuis 110 mm           | 3,6                                   |
| Buis 80 mm 3m              | 8,1                                   |
| 2 Wartels PG21 + MOER 0    | 2,74                                  |
| TEC 7 Grijs polymere       | 10,65                                 |
| Band 200l                  | 10                                    |
| Blender OK OMX 102 W       | 20,99                                 |
| Aftakdoos                  | 8,1                                   |
| digitale temperatuursensor | 11,95                                 |
| Buis Cristal               | 12,5                                  |
| Digitale druksensor        | 33,22                                 |
|                            | 151,94                                |

De totale kostprijs van de biogasinstallatie kwam uit op 151,94 euro incl. btw. De kostprijs van de installatie laag houden was mogelijk door gebruik te maken van onderdelen die gratis verkregen werden zoals Raspberry Pi, kWh meter, isolatie, etc.

De energieopbrengst van de biogasinstallatie wordt berekend op basis van een gasproductie van 200 liter per dag met een methaangehalte van 26,98%. Dit komt overeen met 53,96 liter methaan. Methaan heeft een energetische dichtheid van  $36 \text{ MJ/m}^3$ , dit komt overeen met 0,01 kWh/l. Per dag produceert de biogasinstallatie dan 0,53 kWh aan vermogen [2]. De kWh-meter mat een verbruik van 0,3kWh per dag voor de biogasinstallatie. De energiewinst per dag bedraagt dan:

$$0,53kWh - 0,3kWh = 0,23kWh \quad (9)$$

Wanneer er geen rekening wordt gehouden met de energiewaarde van de biomassa waarmee de vergister wordt gevoed haalt de biogasinstallatie een energiewinst van 0,23 kWh per dag. Met een gemiddelde elektriciteitsprijs van 0,20 euro per kWh en een gasprijs van 0,06 euro per kWh voor een gemiddeld Belgisch gezin kan de winst van de biogasinstallatie worden berekend. Het gebruikte vermogen van 0,3 kWh per dag kost een gemiddeld Belgisch gezin dan 0,06 euro per dag. Per dag bespaart het gezin dan 0,028 euro aan gasverbruik [24]. De dagelijkse opbrengst bedraagt dan:

$$€0,028 - €0,06 = -€0,032 \quad (10)$$

De dagelijkse opbrengst is negatief, de biogasinstallatie kost het gemiddelde gezin dagelijks 0,032 euro. Ondanks de positieve opbrengst aan energie van de biogasinstallatie is deze financieel niet interessant omwille van de hoge elektriciteitsprijs en de lage gasprijs.





## 4 Conclusie

De biogasinstallatie werd opgebouwd uit een vat met een inhoud van 220 liter. Op de bodem van het vat werd een verwarmingselement aangebracht op de biomassa op te warmen. De mixer bovenaan het vat roerde de biomassa om het uur.

Het regelsysteem voor de biogasinstallatie bestond uit een digitale temperatuur en digitale druksensor. Deze sensoren werden uitgelezen door een single-board computer (Raspberry pi). De gegevens van de sensoren werden verwerkt en online opgeslagen in een spreadsheet op Google Drive. De single-board computer stuurde op basis van de meetgegevens het verwarmingselement en de mixer aan.

De biogasinstallatie werd opgestart met koeienmest afkomstig van een werkende biogasinstallatie. De voeding werd aangepast door verloop van de tijd om het effect hiervan op het geproduceerd gas te bestuderen. Gaszakken met een gezamenlijk volume van 1000 liter vangen het geproduceerde gas op.

De vergisting van biomassa is een exotherme reactie. De vrijgekomen warmte draagt mee aan het op temperatuur houden van de biomassa. Dit is belangrijk om een mesofiele reactie te verkrijgen. Door de stijgende druk in de vergister worden de exotherme reacties vertraagd. Dit heeft een negatief effect op de efficiëntie van de vergisting. Door de gaszakken regelmatig te ledigen kan er geen druk worden opgebouwd in de vergister en blijven de exotherme reacties doorgaan.

De voeding van de biogasinstallatie heeft een grote invloed op de gasproductie. Organisch afval zorgt t.o.v. mest voor een hogere gasopbrengst. Van 100 liter per dag bij mest tot 200 liter per dag wanneer er gevoed werd met organisch afval. Het methaangehalte van het gas steeg door het gebruik van organisch materiaal naar een gemiddelde van 26%.

Concreet leverde de biogasinstallatie een dagelijks vermogen van 0,53 kWh. Het verbruik van heel de installatie was 0,3 kWh per dag. De biogasinstallatie bracht netto 0,23 kWh aan vermogen op per dag. Met 0,06 euro kostprijs per kWh aan gas en een kostprijs van 0,20 euro per kWh elektriciteit was de winst per dag negatief. De biogasinstallatie is economisch dus niet rendabel en kost per dag 0,032 euro meer dan wat de installatie opbrengt per dag aan gas.



## Appendix A: Datasheet temperatuursensor



### 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  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  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.

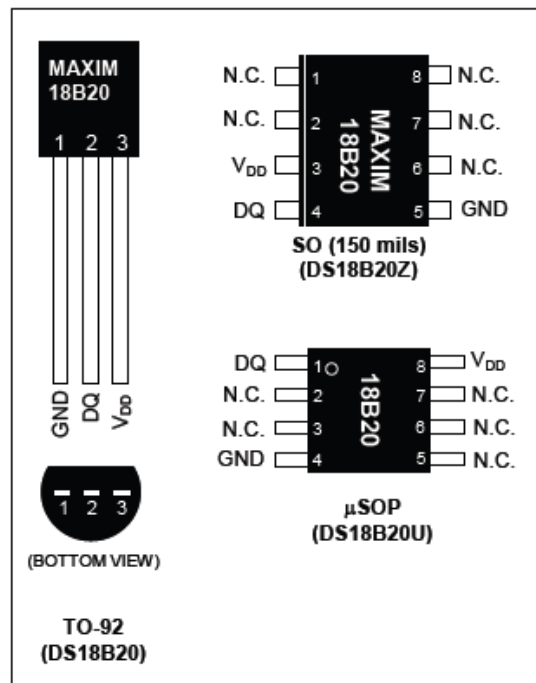
Each DS18B20 has a unique 64-bit serial code, which allows multiple DS18B20s to function on the same 1-Wire bus. Thus, it is simple to use one microprocessor to control many DS18B20s distributed over a large area. Applications that can benefit from this feature include HVAC environmental controls, temperature 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)
- $\pm 0.5^\circ\text{C}$  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  $\mu\text{SOP}$ , 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

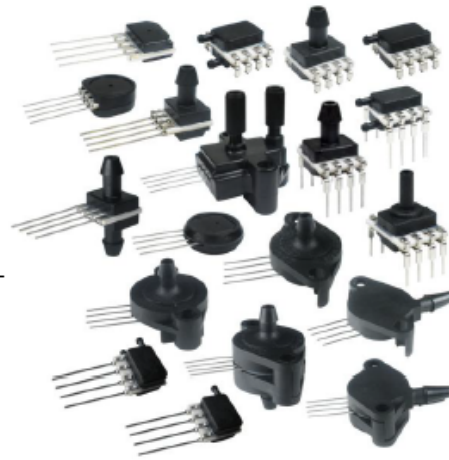


## Appendix B: Datasheet druksensor

# Honeywell

### 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 BFUL (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



## Referenties

- [1] Sustainable Solid Waste Management in India, "Small scale biomethanation (Biogas) in India" <http://www.swmindia.blogspot.be>, 2014
- [2] I.Verboven, "Toepassing van anaerobe vergisting in Senegal" Xios hogeschool Limburg, 2012-2013
- [3] S. Op 't Eynde, "Vergisting van energiegewassen: Biogaspotentieel en afzet restproduct" Hogeschool Wes-Vlaanderen, 2006-2007
- [4] Wikipedia, "Biogasanlage" [de.wikipedia.org/wiki/Biogasanlage](http://de.wikipedia.org/wiki/Biogasanlage), 2014
- [5] West-Vlaams Proefcentrum voor de Akkerbouw, "ADLO demonstratieproject, Digestaat als alternatief voor kunstmest" 2006-2007
- [6] Vlaams Coördinatiecentrum Mestverwerking, "Digestaat" <http://www.vcm-mestverwerking.be>, 2014
- [7] S.Vanoppen, S.Bosmans, "Sensor interfacing biogasininstallatie" Faculteit Industrieel Ingenieur, 2012-2013
- [8] Octopart, "Honeywell 24PCAFA6G." <http://octopart.com>, 2013
- [9] Arduino, "Arduinouno." <http://www.Arduino.cc>, 2013
- [10] Raspberry Pi, "Raspberry Pi." <http://www.raspberrypi.org>, 2013
- [11] Estore, "Electrothermal Single Place Percentage MC227." <http://www.labsource.co.uk>, 2013
- [12] Wattsupmeters, "Smart Circuit 20" <http://www.wattsupmeters.com>, 2014
- [13] Wikipedia, "Blockheizkraftwerk." <http://de.wikipedia.org/wiki/Blockheizkraftwerk>, 2013
- [14] V. Makareviciene, E. Sendzikiene, S. Pukalsas, A. Rimkus, R. Vegneris, "Performance and emission characteristics of biogas used in diesel engine operation" Vilnius Gediminas Technical University, Litouwen, 2013
- [15] World maritime news, "Wartsila Supplies China's First LNG Powered Tugs." <http://www.worldmaritimenews.com>, 2012
- [16] P. brebels, B van de kerkhof, "Optimalisatie van een biogasininstallatie voor kleinschalig gebruik" universiteit Hasselt, 2013-2014
- [17] Arduino, "Serial communication stops after long periods" [forum.arduino.cc](http://forum.arduino.cc), 2014
- [18] Kiwi-elektronics, "Waterbestendige DS18B20 digitale temperatuursensor." <http://www.kiwi-electronics.nl/Waterproof-DS18B20-Digital-temperature-sensor-plus-resistor?search=sensor>, 2014
- [19] Maxim integrated, "DS18B20 Programmable Resolution 1-wire Digital Thermometer" 2008

- [20] Honeywell, "I<sup>2</sup>C Communication with Honeywell Digital Output Pressure Sensors" 2012
- [21] Wikipedia, "Ethanol fermentation."  
[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Ethanol\\_fermentation-1.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Ethanol_fermentation-1.svg), 2013
- [22] Microbewiki, "Methanogens" <http://microbewiki.kenyon.edu/index.php/Methanogens>, 2010
- [23] Wikipedia, "Le Chatelier's principle" [http://en.wikipedia.org/wiki/Le\\_Chatelier's\\_principle](http://en.wikipedia.org/wiki/Le_Chatelier's_principle), 2014
- [24] Vreg, "Hoeveel kost 1kWh elektriciteit en aardgas"  
<http://www.vreg.be/hoeveel-kost-1-kwh-elektriciteit-en-aardgas>, 2014



## **Auteursrechtelijke overeenkomst**

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:  
**Product design en ontwikkeling van een Biogasinstallatie voor thuisgebruik**

Richting: **master in de industriële wetenschappen: elektronica-ICT**  
Jaar: **2014**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

**Bosmans, Sebastiaan**

Datum: **6/06/2014**