

EnergieRijk: Deelproject decentrale bioethanol productie

Auteurs: Roelof Schipperus en Joanneke Spruijt



EnergieRijk; deelproject decentrale bioethanol productie

Auteurs: Roelof Schipperus en Joanneke Spruijt

© 2013 Wageningen, ACRRES – Wageningen UR

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van ACRRES- Wageningen UR.

ACRRES – Wageningen UR is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Projectnummer: 3250106002

Dit project is tot stand gekomen dankzij:



ACRRES – Wageningen UR

Adres : Edelhertweg 1, Lelystad
: Postbus 430, 8200 AK Lelystad
Tel. : 0320 - 29 11 11
Fax : 0320 - 23 04 79
E-mail : info@acrres.nl
Internet : www.acrres.nl

Samenvatting

Byosis (voorheen ZeaFuels) heeft een gepatenteerde technologie ontwikkeld voor de koppeling van een co-vergister aan een bio-ethanol installatie op kleine schaal. In de loop van 2012 heeft ACRRES in samenwerking met Byosis van dit concept een prototype gerealiseerd binnen het zogenaamde EnergieRijk project. Binnen dit onderzoeksproject worden verschillende productieprocessen op pilotschaal aan elkaar gekoppeld worden door reststromen uit het ene proces toe te passen in het andere proces.

Voor de gekoppelde bio-ethanolinstallatie en co-vergister worden maïskorrels en maïsstro gescheiden geoogst. De geoogste maïskorrels worden vervolgens in de bio-ethanol installatie vergist tot bio-ethanol, hierbij ontstaat naast bioethanol een waardevol eiwitrijk veevoer. Het geoogste maïsstro wordt als co-product in de co-vergister omgezet in biogas, dat biogas wordt vervolgens door een warmtekrachtkoppeling omgezet in groene stroom en warmte. De groene stroom wordt geleverd aan het elektriciteitsnet, terwijl de warmte wordt gebruikt voor het bioethanol-proces.

Bij de business case wordt uitgegaan van een tien maal zo grote bio-ethanol installatie zoals die bij ACRRES gerealiseerd is. Het berekende rendement op de investering is dan 37 % en de terugverdientijd is 2,7 jaar. Dit positieve rendement wordt vooral bepaald door de opbrengsten uit het restproduct veevoer. Dit eiwitrijke veevoer heeft naar verwachting een hoge kwaliteit eiwit en goed verteerbare zetmeel en vetten, waardoor de opbrengstprijs hoog is. Bij een voerprijs vergelijkbaar met bierbostel is het resultaat negatief. De bio-ethanol prijs heeft echter een minder grote invloed op het rendement dan de veevoerprijs.

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING.....	3
1 INLEIDING	5
2 GESCHIEDEN OOGST VAN KORRELMAÏS EN STRO	9
3 REALISATIE BIO-ETHANOL INSTALLATIE	11
4 BUSINESS CASE BIO-ETHANOL INSTALLATIE	19
4.1 Vergistingsmodel.....	19
4.2 Uitgangspunten business case.....	27
4.3 Economische resultaten	29
5 RESULTATEN INBEDRIJFSTELLING.....	31
5.1 Voorbewerking	31
5.2 Fermentatie.....	32
5.3 Scheiding.....	33
6 LITERATUUR.....	37

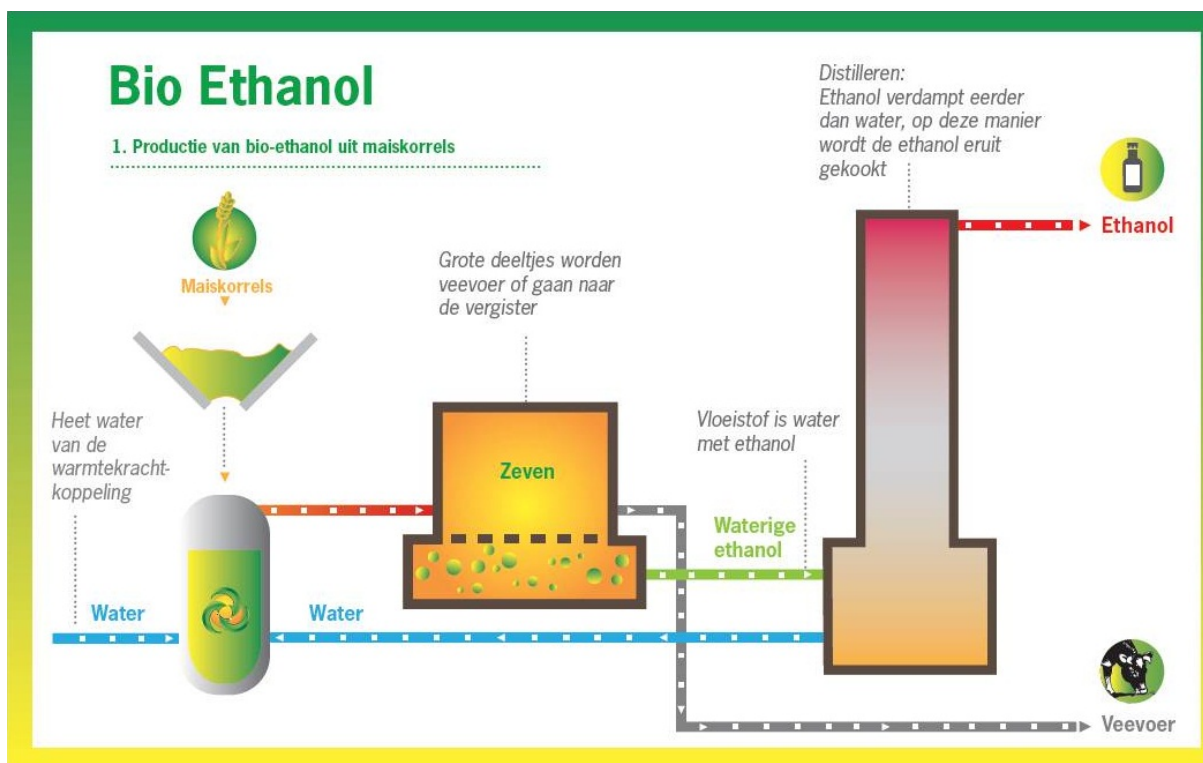
ACRRES - Wageningen UR is het landelijk toepassingscentrum voor duurzame energie en groene grondstoffen. Eén van de grootste projecten van ACRRES is het project EnergieRijk in Lelystad. In dit project werken Wageningen UR en ENECO samen met bedrijfsleven, overheid en onderwijs aan de ontwikkeling van duurzame energieproducten en toepassingen van groene grondstoffen rekening houdend met economische, ecologische en sociale aspecten.

Figuur 1: Visualisatie van het EnergieRijk concept

In de co-vergister wordt rundveemest samen met maïs, maïsstro of berm- of natuurgras omgezet in biogas. Het biogas wordt vervolgens verbrand in een motor (ook wel warmtekrachtkoppeling genoemd) waardoor groene stroom wordt opgewekt, wat geleverd wordt aan het net. Bij de verbranding in de gasmotor komt warmte en CO₂ vrij. De warmte wordt toegepast in de bio-ethanol installatie en in de algenvijvers. De CO₂ wordt in de algenvijvers benut om de algengroei te bevorderen. Nadat het gas uit de mest is gehaald heet het restproduct digestaat. Dit digestaat kan worden gebruikt voor bemesting van de grond en kan bijdragen aan het verminderen van het gebruik van kunstmest. Ook de biomassa-reststroom vanuit de bio-ethanol installatie wordt benut, door deze in te zetten in de co-vergister als co-substraat voor de productie van methaan of voor gebruik als veevoer.

koppeling bio-ethanol productie aan co-vergister

Bio-ethanol is een biobrandstof die toegevoegd kan worden aan benzine en daarna zonder problemen kan worden gebruikt in benzineauto's. Ethanol is eveneens een belangrijke grondstof voor de chemische en farmaceutische industrie. Het wordt onder meer direct gebruikt in cosmetische producten, voor antiseptisch gebruik, maar ook via chemische omzetting voor tal van toepassingen, variërend van grondstoffen voor plastic tot verfingrediënten. Op dit moment wordt ethanol hoofdzakelijk uit aardolie gemaakt, een proces dat veel energie vraagt. De aanleiding voor het onderzoek binnen EnergieRijk is het goedkoper en milieuvriendelijker produceren van bio-ethanol. Nu nog is voor de benodigde warmte brandstof nodig waardoor het produceren van bio-ethanol duurder en minder milieuvriendelijk wordt. Dit kan echter voorkomen worden door het gebruik van restwarmte van een co-vergister. Daarbij is het tweede voordeel dat de resten van bio-ethanol productie weer gebruikt kunnen worden als veevoer. Deze resten zijn rijk aan eiwit en hebben daardoor een hoge waarde. In Figuur 2 is te zien hoe deze kringloop werkt.



Figuur 2: Bio-ethanol schema

In de huidige landbouwpraktijk wordt bij snijmaïs de gehele plant (korrels en stro) verhaakseld en bij korrelmaïs wordt alleen de maïs gedorst en blijft het stro op het land. Binnen het EnergieRijk concept is het van belang om de maïskorrel en het stro gescheiden te oogsten. De maïskorrels worden gebruikt in de bio-ethanol installatie en het stro kan als voeding voor de co-vergister gebruikt worden.

Doelstellingen van het deelproject Bio-ethanol van EnergieRijk zijn:

1. Realisatie van een bio-ethanol installatie, waarbij de restwarmte van de warmtekrachtkoppeling van de co-vergister wordt toegepast.
2. Realisatie van gescheiden oogst van maïskorrels en maïsstro.
3. Opstellen van een business case waarmee de rentabiliteit inzichtelijk wordt.
4. Onderzoek naar de geschiktheid en de waarde van restproducten als veevoer.
5. Toetsen van de behaalde resultaten aan de verwachtingen in het business model.
6. Onderzoek naar duurzaamheidsaspecten als de vermeden CO₂ emissie en de verbetering van de energieopbrengst per ha.

In dit rapport worden punt 1 t/m 5 behandeld. In een volgend rapport wordt over de duurzaamheidsaspecten gerapporteerd.

2 Gescheiden oogst van korrelmaïs en stro

Voor de bio-ethanol en veevoer productie wordt geen snijmaïs maar korrelmaïs gebruikt. Snijmaïs wordt geteeld voor ruwvoer of voor co vergisting, waarbij zowel de kolf als het blad en de stengels verhakseld worden. Korrelmaïs wordt meestal afgezet in de mengvoerindustrie. Korrelmaïs wordt alleen voor de droge korrel geteeld, het stro blijft in de huidige landbouwpraktijk op het land. Binnen het EnergieRijk concept is het van belang om naast de maïskorrel voor de bio-ethanol installatie ook de rest van de plant te oogsten, zodat dat als voeding voor de co-vergister gebruikt kan worden.

Op dit moment moet het oogsten van de korrelmaïs en de rest van de plant nog gescheiden gebeuren, omdat er (nog) geen machines zijn die dit in één werkgang kunnen. In Amerika zijn er wel ontwikkelingen op dit gebied. John Deere heeft bijvoorbeeld in samenwerking met de Iowa State University een 'dual stream' machine ontwikkeld.

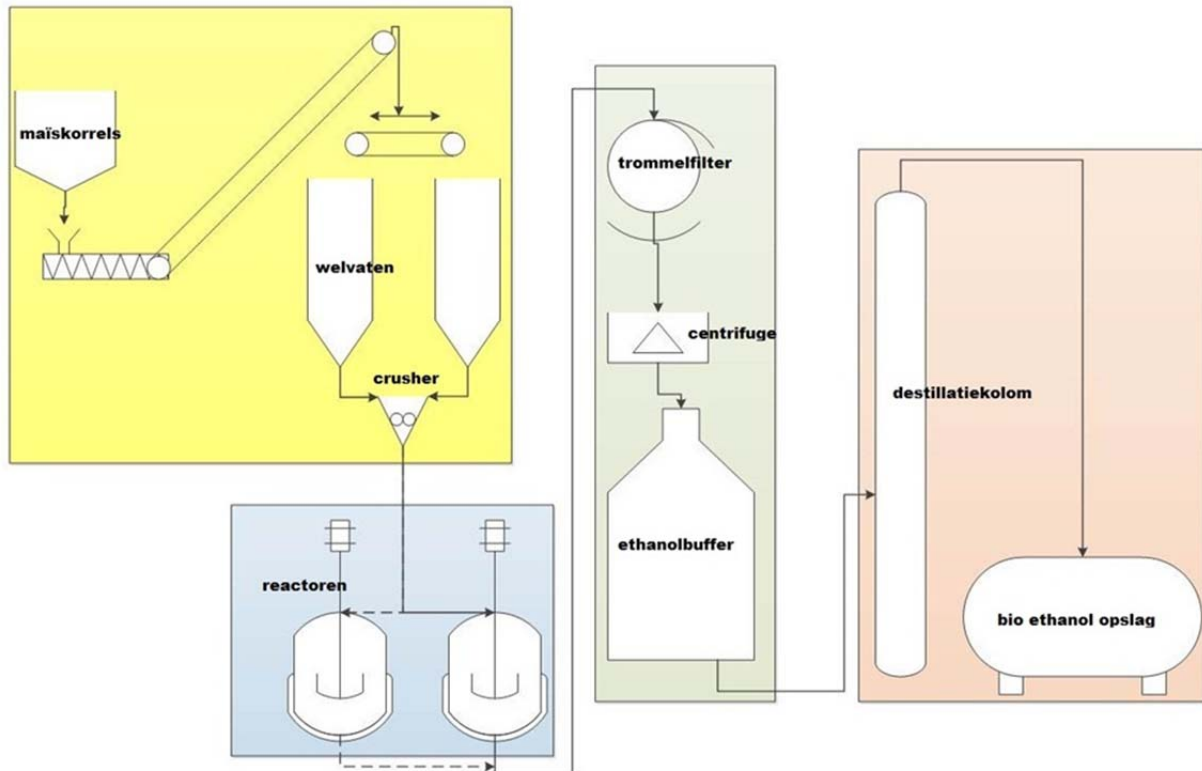
Omdat er in Nederland nog geen machine beschikbaar is waarin dit in één werkgang kan, gebeurt het oogsten in twee fasen. Eerst wordt de korrelmaïs gedorst met een combine. Vervolgens wordt het maïsstro met een Acrobaat hark verzameld en wordt het verzamelde maïsstro gehakseld d.m.v. een hakselaar voorzien van een grasbek. Naast het maaidorsen zijn er dus ook voor het oogsten van de restplant nog twee werkgangen nodig. Het oogsten van de plantresten is ook met een opraapwagen geprobeerd. Het verzamelen ging goed, maar de plantresten werden door de opraapwagen onvoldoende verhakseld voor gebruik in de vergister.



Figuur 3: Maïskolf vóór het maaidorsen en gehakselde plantresten na het dorsen van de korrels

3 Realisatie bio-ethanol installatie

Het koppelen van de co-vergister aan een bio-ethanol installatie op kleine schaal is een door Byosis (ZeaFuels) gepatenteerde technologie (WO-2009/110790 A2). ACRRES heeft in samenwerking met Byosis een prototype gerealiseerd van dit concept. Het proces wordt hieronder omschreven en weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4: Proces schema bio ethanol installatie

Korrelmaïs wordt gedorst bij een droge stof gehalte van ongeveer 75 %. De maïskorrels worden vanuit slurfsilo's in de **welvaten** gebracht. Daar worden de korrels geweekt in heet water om het vochtgehalte in de korrels verhogen, en het zetmeel te gelyken. Hierdoor wordt de maïskorrel zachter zodat het pletten makkelijker gaat, ook is het zetmeel beter beschikbaar voor het vergistingsproces. Bij het wellen wordt gebruik gemaakt van proceswater dat is verwarmd met de restwarmte van de WKK.



Foto 1: Maïskorrels worden omhoog getransporteerd naar de welvaten

De gewelde en geleerde maïskorrels worden gekoeld en vervolgens geplet in de **crusher**, zodat de huid openbarst en het zetmeel vrijkomt, hierdoor kunnen de enzymen nog makkelijker bij het zetmeel.

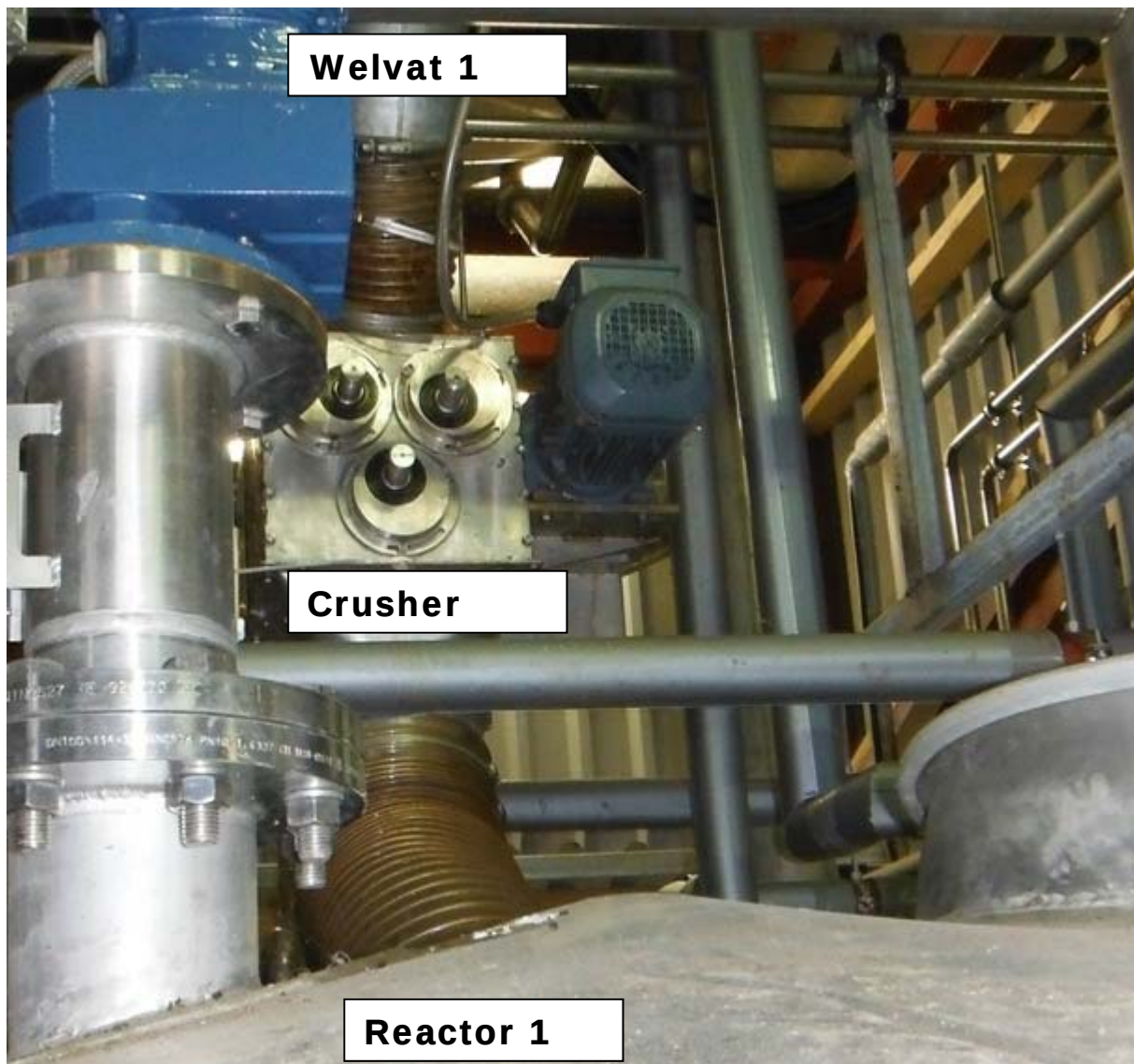


Foto 2: Aanzicht crusher met toevoer uit de twee welvaten

Vanuit de crusher vallen de geplette maiskorrels in de één van beide **reactoren**. Daar worden enzymen en gist aan de geplette maiskorrels toegevoegd, enzymen zetten zetmeel om in suikers waarna gist de suikers omzet naar ethanol. Het proces is zo afgestemd dat de uitgaande stroom circa 7% ethanol bevat.



Foto 3: Reactoren

Na de vergisting wordt met een **trommelfilter** de grove vaste delen uit het maïsbiër gehaald, deze vaste delen bevatten een hoog gehalte aan eiwit en zijn daarmee waardevol als veevoer.



Foto 4: Trommelfilter

In de **centrifuge** worden vervolgens de kleine vaste delen uit het maïsbiër gehaald. Deze fractie bevat een hoog gehalte aan gist en wordt gedeeltelijk geretourneerd naar de reactor om het vergistingsproces te versnellen. Het andere gedeelte is geschikt als veevoer.



Foto 5: Centrifuge

In de **destillatiekolom** wordt het maïsbiertje (7% ethanol) tot koken verhit. Dit gebeurt met heet water opgewarmd door de gasmotor van de co-vergister. De opgevangen ethanolvloeistof bevat circa 60% ethanol. Dit betekent dat uit iedere 100 liter maïsbiertje zo'n 11-12 liter 60% ethanol wordt gedistilleerd. Ook het (hete) water wordt opgevangen en hergebruikt als proceswater voor het welpproces.



Foto 6: Destillatiekolom

De verrijkte ethanol komt in een **bio-ethanol opslagvat** onder de grond. Dit vat wordt meerdere malen per jaar gelegeerd door een tankauto waarna het elders verder verrijkt wordt om te kunnen gebruiken als bio brandstof of als grondstof voor de farmaceutische of chemische industrie.



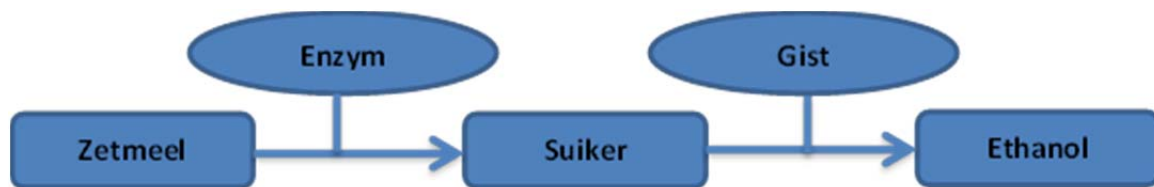
Foto 7: Reguliere Euro 95 is voor 5% aangemengd met bio-ethanol

4 Business case bio-ethanol installatie

4.1 Vergistingsmodel

Inleiding

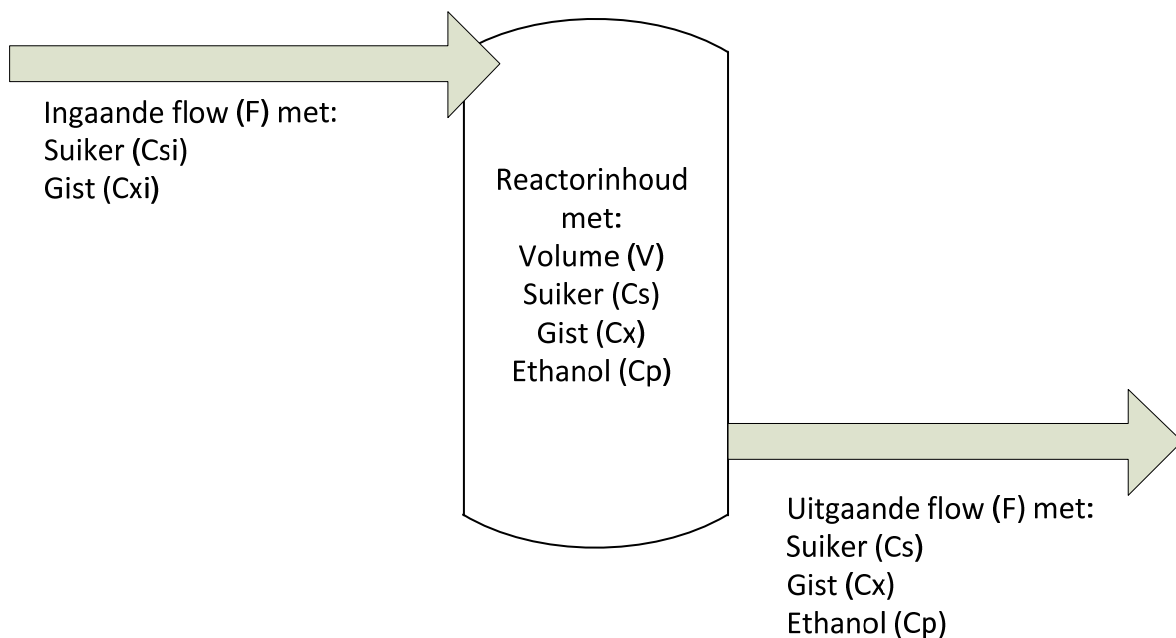
Met de installatie wordt 60% ethanol gemaakt, hierbij vindt de eigenlijke ethanolproductie plaats binnen de reactor middels omzetting van zetmeel naar ethanol waarna de bio-ethanol in de rest van het proces wordt opgewerkt naar >60% ethanol in water. Deze omzetting van zetmeel naar ethanol vindt plaats in twee afzonderlijke stappen, elk met een eigen katalysator; eerst wordt het zetmeel afgebroken tot vergistbare suikers door een enzympreparaat, daarna worden deze suikers door gist omgezet in ethanol (Figuur 5).



Figuur 5: Omzetting van zetmeel naar ethanol

De omzetting van zetmeel naar ethanol is de tempobepalende basis waaromheen de rest van de installatie functioneert, daarom is het belangrijk om juist deze omzetting goed onder controle te krijgen en zo de ethanolproductie te maximaliseren. Hierbij is vooral de tweede stap beperkend voor de productie van ethanol, de omzetting van zetmeel naar suikers is slechts in mindere mate afhankelijk van de concentratie suikers of zetmeel en kan versneld worden door de toevoeging van een grotere concentratie enzym. De omzetting van suikers naar ethanol wordt daarentegen gekatalyseerd door gist, in tegenstelling tot het enzympreparaat is continue toevoeging niet noodzakelijk zolang de groei van gist in de reactor gelijk blijft aan de afvoer van gist met het eindproduct. Uiteraard is hierbij direct de vraag hoe snel de gist zal groeien, en of er met extra toevoeging een betere productie bereikt kan worden. Gelukkig is juist van de vergisting al een hoop bekend, ook in wetenschappelijke literatuur, zodat er een model gemaakt kan worden [1, 2].

De omzetting van suikers naar ethanol vind plaats onder anaerobe omstandigheden, waarbij de gist via deze omzetting energie produceert voor groei. De productie van ethanol is dan ook direct gerelateerd aan de groeisnelheid van de gistculture, en afhankelijk van een verscheidene procesparameters die van invloed zijn op de groei. Een aantal van die procesparameters kan gemakkelijk optimaal gehouden worden, zoals bijvoorbeeld de temperatuur en de pH. Andere invloedrijke parameters zoals de concentratie suiker, ethanol, gist zijn indirect beïnvloedbaar door het debiet door de installatie te variëren. Hierbij geldt in een continuproces dat een stabiele situatie gewenst is, waarbij het debiet en de verscheidene concentraties niet veranderen in de tijd; dit wordt ook wel een steady state genoemd. Als er geen gist in de ingaande stroom wordt toegevoerd, zal bij een steady state de productie van gist in de reactor gelijk zijn aan de hoeveelheid gist die verdwijnt in de uitgaande stroom. Aangenomen dat de beschikbare suikers volledig worden omgezet in ethanol is ook de opname van suikers gelijk aan de toegevoegde hoeveelheid suikers uit de ingaande stroom, en zal de hoeveelheid geproduceerd alcohol gelijk zijn aan de hoeveelheid alcohol die wordt afgevoerd in de uitgaande stroom. Gecombineerd met een ideale menging zullen bovendien de concentraties gist, ethanol en suikers in de uitgaande stroom gelijk zijn aan de concentraties in de reactor (Figuur 6).



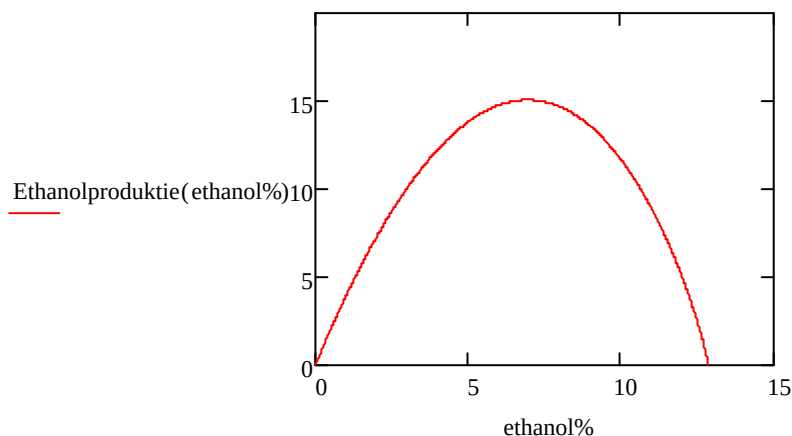
Figuur 6: Processchema continucultures

Optimum ethanolpercentage

Omdat bij een continuproces de productstroom dezelfde concentraties aan product bevat als de inhoud van de reactor is het gewenste alcoholpercentage een belangrijke procesparameter. Het is namelijk zo dat alcohol een groei-inhibitie tot gevolg heeft bij hogere concentraties. Voor het alcoholproductieproces betekent dit dat bij hogere alcoholpercentages in de productstroom de groei van de gist in de reactor teveel geremd wordt, daardoor zijn hogere alcoholconcentraties alleen mogelijk bij een lage verdunningssnelheid ofwel bij een lage flow. In het tegenovergestelde, dus bij lagere ethanolconcentraties, is weliswaar de groeisnelheid van de gist hoger maar is de totale hoeveelheid geproduceerd ethanol laag omdat de beschikbare suikers niet langer volledig worden omgezet in ethanol. Met gegevens uit de literatuur kan de remmende werking van de ethanolconcentratie in de reactor (en dus ook in de productstroom) op de groeisnelheid van gist berekend worden (zie onderstaande formule, overgenomen uit [2]).

$$\text{Groeisnelheid} = \text{maximale groeisnelheid} * \left(\frac{\text{ethanol}\%}{\text{maximale ethanol}\%} \right)^{\text{Constante}}$$

Aangezien de groeisnelheid direct gerelateerd is aan de verdunningssnelheid en dus het debiet in de installatie kan van daaruit berekend worden bij welk percentage ethanol de productie maximaal is; dat blijkt bij 6.95%_{vol} (Figuur 7).

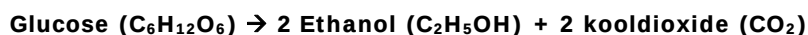


Figuur 7: De totale alcoholproductie op de Y-as (Ethanolproductie(ethanol%) in arbitraire eenheden), uitgezet tegen het alcoholpercentage in de productstroom op de X-as (ethanol% in volume% alcohol)

De productie is maximaal bij een ethanolconcentratie van 7%vol door de remmende werking van hogere ethanolconcentraties.

Benodigde concentratie maiskorrels

Aangezien voor de efficiëntie een zo hoog mogelijke substraatomzetting gewenst is kan bij een gewenst alcoholpercentage van 6.95% de benodigde hoeveelheid substraat (maiskorrels) berekend worden. Als eerste kan vanuit de ethanol berekend worden hoeveel suiker er benodigd is, op basis van de chemische omzetting formule wordt namelijk 1 molecuul glucose omgezet in 2 moleculen ethanol en 2 moleculen CO₂.



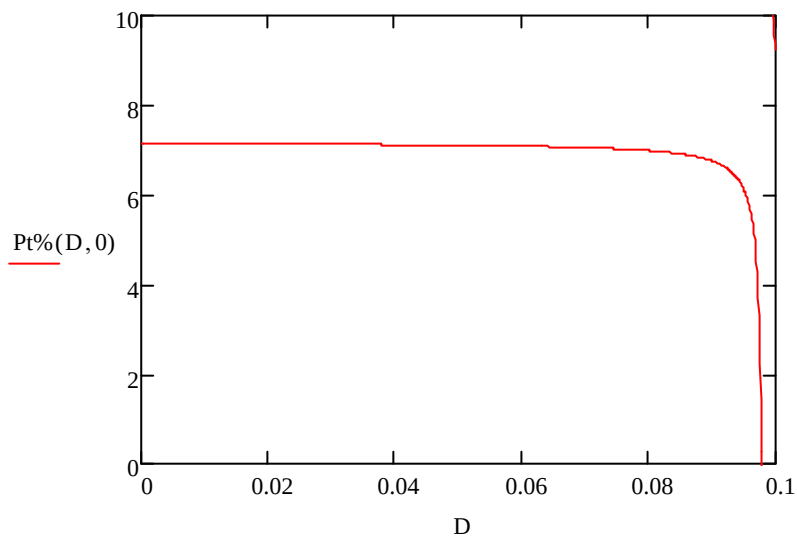
Teruggerekend van 7 volumeprocent alcohol (met een dichtheid van 0.7 kg/l voor ethanol) is de optimale concentratie alcohol voor het continuproces 5 gewichtsprocent, ofwel 50 g/l ethanol. Als grondstof is dan $50 / (2 * 46) * 180 = 100 \text{ g/l}$ glucose nodig. Echter, we gebruiken als grondstof mais met een droge stof gehalte van 70%, van die droge stof is ongeveer 80% zetmeel en vanuit die zetmeel wordt door enzymatische hydrolyse ongeveer 80% omgezet in vergistbare suikers. Voor een oplossing van 100g glucose is dan ook nodig een totaal van $100 / (0.7 * 0.8 * 0.8) = 220 \text{ g/l}$ mais.

Aangezien de genoemde percentages enkel een inschatting zijn, en de daadwerkelijke percentages van grote invloed zijn op het productieproces, is het belangrijk om bij de productie regelmatig de kwaliteit van de maiskorrels te controleren en het proces op de analyseresultaten aan te passen.

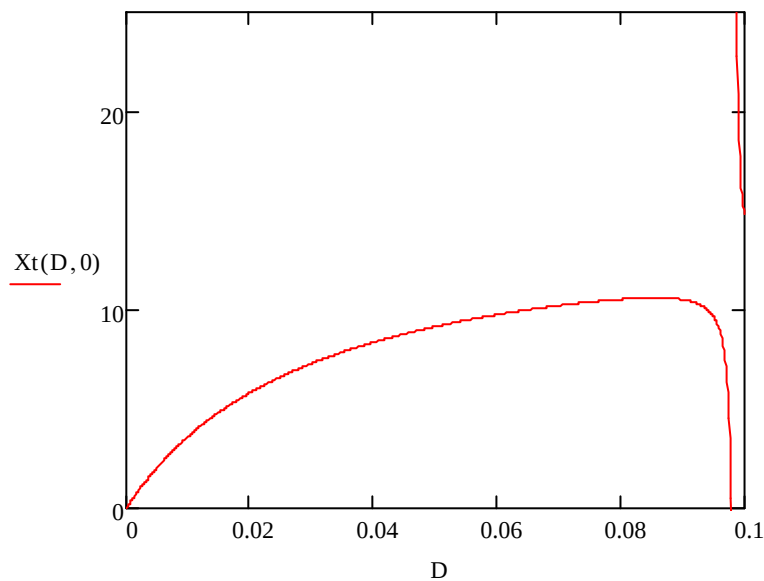
Het alcoholpercentage is in te stellen door middel van de hoeveelheid mais per liter te variëren. Deze zal afhangen van de oogst en de bewaartijd van de maiskorrels. Het uitgangspunt voor de ethanolinstallatie wordt een alcoholpercentage van 7%. Belangrijk blijft wel hierbij na te gaan of het zetmeel volledig omgezet wordt in vergistbare suikers, indien dit niet het geval is zal een hogere dosering enzympreparaat gebruikt worden.

Inschatting van het maximale debiet

Uitgaande van een gewenst alcoholpercentage van 7%_{vol}, de daarvoor benodigde hoeveelheid maiskorrels bekend van 220 g/l, en een inschatting van de maximale groeisnelheid van de gist kan een model gemaakt worden van de invloed van het debiet door de installatie op de gist, suiker, en ethanolconcentratie in de reactor. Hierbij wordt gekeken naar de steady state; het stabiele eindpunt dat zich na verloop van tijd automatisch zal instellen. Voor de berekening is daarvoor het debiet omgezet in de verdunningssnelheid (D) die berekend wordt door het debiet (in liter per uur) te delen door het volume in de reactor (in liters). Boven een kritische verdunningssnelheid is de groei van de gistcultuur lager dan de snelheid waarmee de gist afgevoerd wordt, het resultaat is dat er na verloop van tijd geen gist meer in de reactor aanwezig is en dus ook geen ethanol geproduceerd wordt. Als steady state is er dan ook geen gist of ethanol aanwezig. Onder het kritische debiet zal alle suiker omgezet worden in ethanol, waarbij 7%_{vol} ethanol geproduceerd wordt. Pas tegen het kritische debiet aan zal dit niet langer het geval zijn en loopt de ethanolconcentratie ($Pt\%(D)$) terug (Figuur 7), voor een stabiel proces is het handiger een verdunningssnelheid iets verder van het kritisch debiet af te kiezen. Voor de gistconcentratie ($Xt(D)$) geldt dat deze afneemt bij een lager debiet (Figuur 8). Dit wordt veroorzaakt doordat een gedeelte van de suikers gebruikt wordt om de aanwezige gist in leven te houden, pas als in die behoefte is voorzien kan de gist groeien. Bij een laag debiet wordt bijna alle toegevoegde suiker gebruikt voor het levensonderhoud, dichterbij het kritische debiet is er voldoende suikertoevoer om een hogere gistconcentratie te voorzien in levensonderhoud.



Figuur 8: Alcoholpercentage $Pt\%(D,0)$ in de productstroom als functie van de verdunningssnelheid (D)



Figuur 9: Biomassaconcentratie ($X_t(D,0)$) in g/l in de productstroom als functie van de verdunningssnelheid (D)

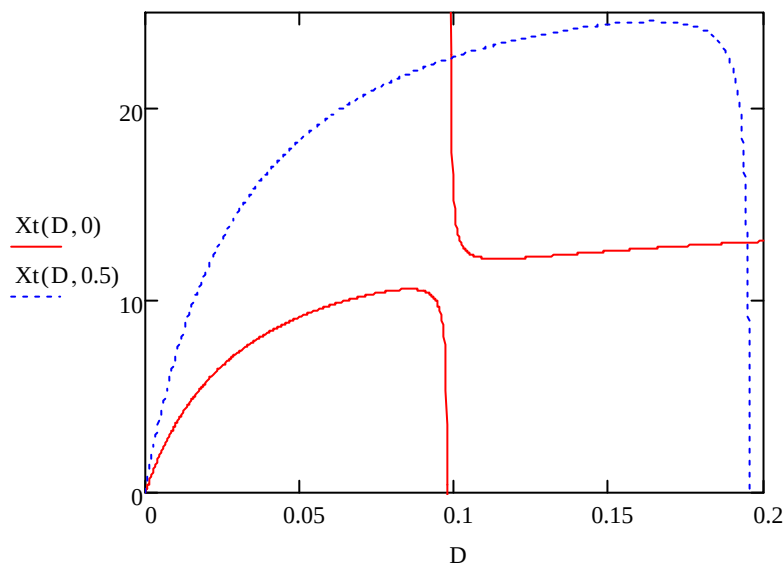
Aan de hand van een operationele verdunningssnelheid van circa 0.09 h^{-1} en een reactorinhoud van 1750 liter geeft dit een debiet van $0.09 \cdot 1750 = 157 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$. De maximale productie van 60% ethanol zonder toevoeging van extra gist wordt ingeschat op 18 l per uur ($157 \cdot 7\% \cdot 100/60$) ofwel $\sim 400 \text{ l}$ per dag. Aangezien de maximale groeisnelheid gebaseerd is op literatuurwaardes die variëren van 0.1 tot 0.5 h^{-1} is dit een eerste inschatting van de maximale productie die in de praktijksituatie geverifieerd zal worden.

Uitgaande van een maximale groeisnelheid van 0.25 h^{-1} is de maximale verdunningssnelheid in de reactor 0.095 h^{-1} , met een kleine marge geeft dit een operationeel debiet van $0.09 \cdot 1750 = 157 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$.

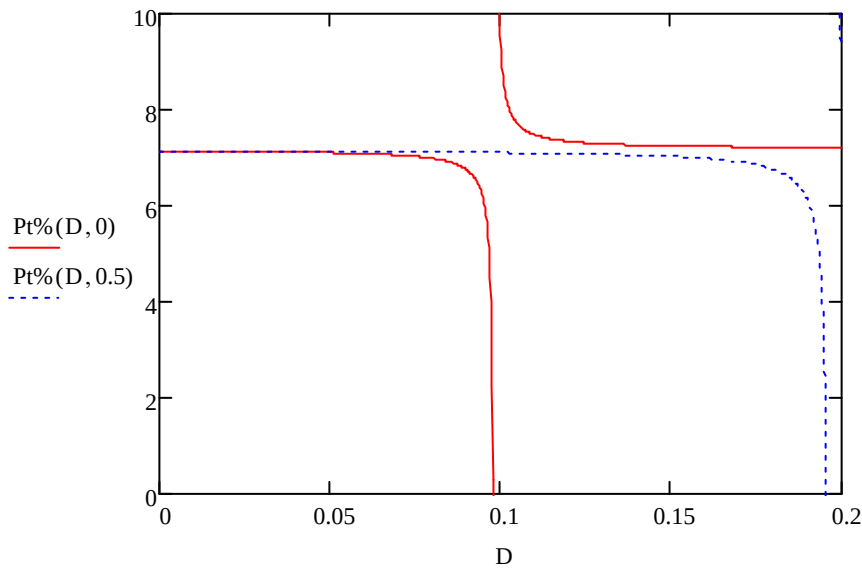
Omdat de maximale groeisnelheid nogal varieert in de literatuur (0.1 tot 0.5 h^{-1}) zal de uitspoelsnelheid getest worden in de praktijksituatie. De maximale productie van 60% ethanol zonder toevoeging van extra gist wordt ingeschat op 18 l per uur ($157 \cdot 7\% \cdot 100/60$) ofwel $\sim 400 \text{ l}$ per dag.

Cel-recycling en continu- gisttoevoer

Zoals in het bovenstaande beschreven is de productiesnelheid vooral beperkt door de snelheid waarmee gist suiker omzet in ethanol. Net als de omzetting van zetmeel naar suiker is de snelheid waarmee de omzetting plaatsvindt te verhogen door de concentratie aan gist in de reactor te verhogen. Dit is mogelijk door gist vanuit de centrifuge terug te voeren in de reactor. Hiermee wordt effectief de afvoer van gistcellen verlaagd, en daarmee de verdunningssnelheid van gistcellen in de reactor verlaagd. Door een percentage (X%) cellen te recyclen neemt ook de verdunningstijd in de fermentor met een factor X af, ofwel; als 50% van de gistcellen uit de productstroom teruggevoerd kan worden in de reactor, is de totale afvoer van gistcellen met een factor 2 afgenomen (concentratie gist in de afvoer is immers 50% van de concentratie gist in de reactor). Bij een onveranderd debiet is het directe gevolg is een hogere gistconcentratie in de reactor. Echter, door de hogere gistconcentratie is het mogelijk om een hoger debiet in te stellen, want bij een terugvoer van een fractie X neemt het maximale debiet in de installatie toe met een factor $1/(1-X)$; als 50% van de gistcellen teruggevoerd wordt neemt het maximale debiet toe tot 200%, in de ethanolinstallatie kan de productie verhoogd worden tot een debiet van 300 l/h. (Hierbij wordt de snelheid van wellen misschien limiterend voor de productie) In het geval van 50% recycling wordt de productie dus ongeveer 2 keer groter; 800 l/dag.



Figuur 10: Biomassaconcentratie als functie van de verdunningstijd voor de situatie zonder celrecycling ($X_t(D, 0)$) en met 50% celrecycling ($X_t(D, 0.5)$) in g/l



Figuur 11: Ethanolconcentratie als functie van de verdunningstijd voor de situatie zonder celrecycling ($Pt\%(D, 0)$) en met 50% celrecycling ($Pt\%(D, 0.5)$), de ethanolconcentratie is gegeven in volumepercenten

Hetzelfde effect kan bereikt worden door toevoeging van verse gist, bijvoorbeeld voor een simulatie van celrecycling of om het recyclen van contaminerende organismen in de reactor te voorkomen. Voor de bovenstaande situatie met 50% recycling betekend dit een toevoeging van 15 g gist per liter maisoplossing. Uitgaande van een debiet van 300 l/h betekend dit een gisttoevoeging van 4.5 kg gist per uur.

50% celrecycling vanaf de centrifuge geeft een verhoging van de alcoholproductie tot 200% ofwel 300 liter 7%vol alcohol per uur. Door gisttoevoeging is hetzelfde effect te bereiken, voor een debiet van 300 liter per uur moet dan per uur 4.5 kg gist worden toegevoegd.

4.2 Uitgangspunten business case

Bij de business case wordt uitgegaan van een tien maal zo grote bio-ethanol en veevoer installatie zoals die bij ACRRES gerealiseerd is, waarbij de warmte van de WKK van de co-vergister gebruikt wordt voor de ethanolproductie. In de berekeningen is uitgegaan van een aantal aannames van voordat de bio-ethanol installatie productief werd:

- Op basis van het hiervoor beschreven vergistingsmodel is uitgegaan van een alcoholpercentage van 7% in de reactor en van 60% in het destillaat en een debiet van 3.000 liter per uur van het welvat naar de reactor door terugvoeren van de helft van de gistfractie die na centrifugeren overblijft.
- De maïs heeft een droge stofgehalte van 70%, waarvan 70% uit zetmeel bestaat. De omzettingsefficiëntie van zetmeel in vergistbare suikers is 80%.
- Er is uitgegaan van een geschatte gemiddelde continue warmtevraag van 309 kWh, waarbij de warmteafname volledig gelijk is gesteld aan de behoefte.
- Er wordt naar schatting 400.000 kWh stroom verbruikt voor de productie van 3 miljoen liter ethanol.
- Het destillaat (60% ethanol) wordt met tankauto's van 30 ton opgehaald en elders verder opgewerkt.
- De benodigde arbeid is ingeschat op 23 uur per week laagwaardige arbeid en 3 uur per week hoogwaardige arbeid.
- Er is ongeveer 500 m² grond nodig voor de installatie.
- De totale benodigde investering voor deze bio-ethanol en veevoer installatie wordt ingeschat op 1,5 M€.

opbrengstprijzen

De opbrengsten bestaan uit opbrengsten uit bio-ethanol, veevoer en de te verwachten SDE subsidie voor de warmteterugwinning.

Bio-ethanol (100 %) brengt 702 €/m³ op (FOB-T2 (Rotterdam) prijs, juli 2012), dat is dus 421 €/m³ 60 % ethanol. Het eindproduct van de ACRRES bio-ethanol installatie bevat 60% ethanol en moet elders nog opgewerkt worden. De transportkosten bedragen ongeveer €750 per tankauto van 30 ton (o.b.v. 200 km enkele reis), dat is 25 €/m³ 60 % ethanol. Verder kost het opwerken circa 60 €/m³ (diverse marktpartijen 2011). De opbrengstprijs van 60% ethanol is dan 336 €/m³.

De opbrengstprijs van het veevoer hangt af van de eiwitwaarde die het eindproduct heeft. Als het product ongeveer gelijkwaardig is aan bierbostel dan levert het ongeveer € 0,25 per kg droge stof op . Maar het product heeft een hoge eiwitwaarde, een flink deel vetten en een fractie heel goed verteerbaar eiwit en kan dan ongeveer € 0,50 per kg droge stof opbrengen.

De SDE subsidie 2012 voor warmteterugwinning minus de correctie in de 1e fase 2012 is als volgt:
 $19,444 - 13,7 = 5,744$ €/GJ. Eén GJ is ca. 278 kWh, dus dat is 0,02 €/kWh.

kosten per eenheid

In Tabel 1 zijn van de variabele en vaste kosten de prijzen per eenheid en de bron weergegeven.

Tabel 1: Prijs per eenheid van de verschillende kostenposten

	prijs	per eenheid	bron prijs
variabele kosten:			
korrelmaïs	0,16	€/kg	schatting a.h.v. KWIN AGV 2012
enzymoplossing	6	€/kg	ACRRES
base oplossing	0,31	€/kg	ACRRES
gist	9	€/kg	ACRRES
elektriciteit	0,107	€/kWh	ACRRES
water	0,878	€/m3	ACRRES
arbeid LW	11,53	€/uur	KWIN AGV 2012
arbeid HW	25,57	€/uur	KWIN AGV 2012
servicekosten	15	€/m3 100% ethanol	Byosis
vaste kosten:			
grondkosten	0,1041	€/m2	KWIN AGV 2012
rente	5,5%		KWIN AGV 2012
afschrijving	15	jaar	schatting
onderhoud	€ 90.000		schatting
verzekering	0,5%		schatting

4.3 Economische resultaten

Het bedrijfseconomisch resultaat is met € 430.000 per jaar goed. Het rendement op de investering is 38 % en de terugverdientijd is 2,6 jaar, zie Tabel 2¹. Het grootste deel van de opbrengsten bestaat uit veevoer met een hoge eiwitwaarde. Zonder SDE subsidie voor warmteterugwinning is het rendement nog 35 % en de terugverdientijd 2,9 jaar. De veevoeropbrengst bepaalt dus in sterke mate het eindresultaat. Wanneer dit veevoer slechts € 0,20 per kg op zou brengen neemt het resultaat met ruim € 650.000 af en is dan negatief. Ook de bio-ethanol prijs is van invloed, maar niet zo sterk als de veevoer prijs. Echter ook bij een daling van de bio-ethanol (100%) prijs van 702 €/m³ naar bijvoorbeeld 500 €/m³ is het resultaat van deze business case nog steeds positief. Uit een zeer recent persbericht van het Productschap Akkerbouw van 16 november 2012 blijkt dat de Nederlandse overheid het duurzaamheidcertificaat van VVAK heeft geaccepteerd als invulling van de eisen voor biobrandstoffen. Daarmee voldoet biomassa van akkerbouwmatige teelten van gecertificeerde teeltbedrijven aantoonbaar aan de door Brussel voorgeschreven duurzaamheidscriteria.

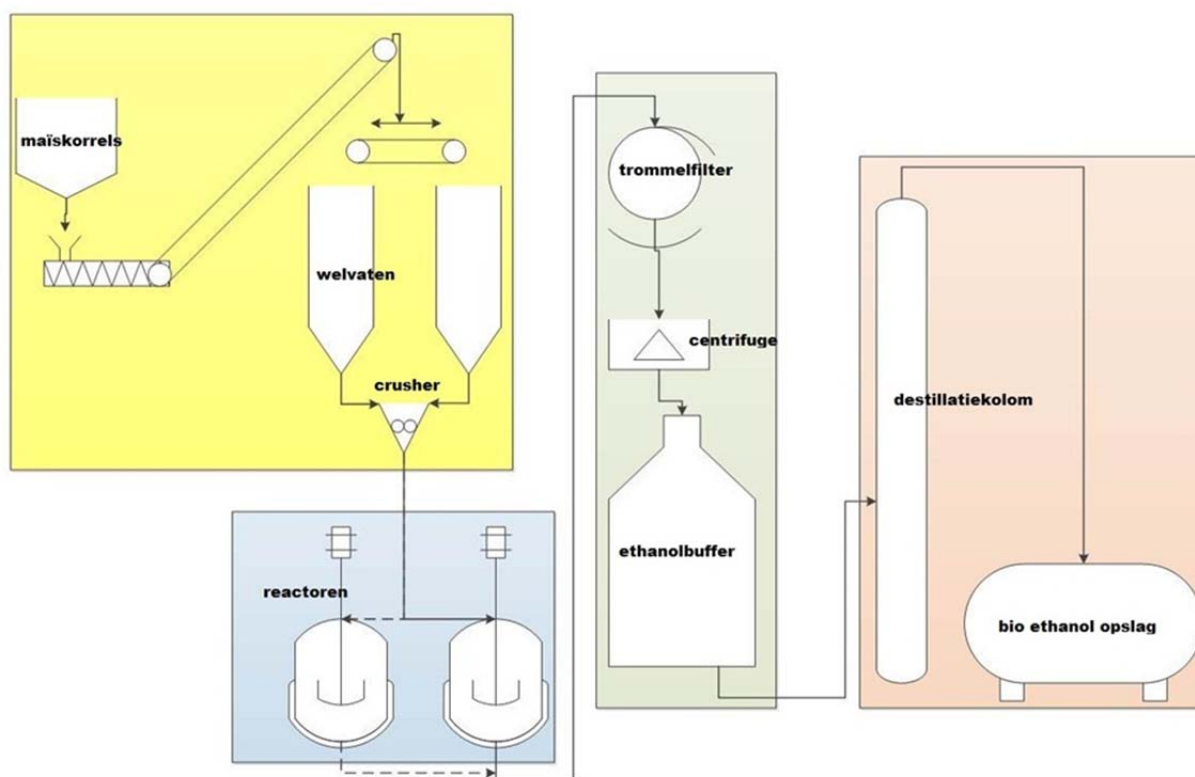
¹ Bij de bedrijfseconomische berekeningen worden bij de kosten ook rente- en afschrijvingskosten meegenomen, bij de Return On Investment en de terugverdientijd niet.

Tabel 2: Economische resultaten van de bio-ethanol installatie

opbrengsten					
bioethanol (60%)	2.779.676	l	0,34	€/l	€ 934.527
veevoer	2.196.640	kg ds	0,50	€/kg ds	€ 1.098.320
warmteterugwinning	2.706.840	kWh	0,02	€/kWh	€ 54.137
totale opbrengsten					€ 2.086.984
variabele kosten					
korrelmaïs	7.248.941	kg	0,16	€/kg	€ 1.159.831
enzymoplossing	18.122	l	6	€/kg	€ 108.734
base oplossing	131.400	l	0,31	€/kg	€ 40.734
gist	725	kg	9	€/kg	€ 6.524
elektriciteit	400.000	kWh	0,107	€/kWh	€ 42.800
water	19.031.059	l	0,878	€/m3	€ 16.709
arbeid LW	1.196	uur	11,53	€/uur	€ 13.790
arbeid HW	156	uur	25,57	€/uur	€ 3.989
servicekosten	1.668	m3	15	€/m3	€ 25.017
totaal variabele kosten					€ 1.418.128
vaste kosten					
grondkosten	500	m2	0,1041	€/m2	€ 52
rente			5,5%		€ 41.250
afschrijving			15	jaar	€ 100.000
onderhoud			€ 90.000		€ 90.000
verzekering			0,5%		€ 7.500
totaal vaste kosten					€ 244.851
totale kosten					€ 1.656.930
resultaat					€ 430.054
Investing					
					€ 1.500.000
Return On Investment					
					38 %
terugverdientijd					
					2,6 jaar

5 Resultaten inbedrijfstelling

Voor de inbedrijfstelling van de bio ethanol en veevoerinstallatie is het proces opgedeeld in vier stappen; voorbereiding van maiskorrels, fermentatie, scheiding, en uiteindelijk opwerking. De 4 stappen in het proces kunnen bij de inbedrijfstelling ook afzonderlijk getest worden. Bij de inbedrijfstelling is het testen van de technische functionaliteit van de installatie prioriteit, tijdens de eerste tests is het proces ook nog handmatig aangestuurd worden. Op dit moment is er een tweetal tests uitgevoerd waarbij de eerste drie processtappen doorlopen zijn. In de nabije toekomst zullen er meer tests volgen waarbinnen ook de destillatie opgestart wordt en waarbij het proces verder geoptimaliseerd wordt. In een later stadium zal de installatie volautomatisch gaan functioneren en zullen de verschillende processtappen tegelijkertijd in bedrijf zijn, dan kunnen ook de aannames in het businessplan geverifieerd worden.



Figuur 12: Proces schema bio ethanol installatie verdeeld in vier stappen. Het gele vlak omvat de voerbak, waar maiskorrels worden voorbereid voor de fermentatie. Bij de fermentatie in de reactoren omgeven door het blauwe vlak wordt het zetmeel omgezet naar bioethanol. Vervolgens worden de vaste delen van de vloeistof gescheiden in het groene vlak, en uiteindelijk wordt de vloeistof gedestilleerd om tot een hoge concentratie ethanol te komen in het oranje vlak.

5.1 Voorbewerking

Tijdens de eerste batchtest in oktober 2012 is gewerkt met ingekulde maiskorrels van de maisoogst uit 2011. De ingekulde maiskorrels zijn op dat moment van matige tot redelijke kwaliteit, er is duidelijk sprake geweest van schimmelvorming tijdens opslag. Omdat vooral naar het technisch functioneren van de installatie wordt gekeken is besloten met deze batch test door te gaan ondanks de matige kwaliteit van de maiskorrels. De voorbereiding van de maiskorrels verloopt redelijk voorspoedig al zijn er uiteraard een aantal voorziene en onvoorziene kinderziekten die bij de tests naar boven komen. Zo blijkt bij de toevoer van

de maiskorrels regelmatig een blokkade te ontstaan waardoor de vijzels vastdraaien, en blijkt de temperatuur in de welvaten vooral bij het koelen slecht controleerbaar. Ook blijft na het wellen circa 55kg maiskorrels onderin het welvat steken, deze moeten handmatig naar de crusher geschoven worden. In totaal is tijdens de test 230 kg mais geweld in 600 liter water.

De blokkade bij de toevoer was onvoorzien maar is waarschijnlijk makkelijk te verhelpen. Het temperatuurverloop in de welvaten was al voorzien en wordt omzeilt door tijdens het koelen niet op temperatuur te sturen maar in plaats daarvan een koelperiode in te stellen. Het blijven steken van de maiskorrels in het welvat is onvoorzien maar levert geen grote problemen op voor het proces, tijdens het continubedrijf kunnen deze korrels gewoon opnieuw mee met de volgende welcyclus.

Tijdens de tweede batchtest enkele weken later wordt met vers geoogste maiskorrels een fermentatie opgestart. Het uitgangspunt is dus niet aangezuurd na de oogst. Tijdens deze test is het blokkadeprobleem bij de toevoer provisorisch opgelost en verloopt het vullen van het welvat probleemloos. De eerste delen van het proces verlopen vlot. Eerst wordt de weltank gevuld met 800 liter water van 95°C en vervolgens wordt er 455 kg mais aan toegevoegd. Na 2 uur wellen wordt circa 2,5 uur gekoeld en vervolgens wordt het crushen opgestart om circa 16:30. Bij het walsen ontstaan er problemen. In eerste instantie is het slechts een probleem omdat het walsen erg langzaam gaat, na een poging om het proces te versnellen door de stand van de walsen aan te passen loopt de crusher vast waarbij de tandriem kapot gaat. Op dat moment zit er nog circa 275 kg mais in de weltanks die niet meer geplet kan worden.



Foto 8; links maiskorrels na 45 minuten wellen, rechts het eindresultaat na 2 uur wellen

5.2 Fermentatie

Tijdens de eerste batchtest is aan de 830 kg maismix 2 liter enzymoplossing toegevoegd en 500 gram gist. Beide doseringen zijn bewust hoog gekozen om een snelle vergisting te forceren. Dit blijkt de volgende dag goed te werken als 18 uur na de start van de fermentatie een duidelijke daling in de pH te zien is en het in de ethanolfabriek duidelijk naar gist / vergisting ruikt. De pH daling wordt tijdens de eerste batchtest nog handmatig gecompenseerd. Om de voortgang van de vergisting en het alcoholpercentage in het mengsel te bepalen wordt op labschaal gedestilleerd en het alcoholgehalte in het destillaat bepaald (Foto X). De drie monsters genomen op drie opeenvolgende dagen laten zien dat de vergisting snel verloopt, na 18 uur is het alcoholpercentage al 3,2%_{vol}, en dat uiteindelijk een eindgehalte van 5,9%_{vol} ethanol wordt behaald. Tijdens deze eerste test is nog niet gekeken naar de efficiëntie waarmee zetmeel uit de maiskorrels is omgezet in ethanol, mede vanwege de slechte kwaliteit van de gebruikte maiskorrels.



Foto 9; de gebruikte destillatieopstelling

Tijdens de tweede batchtest is de samenstelling van de maiskorrels geanalyseerd door nutricecontrol en is het zetmeelgehalte bekend. Helaas is door de problemen met de crusher onduidelijk hoeveel van het zetmeel uit de maiskorrels ook daadwerkelijk in de reactor terecht is gekomen (hoewel meting aantoont dat 275 kg aan maiskorrels is achtergebleven blijft onbekend hoeveel vocht deze korrels hebben opgenomen). Een ruwe inschatting is wel mogelijk; ongeveer de helft van de maiskorrels zal beschikbaar zijn voor de fermentatie. De fermentatie verloopt net als tijdens de vorige batchtest snel, binnen 48 uur wordt het merendeel van de alcohol gevormd 6,5%vol van de eindconcentratie alcohol 7,5%vol die na 8 dagen fermentatie wordt gemeten.

5.3 Scheiding

De scheiding bestaat uit een filterstap waarbij de grove celresten verwijderd worden, gevolgd door een centrifugestap voor verwijdering van de fijnere vaste delen uit het maisbier. Bij de eerste batchtest blijkt de afvoer richting het trommelfilter te verstopen tijdens de fermentatie omdat de uitstroomopening omhoog gericht is. Na handmatig verwijderen van de blokkade stroomt het maisbier vlot door het trommelfilter, wel is het filtraat erg troebel. De vaste delen komen goed uit de trommelfilter en bevatten niet teveel vocht (Tabel 3)

	Netto natgewicht (g)	Netto drooggewicht (g)	Percentage droge stof %
1	2154.1	381.1	17.7
2	613.5	330.7	20.5
3	1283	302	23.5

Tabel 3; Percentage droge stof in de vaste fractie uit de trommelfilter

Daardoor verloopt de centrifugestap ook erg moeizaam; de zelflossende centrifuge raakt de grote hoeveelheid vaste delen in het maisbier maar moeilijk kwijt, en omdat het lossen van de vaste delen zo moeizaam verloopt treedt de centrifuge snel in storing. Ook blijkt het centrifugaat nog veel vaste delen te bevatten; zie Foto 10.

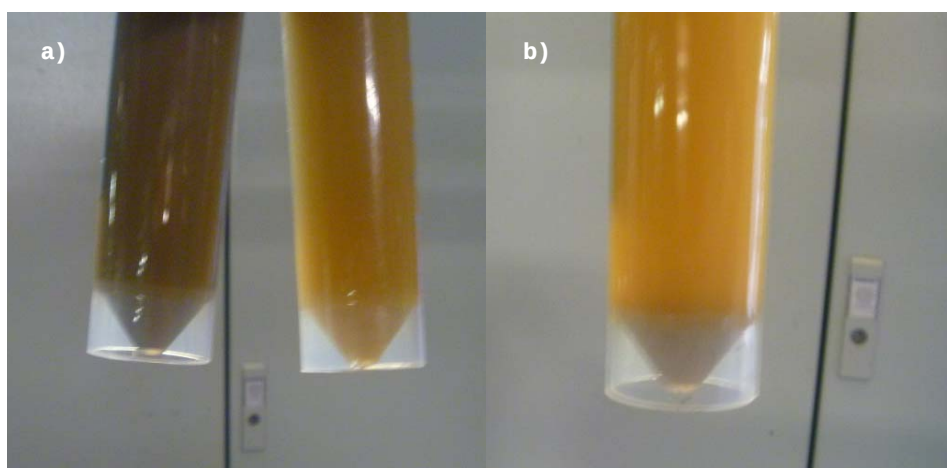


Foto 10; a en b; a) een vergelijking tussen de ingaande ethanolfractie (links) en uitgaande ethanolfractie (rechts), b) de uitgaande ethanolfractie na een nacht bezinken

De onvoldoende scheiding is in de tweede batchtest uitgebreider bekeken, verse maiskorrels en een hoger vergistingspercentage (langere fermentatie) moesten helpen om het hoge gehalte aan vaste deeltjes in de waterige ethanolfractie te verminderen. Daarnaast is zorgvuldig naar de optimale instellingen van de centrifuge gezocht tijdens de tweede batchtest.

Qua filteren verliep ook de tweede batchtest vlot; de uitloop in de reactor was in de tussenperiode aangepast en daarmee waren problemen met verstopping verholpen. Wel blijkt bij opstart dat ondanks de uitgebreide reinigingscyclus van de vorige batchtest er nog vaste delen in de trommel hebben gezeten, deze delen komen in de eerste uitloop van vaste delen terecht. Verder blijft het filtraat ondanks het gebruik van verse maiskorrels en de langere fermentatieperiode erg troebel.

Bij het centrifugeren is gezocht naar de optimale instellingen om het centrifugaat zo helder mogelijk te krijgen. Kort samengevat is dit mogelijk door; een lager debiet te hanteren, en/of door vaker de vaste fractie uit de centrifuge te laten lossen. Uiteindelijk bleek dat zelfs bij een laag debiet van 200 l/h en een hoge frequentie losfrequentie (iedere 2 min.) er nog teveel vaste fractie ophoopt in de centrifuge, omdat de loscyclus zelf ook ~1 min. Duurt is het totaaldebiet bij deze instellingen slechts 133 l/h. Dit houdt in dat het debiet door de centrifuge de geplande continue aanvoer vanuit de reactor niet kan verwerken. Bovendien was bij deze instellingen de waterige ethanolfractie nog altijd vervuult met vaste deeltjes, hetgeen vervuiling

van warmtewisselaars voor en na de destillatiekolom tot gevolg kan hebben. Wel is tijdens de tweede test gedurende langere tijd storingsvrij gecentrifugeerd. Mogelijke oplossingen voor voor het hoge aantal vaste deeltjes in het eindproduct is een betere scheiding in de trommelfilter door het gebruik van een kleinere maaswijdte, of het vervangen van de centrifuge door een model met een grotere doorvoercapaciteit.

Van de maiskorrels gebruikt bij de tweede batchtest is een analyse uitgevoerd door Nutricontrol te Veghel. Daarnaast zijn de vaste fractie uit het trommelfilter en de vaste fractie uit de centrifuge bemonsterd en geanalyseerd. Uit de analyses (zie Tabel 4) blijkt dat het zetmeel uit de maiskorrels vrijwel volledig wordt omgezet in bioethanol, dat de vaste fractie uit de trommelfilter en uit de centrifuge een hoog eiwitgehalte hebben, en dat de aminozuursamenstelling ongeveer gelijk blijft.

	Maiskorrels	Vaste fractie filter	Vaste fractie centrifuge	
Droge stof	557,8	276,5	130,4	g/kg
Eiwit% (obv ds)	9,1	14,1	56,0	%
Vet% (obv ds)	4,2	6,4	9,4	%
Zetmeel% (obv ds)	69,7	11,4	3,1	%
Aminozuursamenstelling:				
Cysteine	2,0	2,1	2,1	g/100g
Methionine	2,4	1,8	2,1	g/100g
Asparaginezuur	7,6	6,4	6,6	g/100g
Threonine	3,5	4,1	4,0	g/100g
Serine	4,9	4,9	5,1	g/100g
Glutaminezuur	18,6	17,2	18,1	g/100g
Glycine	3,7	4,1	3,6	g/100g
Alanine	8,0	7,4	7,5	g/100g
Valine	5,1	5,1	5,3	g/100g
iso-Leucine	3,5	3,6	3,8	g/100g
Leucine	13,1	12,1	13,0	g/100g
Phenylalanine	4,9	4,9	5,1	g/100g
Histidine	3,1	3,6	3,2	g/100g
Lysine	3,5	3,6	3,4	g/100g
Arginine	4,3	4,4	4,2	g/100g

Tabel 4: Samenstelling van maiskorrels, de vaste fractie uit het trommelfilter, en de vaste fractie uit de centrifuge

6 Literatuur

1. Jarzebski, A.B., J.J. Malinowski, and G. Goma, *MODELING OF ETHANOL FERMENTATION AT HIGH YEAST CONCENTRATIONS*. Biotechnology and Bioengineering, 1989. **34**(9): p. 1225-1230.
2. Oliveira, S.C., et al., *Continuous alcoholic fermentation process: model considering loss of cell viability*. Bioprocess Engineering, 1999. **20**(2): p. 157-160.

