

Vergisting 2.0

Kostprijsreductie groen gas door verbeterde ontsluiting
lignocellulose biomassa via twee synergetische
pretreatment technieken

Opdrachtgever:

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland

Projectpartners:

Bioclear, TNO, Ekwadraat, ZLTO, De Betonpleats, Schaap Bioenergie, Jansen Wijhe

OPENBAAR EINDRAPPORT

OPDRACHTGEVERS: RVO
PROJECTTITEL: Vergisting 2.0
PROJECTCODE: 20134675/10675
KENMERK RVO: TEBG113008
DOCUMENTTYPE: Openbare eindrapportage
PUBLICATIEDATUM: Februari 2016
PROJECTLEIDER: Ir. J. Tideman
AUTEUR(S): Ir. J. Tideman
COLLEGIALE TOETS: 1^e lezer (Ir. R. Winters)

Bioclear b.v.*Postadres:*

Postbus 2262; 9704 CG Groningen

Bezoekadres:

Rozenburglaan 13C; 9727 DL Groningen

Telefoon: 050 571 84 55

Fax: 050 571 79 20

Email: info@bioclear.nl

Website: www.bioclear.nl



Bioclear werkt met het INK kwaliteitssysteem (Instituut Nederlandse Kwaliteit), een managementmodel, dat is afgeleid van het Europese EFQM Excellence model.



Bioclear beschikt over de procescertificaten BRL SIKB 2000, BRL SIKB 6000 en de onderliggende VKB-protocollen 2002 en 6002.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van Bioclear.

© Bioclear b.v.

Bioclear adviseert bedrijven, overheden en dienstverlenende organisaties op het terrein van de milieutechnologie.

Op opdrachten aan Bioclear zijn van toepassing de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan Bioclear, zoals gedeponeerd bij de Kamer van Koophandel te Groningen.

Samenvatting

Er is een groeiende behoefte aan de productie van hernieuwbare brandstoffen en chemicaliën. Relatief laagwaardige tweede generatie lignocellulose biomassa zoals natuurgras, digestaat, GFT afval en dikke fractie van mest zijn hiervoor bij uitstek geschikt. Er is immers geen concurrentie met voedseltoepassingen. Ook kan biomassa, in vergelijking met duurzame elektriciteit uit zon en wind, hoogwaardiger worden ingezet als groen gas, bio-CNG, bio-LNG of op termijn zelfs als grondstof voor de groene chemie. Bottleneck in de toepasbaarheid van de genoemde types biomassa is de kosteneffectieve ontsluiting van het recalcitrante lignocellulose complex.

Doel van dit project was om een economisch haalbaar gecombineerd proces te ontwikkelen voor de voorbehandeling van lignocellulosehoudende biomassa voor biogasproductie met behulp van TNO's Superheated Steam technologie (SHS) en de Greenstep enzymtechnologie van Bioclear en Ekwadraat. Door combinatie van deze technologieën moet het mogelijk zijn om lignocellulose volledig te ontsluiten tot goed vergistbare suikers. Hierdoor kan in theorie de biogasopbrengst uit recalcitrante biomassa verdubbelen en de productiekosten verminderen met €0,15 per Nm³ groen gas: kortom met dezelfde biomassa in dezelfde vergister twee maal zoveel biogas tegen lagere kosten.

Dit project is opgezet en uitgevoerd met een breed consortium waarin alle partijen in de keten van biomassa naar groen gas aanwezig waren. In dit project zijn op lab en pilot schaal de individuele processtappen onderzocht en in verschillende combinaties getest. Natuurgras is als uitgangsmateriaal genomen, maar ook dikke fractie van digestaat, runder- en varkensmest zijn getest. De biomassa is met SHS ontsloten (WP1), met enzymen gehydrolyseerd (WP1 en 2) en vervolgens vergist (WP3). Aan de hand van de onderzoeksresultaten op lab-schaal en praktijkkennis zijn er verschillende scenario's voor inpassing van de technologieën opgesteld en doorgerekend (WP4).

Er is succesvol proof-of-principle gegeven van volledige ontsluiting via de gecombineerde technologieën. De via SHS en enzymen geproduceerde 'sugar crude' kan vervolgens binnen een dag vergist worden. De beoogde verdubbeling van de biogasopbrengst is in één test behaald. Uit natuurgras kan onder optimale procescondities met SHS en enzymen circa 80% van de aanwezige suikers vrijgemaakt worden. Met SHS alleen wordt circa 40% van de suikers gehydrolyseerd. De Greenstep EP30 enzymen presteerden goed met een opbrengst van 80-90% in vergelijking met commerciële enzympreparaten. Er is proof-of-principle gegeven van de ontsluiting van dikke fractie van rundermest, varkensmest en digestaat. De SHS ontsluitingsprocedure dient verder geoptimaliseerd te worden. Uit batch vergistingstesten met natuurgras is met digestaat uit covergisting een meeropbrengst van +14% tot +34% verkregen ten opzichte van onbehandeld natuurgras. Door optimalisatie van het entmateriaal werd de meeropbrengst verhoogd tot +24% tot +100%. Een gemiddelde methaanopbrengst van onbehandeld natuurgras met digestaat is 154 Nm³ CH₄ / ton Organische Stof (OS). De opbrengst van SHS behandeld natuurgras met digestaat is 190 Nm³ CH₄ / ton OS. De opbrengst kon via verdere optimalisaties aan de entcultuur verhoogd worden naar 236, 254 en 281 Nm³ CH₄ / ton OS. Door het natuurgras met enzymen voor te hydrolyseren

werd er geen hogere opbrengst verkregen, wel werd de vergisting 30x versneld ten opzichte van onbehandeld natuurgras. Het gebruik van alleen SHS verdubbelde de snelheid.

Voor SHS is in vergisting een positieve business case ontwikkeld voor een bestaande mest-covergister die in aanmerking komt voor verlengde levensduur en uitbreid met 100% en groen gas opwerking en SHS ontsluiting. Verdere aannames zijn: het gebruik van 20 kton natuurgras, de productie van 5,5 miljoen m³ biogas per jaar (3,5 miljoen m³ groen gas, ~1,4MW), een afschrijvingstermijn van 12 jaar, het aandeel eigen vermogen van 15% en aandeel risicodragend vermogen 35%. Voor het conservatieve scenario van 190 Nm³ CH₄ / ton OS uit natuurgras is er een kostprijdsdaling van €0,03 per m³ groen gas, een totale Investment Return Rate (IRR) van 22% op eigen vermogen en 10% op totaal vermogen. Voor een scenario met 236 Nm³ CH₄ / ton OS uit natuurgras wordt er nog verder bespaard op inkoop van co-producten en digestaat afvoer. Dit scenario geeft een kostprijdsdaling van €0,07 per m³ groen gas, een IRR van 39% op eigen vermogen en van 13% op totaal vermogen. Verdere verhoging van de biogasopbrengst en slim gebruik van per seizoen beschikbare biomassa zal de kostprijdsdaling nog meer richting de beoogde €0,15 per m³ groen gas brengen. De extra snelheid die enzymen brengen kan in praktijk niet optimaal benut worden en geeft vooralsnog geen meerwaarde aan de opgestelde business cases. Reden hiervoor is dat in dit scenario de uitspoeling van methanogenen en maximale belastbaarheid van een vergister limiterende factoren worden. Hierdoor is andere vergistingstechnologie nodig en blijft het volume van de installatie relatief groot. Enzymen kunnen wel een waardevolle toevoeging zijn aan vergisting mits ze een meeropbrengst kunnen genereren, hieraan werken Bioclear en Ekwadraat in een ander initiatief.

De veelbelovende resultaten en inzichten uit dit project leiden tot de volgende twee aanbevelingen:

- 1) Ten eerste biedt de SHS technologie technisch en economisch perspectief voor toepassing in de bio-energie. Belangrijke aandachtspunten genoemd door ondernemers zijn de hoge investeringsdrempel van de technologie, de momenteel lastige financiering van projecten in de bio-energie sector en de onzekerheid in toekomstige wet- en regelgeving in relatie tot de lange afschrijvingstermijn van de apparatuur. Genoemde uitdaging is om ook voor een specifieke praktijklocatie een sluitende business case te ontwikkelen. Logische vervolgstappen voor doorontwikkeling richting praktijk zijn allereerst het uitvoeren van continue vergistingstesten op labschaal en de verdere optimalisatie van de ontsluitingsprocedure voor de dikke fracties van mest en digestaat. Daarnaast dient er opgeschaald te worden richting praktijk middels een pilot om in een praktijktest de werking van de ontsluitingstechniek zelf en het effect op vergisting te demonstreren.
- 2) Ten tweede biedt de combinatie SHS en enzymen perspectief voor het doorontwikkelen richting een tweede generatie 'sugar crude' als grondstof voor de groene chemie. Uit de uit lignocellulose vrijgemaakte suikers zouden bijvoorbeeld melkzuur of bio-ethanol geproduceerd kunnen worden. Voor de hand liggende vervolgstappen zijn: het verkennen van de economische haalbaarheid en de inpasbaarheid in de industriële keten, het geven van proof-of-principle in de productie van groene chemicaliën op basis van het tweede generatie suikermengsel en het optimaliseren en opschalen van de decentraal geproduceerde enzymcocktail. Er is in dit project aangetoond dat de kostprijs van commerciële enzympreparaten een bottleneck is in het economisch rendabel maken van dergelijk concept. Het gebruik van een tegen lagere kosten decentraal geproduceerde cocktail blijft kansrijk.

Inhoudsopgave

Hoofdstuk 1	Inleiding	1
	1.1 Algemene inleiding	2
	1.1.1 Projectgegevens	2
	1.1.2 Consortium	2
	1.1.3 Uitvoering van het project	3
	1.1.4 PR en kennisverspreiding	3
	1.1.5 Rapportage	3
	1.2 Inhoudelijke inleiding	4
	1.2.1 Bio-energie als springplank	4
	1.2.2 Lignocellulose ontsluiting	4
	1.2.3 Vergisting van lignocellulose	5
	1.2.4 Technologieën	5
	1.2.5 Doelstellingen en impact	8
	1.2.6 Beoogde resultaten	8
	1.2.7 Werkpakketten	9
Hoofdstuk 2	SHS ontsluiting (WP1)	10
	2.1 Doelstellingen	11
	2.2 Uitgevoerde werkzaamheden	11
	2.3 Conclusies	11
Hoofdstuk 3	Enzymatische hydrolyse (WP2)	12
	3.1 Doelstellingen	13
	3.2 Uitgevoerde werkzaamheden	13
	3.3 Proof-of-principle test	13
	3.4 Conclusies	14
Hoofdstuk 4	Vergisting van ontsloten biomassa (WP3)	15
	4.1 Doelstellingen	16
	4.2 Uitgevoerde werkzaamheden	16
	4.3 Samenstelling natuurgas	16
	4.4 Vergisting natuurgas	17
	4.5 Vergisting dikke fractie van mest	17
	4.6 Conclusies	18
Hoofdstuk 5	Perspectief richting praktijk: technologische & economische evaluatie (WP4)	20
	5.1 Doelstellingen	21
	5.2 Uitgevoerde werkzaamheden	21
	5.3 Technische evaluatie	21
	5.4 Economische evaluatie	23

	5.4.1 Scenario's	23
	5.4.2 Industrieel korrelslib	23
	5.4.3 Mono-mestvergisting	23
	5.4.4 Co-mestvergisting	24
	5.5 Conclusies	25
Hoofdstuk 6	Perspectief en vervolg	26
	6.1 Perspectief SHS	27
	6.2 Perspectief SHS + enzymen	28
	6.3 Perspectief decentrale enzymproductie	29
Bijlage 1	Project flyer	
Bijlage 2	Overzicht werkpakketten	
Bijlage 3	Testopstelling AMPTSII	



Hoofdstuk 1

Inleiding



1.1 Algemene inleiding

1.1.1 Projectgegevens

Het project `Vergisting 2.0, Kostprijsreductie groen gas door verbeterde ontsluiting lignocellulose biomassa via twee synergetische pretreatment technieken` is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, verleend voor het TKI in het kader van de Subsidieregeling Energie en Innovatie Biobased Economy en Gas uitgevoerd door de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO, voorheen AgentschapNL). Het project is uitgevoerd onder projectnummer TEBG113008 binnen de programmalijnen vergisting en hoogwaardige energiedragers. De projectperiode was van 1 januari 2014 tot 31 augustus 2015 en is met één maand verlengd tot 30 september 2015 ten behoeve van een goede afronding van de activiteiten. Naast ondersteuning vanuit RVO heeft ZLTO het project van financiële ondersteuning voorzien. Het consortium bedankt RVO en ZLTO voor hun financiële bijdrage aan het project.

1.1.2 Consortium

De volgende projectpartners hebben het project in gezamenlijkheid uitgevoerd:

- Bioclear (advies/technologie/analyse, ontwikkelaar Greenstep technologie).
 - o Penvoerder en coördinatie, onderzoek enzymatische hydrolyse en vergisting.
- Ekwadraat (adviesbureau, ontwikkelaar Greenstep technologie).
 - o Economische inpassing en business case.
- TNO (publieke onderzoeksinstituting, ontwikkelaar SHS technologie).
 - o Onderzoek SHS ontsluiting en enzymatische hydrolyse.
- ZLTO (land en tuinbouw organisatie, ondersteuning agrarische ondernemers)
 - o Perspectief grondstoffen, inpassing en economie, business case
- Betonpleats (Lucas Westra, ondernemer biovergisting en grondstoffenleverancier).
 - o Perspectief grondstoffen, inpassing en economie.
- Schaap Bioenergie (Ids Schaap, ondernemer biovergisting en groen gas productie).
 - o Perspectief grondstoffen, inpassing en economie.
- Jansen Wijhe (Han Jansen, ondernemer biovergisting en loonbedrijf).
 - o Perspectief grondstoffen, inpassing en economie.



Jansen Wijhe



De Betonpleats



ZLTO

1.1.3 Uitvoering van het project

De inhoudelijke uitvoering van het project is gedaan door Bioclear, TNO en Ekwadraat ondersteund door de overige consortiumpartners. Er zijn gedurende het project acht projectmeetings gehouden. Tijdens deze meetings is door het gehele consortium aan de hand van de technische en economische resultaten gezamenlijk nagedacht over optimale combinatie en inpassing van de technologieën. De grote kracht van dit project was dat alle relevante ketenpartijen uit de biovergisting in het consortium vertegenwoordigd waren. Hierdoor was het mogelijk om aan de hand van de onderzoeksresultaten de potentie van de technologieën voor de praktijk goed op waarde te schatten. Los van de genoemde projectmeetings heeft het technisch team (Bioclear, TNO en Ekwadraat) op regelmatige basis voortgangsoverleggen gehad om de testplannen door te spreken en op elkaar af te stemmen. Het project is volgens oorspronkelijke projectplan en binnen de oorspronkelijke begroting uitgevoerd. Wijzigingen ten opzichte van het oorspronkelijke projectplan waren minimaal en worden waar relevant in de afzonderlijke hoofdstukken toegelicht.

1.1.4 PR en kennisverspreiding

Binnen dit project zijn een aantal activiteiten ondernomen om het project onder de aandacht te brengen. Het project is door Johan van Groenestijn van TNO aan een breder publiek gepresenteerd op de praktijkdag bio-energie van 18 juni 2015 in Apeldoorn. Het project is door Jeroen Tideman van Bioclear voor het voetlicht gebracht tijdens een presentatie aan een delegatie uit Zweden en Denemarken in het kader van de ENCORE Biogas Visit van 27 november 2014 op de Dairy Campus te Leeuwarden. Verder is het project genoemd door de partners in vele informele gesprekken. Verder kan genoemd worden dat de heer Jos Reijnders namens RVO de eindmeeting heeft bijgewoond en het project van zeer positieve feedback heeft voorzien. Op de website van TNO is op 25 maart 2015 een interview geplaatst over het project met Jeroen Tideman van Bioclear (<https://www.tno.nl/nl/over-tno/nieuws/2015/3/bacterien-als-wasserette>). Verder is voor ZLTO een flyer gemaakt (zie Bijlage 1) ten behoeve van introductie van het project aan haar achterban. Na afronding zal het project nog op de website en in de nieuwsbrief van Bioclear gepresenteerd worden. Ook zal er vanuit de TKI Gas nog een interview plaatsvinden voor publicatie op haar website met als beoogde doelgroep vakgenoten, beleidsmakers en andere stakeholders als de politiek, maatschappelijke organisaties, universiteiten en scholen.

1.1.5 Rapportage

Dit rapport betreft de openbare eindrapportage. Dit rapport wordt verder ondersteund door de vertrouwelijke deelrapportage van TNO “*Ontsluiten van mest en cosubstraten met stoom*” (Van Groenestijn J.W., Van Buijsen H.J.J., Nagtegaal R.M.A., 2015). Deze rapportage is opgebouwd uit zes hoofdstukken. Hoofdstuk 1 betreft de inleiding en achtergrond. Vervolgens beschrijven Hoofdstuk 2 tot en met 5 de resultaten en conclusies van de afzonderlijke werkpakketten. Het rapport sluit af met het perspectief van de individuele en gecombineerde technologieën en de mogelijke vervolgstappen in Hoofdstuk 6.

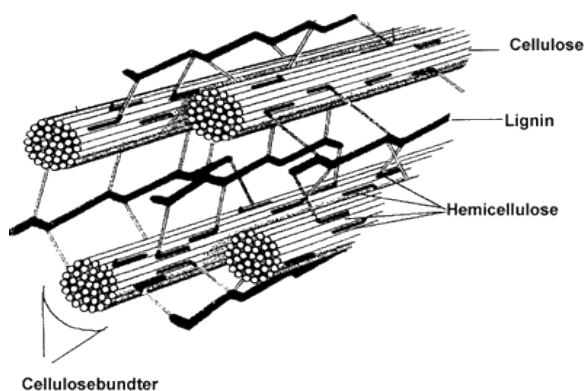
1.2 Inhoudelijke inleiding

1.2.1 Bio-energie als springplank

Er bestaat een groeiende behoefte naar de productie van hernieuwbare brandstoffen en chemicaliën. Relatief laagwaardige tweede generatie lignocellulose biomassa zoals natuurgas, digestaat, GFT afval en dikke fractie van mest zijn hiervoor bij uitstek geschikt. Er bestaat immers geen directe concurrentie met voedseltoepassingen. Beoogde toepassingen van biomassa zijn groen gas, transportbrandstoffen (bio-CNG, bio-LNG) en op termijn als grondstof voor de groene chemie. Door laagwaardige biomassa hoogwaardig in te zetten als energiedrager of grondstof wordt concurrentie met duurzame elektriciteit uit zon en wind vermeden. Aangezien de markt van hoogwaardige producten nog ontwikkeld dient te worden, biedt aansluiten op de huidige bestaande bio-energie keten goed perspectief om als springplank te dienen in het klaarstellen van de benodigde technologieën. Bottleneck in de toepasbaarheid van de hierboven genoemde types biomassa is echter de kosteneffectieve ontsluiting van het recalcitrante lignocellulose complex. De ontwikkeling van generieke economisch haalbare ontsluitingstechnieken is daarom wenselijk.

1.2.2 Lignocellulose ontsluiting

Gras, stro, plantenstengels, hout en mestvezels bestaan hoofdzakelijk uit dit lignocellulose. Lignocellulosehoudende biomassa (Figuur 1) is een stevig complex van cellulose, hemicellulose en lignine dat nauwelijks vergistbaar is. De lastig afbreekbare structuur van cellulose en hemicellulose is, mits toegankelijk, de snelheidsbeperkende factor in microbiologische afbraak. De lignine is de opbrengstlimiterende factor, doordat het de cellulose en hemicellulose inkapselt.



lignocellulosic material	cellulose (%)	hemicellulose (%)	lignin (%)
hardwood stems	40–55	24–40	18–25
softwood stems	45–50	25–35	25–35
nut shells	25–30	25–30	30–40
corn cobs	45	35	15
grasses	25–40	35–50	10–30
paper	85–99	0	0–15
wheat straw	30	50	15
sorted refuse	60	20	20
leaves	15–20	80–85	0
cotton seed hairs	80–95	5–20	0
newspaper	40–55	25–40	18–30
waste papers from chemical pulps	60–70	10–20	5–10
primary wastewater solids	8–15		
solid cattle manure	1.6–4.7	1.4–3.3	2.7–5.7
coastal bermudagrass	25	35.7	6.4
switchgrass	45	31.4	12
swine waste	6.0	28	na

Figuur 1 schematische weergave van lignocellulose matrix en tabel met typische samenstellingen [1]

[1] Adapted from: Jorgensen, H.; Kristensen, J. B.; Felby, C. *Enzymatic conversion of lignocellulose into fermentable sugars: Challenges and opportunities. Biofuels, Bioprod. Bioref.* 2007, 1, 119–134

Voor het verwijderen van lignine zijn een aantal fysisch/chemische processen bekend. In de papierindustrie worden het Kraft en het Sulfiet proces gebruikt. Andere processen zijn Organosolv, AFEX, het ontsluiten met loog en warmte of het gebruik van oxidatieve enzymen (biopulping). Ondanks dat deze technieken technisch werkbaar zijn, hebben ze zich tot dusver nog niet in de praktijk bewezen voor een toepassing waar de schaal relatief klein is en de toepassing relatief laagwaardig.

Het in dit project onderzochte concept van hydrolyse met behulp van zuur en het gebruik van stoom speelt in op het verwijderen van de aan lignine gebonden hemicellulose. Na het verwijderen van de hemicellulose is de cellulose toegankelijk en kan vervolgens enzymatisch afgebroken worden. Het is bekend dat enzymen niet goed op de lignocellulose matrix kunnen ingrijpen als die nog niet voorontsloten is. Door dergelijke biomassa voor te behandelen met een gecombineerde technologie van ontsluiting en enzymen wordt dit toegankelijker voor vergisting. De lignine blijft bij dit proces intact en kan worden afgescheiden waarna dit aromaaf voor andere toepassingen gebruikt kan worden.

1.2.3 Vergisting van lignocellulose

De trage en onvolledige omzetting van de genoemde types lignocellulosehoudende biomassa vermindert de economische haalbaarheid van vergisting. Het verschil tussen hoge kosten voor vergisting en van de lage marktwaaarde van het geproduceerde biogas moet worden gecompenseerd. Een snellere en meer volledige vergisting van de uitgangsmaterialen kan uitkomst bieden. In principe zou circa 75% van de organische stof van het lignocellulose complex, namelijk de hemicellulose en cellulose, in biogas om te zetten moeten zijn, als het eerst was ontsloten. Na deze ontsluiting zijn de polysacchariden in dit complex toegankelijk voor enzymen (zoals cellulase) die de polymeren omzetten in monosacchariden, die vervolgens vlot door acidogene, acetogene en methanogene bacteriën omgezet worden in biogas. In de praktijk wordt van recalcitrante substraten maximaal 50% van de organische stof omgezet in biomassa. Dit biedt ruimte voor een opbrengstverhoging van circa 50-100%.

1.2.4 Technologieën

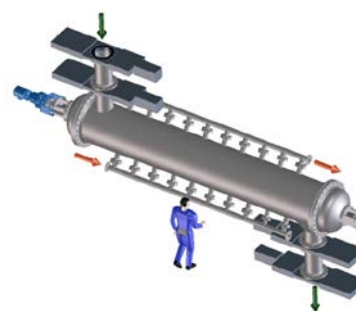
SHS stoomontsluiting (TNO)

TNO werkt aan de ontwikkeling van een nieuwe methode voor de ontsluiting van lignocellulose. Deze methode is gebaseerd op verhitting van biomassa met oververhitte stoom ("superheated steam" – SHS). Hiermee kan steekvaste biomassa (meestal 30% droge stof) uniform en efficiënt verhit worden door de passage van stoom door de biomassa (Figuur 2). Een lage pH van de biomassa versnelt deze reactie omdat het zuur een katalysator is. Het belangrijkste mechanisme van de ontsluiting is de hydrolyse van hemicellulose, waardoor het gehele lignocellulosecomplex gedestabiliseerd wordt en de cellulose toegankelijk wordt. TNO heeft voornamelijk ervaring met tarwestro. Na afkoelen en het toevoegen van commercieel verkrijgbare enzymen wordt de cellulose voor 95% omgezet in glucose. Het hydrolysaat is de afgelopen jaren voornamelijk gebruikt om bioethanol en melkzuur te maken.

De methode van TNO onderscheidt zich van ontsluitingstechnieken die slurry's verhitten door het gebruik van een hoger droge stof gehalte, wat gunstig is bij het kosteneffectief verwarmen en het bereiken van een lage pH. Andere voorbehandelingen die met verzadigde stoom werken zijn minder efficiënt door het lagere stoomdebiet (minder goede verdeling warmte) en condensatie op de biomassa (verdunning van katalysator in de perifere zones van de biomassadeeltjes). Stoomexplosie is gebaseerd op een ander principe, namelijk een mechanische ontsluiting bij veel hogere drukken (25 bar) en niet gebaseerd op chemische hydrolyse van hemicellulose. TNO heeft een octrooiaanvraag op het ontsluiten met oververhitte stoom en een octrooiaanvraag op het verbeteren van biogasproductie uit lignocellulose met verhitten onder zure condities. Een impressie van de reactor is hieronder weergegeven (Figuur 3).



Figuur 2: tarwestro voor (l) en na (r) SHS behandeling



Figuur 3: impressie van SHS reactor

De uitdaging in dit project is het vinden van benodigde maar ook kosteneffectieve reactiecondities (pH, stoomtemperatuur, stoomdruk, droge stof gehalte en reactietijd) voor de ontsluiting van relevante biomassasoorten (mestvezels, gras en ingekuilde maisplanten) met oververhitte stoom. Ook het gebruik van zuur behoeft aandacht: moet er een zuur worden toegevoegd, welke en kan dat ook worden bereikt door inkuilen? Tot nu toe was zwavelzuur zeer geschikt, maar dat combineert niet goed met vergisting. Hierbij moeten de investeringskosten en operationele kosten van de hele combinatie ontsluiting-enzymproductie-vergisting steeds leidend zijn. De ontsluiting moet aansluiten op de eigenschappen van de enzymen van Bioclear. De toegankelijkheid van cellulose en restanten hemicellulose moeten sterk verbeterd zijn voor die enzymen. Vervolgens moet het materiaal beter vergistbaar zijn. Dat moet worden getest, waarbij aandacht moet worden besteed aan de aanwezigheid van remmende (maar afbreekbare) bijproducten van de ontsluiting.

Greenstep enzymtechnologie (Bioclear en Ekwadraat)

In de praktijk blijken enzymkosten van commercieel verkrijgbare enzymcocktails vaak de bottleneck in de economische haalbaarheid van initiatieven in de waardecreatie uit lignocellulose biomassa. Multinationals die via traditionele industriële biotechnologie enzymcocktails op centrale locaties produceren werken continu aan kostprijsreductie van de benodigde enzymen via optimalisatie van performance en schaalvergroting. Een alternatieve aanpak is om enzymcocktails lokaal te produceren. Enkele multinationals ontwikkelen decentrale technologie om enzymen lokaal te kunnen produceren voor toepassing bij bijvoorbeeld grootschalige bio-ethanol fabrieken.

Bioclear en Ekwadraat ontwikkelen gezamenlijk de Greenstep enzymtechnologie. De visie van Bioclear en Ekwadraat is om met behulp van natuurlijke organismes (non GMO) enzymcocktails decentraal te produceren voor toepassing in de raffinage van biomassa op kleine en middelgrote schaal (boerderijschaal / boerderijschaal+ / biomassahub). Het doel van deze cocktails is om lignocellulose materialen versneld en verbeterd af te breken. De voordelen van het decentraal produceren van enzymen kunnen liggen op het gebied van zowel kwaliteit als kostprijs. Met lokaal aanwezige (voorontsloten) biomassa kan via inductie van de microbiologie een cocktail op maat geproduceerd worden. Kostenbesparingen kunnen gerealiseerd worden door het vermijden van kosten voor opzuivering, stabilisatie, verpakking, transport en opslag. Verdere voordelen van het gebruik van natuurlijke organismes kunnen zijn een reductie in de kosten voor sterilisatie en containment waardoor een relatief eenvoudig proces kan volstaan. Verandering van het business model door het verkopen van het proces in plaats van het product zorgt voor besparing van winstmarges. Momenteel is de Greenstep technologie voor een directe boost van het vergistingsproces in de demonstratiefase (TEG0414012, Figuur 4a en Figuur 4b).



Figuur 4a: impressie van de Greenstep reactor.



Figuur 4b: Greenstep pilot reactor

Deze Greenstep reactor voegt een aerobe microbiologische stap toe aan het anaerobe microbiologische proces van vergisting. De natuurlijke organismes worden geselecteerd door beënting en de ingestelde procescondities. De enzymcocktail die met deze huidige praktijkreactor geproduceerd wordt heeft als doel een meeropbrengst te genereren in een vergister op een relatief hoge pH van 7-8. De cocktail benodigd voor dit project dient actief te zijn op een pH van 4-5 in het hydrolyseren van de aanwezige cellulose en nog niet volledig gehydrolyseerde hemicellulose. De enzymcocktails die met behulp van geselecteerde natuurlijke organismes geproduceerd zijn voor dit project zijn daarom afkomstig uit labkweek.

Combinatie van SHS en enzymen

Door het toevoegen van de ontsluitingstechnologie aan de enzymtechnologie van Bioclear en vervolgens aan de covergisting kan de business case voor Bioclear en alle andere betrokken partijen (eigenaar en leverancier van vergister, biomassabezitter, overheid) worden verbeterd. Dit is nieuw in Nederland en daarbuiten en kan leiden tot een uniek proces. Internationaal wordt nu namelijk geen ontsluiting toegepast bij de mest/covergisting. Beide technologieën worden ontwikkeld met het oog op decentrale inzetbaarheid en bevinden zich op een Technology Readiness Level (TRL) 3-4. De enzymtechnologie van Bioclear en Ekwadraat is succesvol gebleken op labschaal voor het hydrolyseren van polysacchariden naar monosacchariden en kan indien interessant versneld doorontwikkeld worden naar pilot schaal. De Superheated Steam (SHS) technologie van TNO is eveneens met bepaalde biomassastromen op labschaal succesvol ontwikkeld en er wordt gewerkt aan het realiseren van de pilotfase. Indien de combinatie van technologie als voorbehandeling succesvolle resultaten geeft voor vergisting, kan dit versneld worden opgeschaald naar pilotoniveau en doorgezet worden richting commercialisatie.

1.2.5 Doelstellingen en impact

Doel van dit project is om een technisch en economisch haalbaar gecombineerd proces te ontwikkelen voor de voorbehandeling van lignocellulosehoudende biomassa voor biogasproductie met behulp van TNO's Superheated Steam technologie (SHS) en Greenstep enzymtechnologie van Bioclear en Ekwadraat. Door de combinatie van deze technologieën te gebruiken voor biomassa ontsluiting moet het mogelijk zijn om met dezelfde hoeveelheid biomassa in dezelfde vergister in dezelfde tijd tweemaal zoveel biogas te produceren tegen lagere productiekosten. Door lignocellulose biomassa voor te behandelen met een gecombineerde technologie van ontsluiting en enzymen wordt dit toegankelijker voor vergisting, en vindt 80% conversie van polysacchariden naar monosacchariden plaats, waardoor de biogasopbrengst per ton biomassa verdubbelt en de productiekosten met €0,15 per m3 groen gas verminderen. Een tweemaal zo hoge gasopbrengst wordt beoogd in dezelfde vergister in dezelfde tijd tegen lagere kosten. De aannames voor en de uitwerking van deze berekening zijn te vinden in het ingediende projectplan.

1.2.6 Beoogde resultaten

De opgedane kennis in dit project op lab en pilot/plant schaal wordt gebruikt om te beoordelen of het toevoegen van een voorbehandeling (ontsluiting) bij mest/co-vergisters technisch-economisch interessant is. Vervolgens levert het ook de ontwerpgrondslagen voor een pilot plant of direct een demo-installatie op boerderijschaal.

De specifieke resultaten van dit project zijn:

- 1) Kennis over procescondities voor ontsluiten met oververhitte stoom (SHS) van lignocellulose biomassa voor vergistingsinstallaties op labschaal (WP1)
- 2) Kennis over procescondities voor toepassing enzymen op SHS-ontsloten lignocellulose biomassa (WP1,2)
- 3) Kennis over bruikbaarheid van ontsloten materiaal voor vergistingsprocessen.(WP3)
- 4) Kennis over het effect van individuele en gecombineerde SHS-enzym voorbehandeling op vergistingsprocessen (WP3,4)
- 5) Kennis over de investeringskosten en operationele kosten van de gecombineerde ontsluiting en enzymbehandeling en het economisch effect op het hele systeem (WP4).
- 6) Kosteneffectief (gecombineerd) voorbehandelingsproces (WP4).

Het project richt zich in de eerste plaats op de mest/covergisting: meer en sneller biogas uit goedkopere grondstoffen. De projectresultaten zijn echter ook te gebruiken voor andere vergistingsinstallaties waarin lignocellulose wordt ingevoerd: vergisting van GFT-afval, groen afval en papier/karton-afval en mestmonovergisting.

Een logisch vervolgtraject bij succesvolle resultaten is het uitvoeren van een praktijkpilot aan de hand van de blauwdruk ontwikkeld in dit project. Na een geslaagd demoproject zal het proces in veelvoud worden toegepast. Het combisysteem ontsluiting/enzymreactor vergister/biogasreining zal dan verkocht kunnen worden.

1.2.7 Werkpakketten

De volledige inhoud van de werkpakketten en inhoud is te vinden in de projectaanvraag. Een tabel met een overzicht van de werkpakketten, uitvoerenden, tijdslijn en beoogde resultaten is te vinden in Bijlage 2. Hieronder volgt een korte introductie van de werkpakketten.

Werkpakket 1: Ontsluitingsprocedure

De dikke fractie van rundermest, varkensmest, de vezelfractie van digestaat en natuurgas zullen worden verhit onder verschillende reactiecondities in laboratoriumreactoren met oververhitte stoom. De variaties betreffen pH, stoomtemperatuur, stoomdruk, droge stof gehalte en reactietijd. Ook zal wel/niet zuur worden toegevoegd als katalysator en het soort zuur worden gevarieerd na een doordachte inventarisatie van de mogelijke kandidaten. Het resultaat van de ontsluiting zal worden beoordeeld aan de hand van de geproduceerde monosacchariden na het toevoegen van gebruikelijke (standaard) enzymcocktails.

Werkpakket 2: Hydrolyse met enzymen van Bioclear

Een aantal combinaties van ontsluitingsprocedures en biomassasoorten zal worden ingezet om materiaal te leveren voor testen waarin wordt gemeten hoe goed de commerciële en eigen enzymen van Bioclear het ontsloten materiaal kunnen hydrolyseren. Welk effect heeft de ontsluiting op opbrengst? Bevinden er zich stoffen in het ontsloten materiaal die de enzymen juist remmen? Voldoen de eerder gevonden optimale ontsluitingsprocedures?

Werkpakket 3: Vergisting van ontsloten biomassa

Tenslotte gaat het om een versnelling van de vergisting en/of het verkrijgen van een hogere opbrengst aan biogas. Een aantal grote batches ontsloten biomassa die qua volume passen bij de laboratorium vergistingsproeven zullen worden geproduceerd. De vergistingstesten worden in triplo batchgewijs uitgevoerd in het laboratorium op een schaal van 0,5 liter met slib wat aanwezig is als inoculum. Elke proef zal 1 maand duren. In de vergistingstesten zal het effect van de gecombineerde ontsluitingstechnologie vergeleken worden met de referentie waar geen ontsluitingstechnologie is gebruikt. Daarnaast zal het vergistingsproces op basis van de resultaten worden geoptimaliseerd.

Werkpakket 4: technisch-economische evaluatie

Bij het ontwikkelen van de procedures en de technologie in het algemeen moeten voortdurend keuzes worden gemaakt. Deze keuzes moeten gericht zijn op het bereiken van de meest gunstige business case voor de complete installatie (ontsluiting – enzymproductie – vergisting - biogasopwerking) en de beste duurzaamheid. Vinden van optimale balans tussen reactietijd, temperatuur en gebruik van zuur. Als de ontsluitingsreactor 2 maal zo duur wordt, maar daardoor de vergister tweemaal zo goedkoop is dat dan gunstig? Waar halen we de warmte vandaan?



Hoofdstuk 2

SHS ontsluiting (WP1)



2.1 Doelstellingen

Het doel van WP1 was om met de SHS technologie tot een geoptimaliseerde, kosteneffectieve ontsluitingsprocedure voor lignocellulosehoudende biomassa te komen. Het volledige werkpakket is beschreven in het vertrouwelijke deelrapport "*Ontsluiten van mest en cosubstraten met stoom*" (Van Groenestijn J.W., Van Buijsen H.J.J, Nagtegaal R.M.A., 2015). Dit hoofdstuk is een weergave op hoofdlijnen. Het perspectief van SHS ontsluiting wordt verder besproken in Hoofdstuk 5.

2.2 Uitgevoerde werkzaamheden

In dit werkpakket is in de pilot plant van TNO de ontsluiting van verscheidene lignocellulose substraten met behulp van oververhitte stoom onderzocht. De geteste procesvariabelen waren: type biomassa, ontsluitingstijd, ontsluitingstemperatuur, pH (middels impregnatie met zuur als katalysator), verkleining van biomassa en vochtgehalte (middels impregnatie met water). Er is gefocust op het ontsluiten van ingekuild natuurgas, maar ook zijn de dikke fractie van digestaat uit comestvergisting, dikke fractie van runder- en varkensmest onderzocht. Er is door het projectteam op zo laagwaardig mogelijke substraten gefocust, ingekuilde maïs is daarom buiten beschouwing gelaten.

Na de stoombehandeling is de ontsluiting van de biomassa op verscheidene manieren getest. Door TNO is de biomassa enzymatisch ontsloten met standaard commerciële enzymcocktails gevolgd door een analyse van de vrijgemaakte suikers (zie deelrapport TNO). Door Bioclear is de ontsloten biomassa enzymatisch gehydrolyseerd met standaard commerciële enzymcocktails alsmede met eigen Greenstep enzymcocktails (zie Hoofdstuk 3). Door Bioclear is de biomassa, al dan niet na enzymatische hydrolyse, getest op vergistbaarheid (zie Hoofdstuk 4).

2.3 Conclusies

Natuurgas en de dikke fracties van varkensmest, rundermest en digestaat kunnen worden ontsloten met oververhitte stoom.

Voor natuurgas kon na enzymatische hydrolyse circa 70-80% van de suikers worden vrijgemaakt door ontsluiting. Er is inzicht gekregen in de procesvariabelen: druk, reactietijd, reactietemperatuur, het gebruik van zuur, verkleining en bevochtiging.

Digestaat en de dikke fracties van mest blijken, waarschijnlijk als gevolg van hun alkalische en meer recalcitrante karakter, moeilijker te ontsluiten. Verdere optimalisatieslagen in de SHS ontsluiting lijken wenselijk.



Hoofdstuk 3

Enzymatische hydrolyse (WP2)



3.1 Doelstellingen

Het doel van WP2 was om kennis op te doen over de enzymatische hydrolyse van de met stoom ontsloten biomassa. Het eerste doel was om proof of principle te geven van de combinatie stoom ontsluiting met enzymatische hydrolyse. Het tweede doel was om geschikte testmethodes te ontwikkelen voor het uitvoeren en monitoren van de enzymatische hydrolyse. Het derde doel was om met behulp van commercieel verkrijgbare enzymen de bruikbaarheid van met stoom ontsloten biomassa in enzymatische hydrolyse te testen. Het vierde en laatste doel was om de effectiviteit van de door Bioclear geproduceerde Greenstep enzymen te testen in vergelijking met commerciële enzymen.

3.2 Uitgevoerde werkzaamheden

In dit werkpakket is door Bioclear de met stoom ontsloten biomassa verder enzymatisch ontsloten. De resultaten van de enzymatische hydrolyses die door TNO zijn uitgevoerd zijn te vinden in Hoofdstuk 2. Er zijn in dit werkpakket zes testen uitgevoerd. Verder zijn testen uitgevoerd om materiaal te maken als input voor vergistingstesten. Begonnen is met een kwalitatieve proof-of-principle test. Daarna zijn er kwantitatieve experimenten uitgevoerd zowel met commerciële enzymen als met Greenstep enzymen. Als uitgangsmateriaal voor het onderzoek in dit werkpakket is gekozen voor natuurgras. Reden hiervoor is dat de stoom-ontsluiting voor dit materiaal positieve resultaten gaf. Verder is er één verkennende test met ontsloten runder- en varkensmest uitgevoerd. De geteste procesvariabelen waren type biomassa, type enzymcocktail, de enzymdosering, de incubatietijd en de impact van schudden.

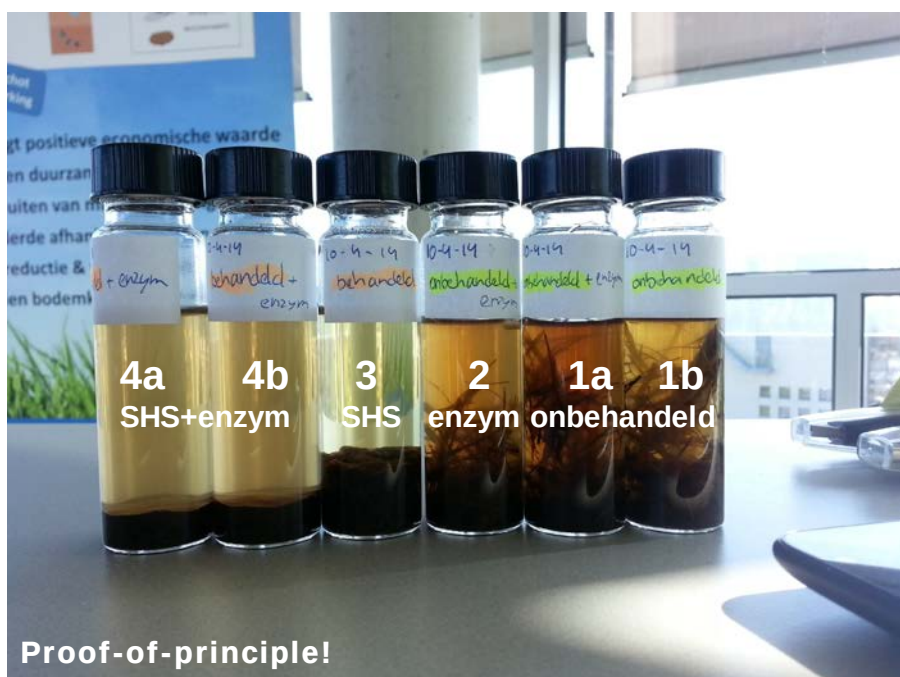
3.3 Proof-of-principle test

Een kwalitatieve proof-of-principle test is uitgevoerd. Doel van de test was om de synergie tussen de gecombineerde technologieën visueel aan te tonen. Onderstaande afbeelding (Figuur 5) toont de testreeks waarin gelijke hoeveelheden natuurgras op verschillende manieren ontsloten zijn:

- Fles 1a en 1b: onbehandeld gras, referentie
- Fles 2: gras behandeld met enzymen, visueel weinig verschil
- Fles 3: gras behandeld met SHS, visueel gedeeltelijk afgebroken
- Fles 4: gras behandeld met SHS + enzymen, visueel bijna volledig afgebroken

De test geeft een succesvolle proof-of-principle van de gecombineerde technologieën.

- Enzymen alleen kunnen het lignocellulose complex nauwelijks hydrolyseren
- Stoomontsluiting kan het lignocellulose complex gedeeltelijk afbreken door middel van hydrolyse van de hemicellulose bindingen. De biomassa is compacter, de vezelstructuur is gedeeltelijk afgebroken.
- Stoomontsluiting in combinatie met enzymen kan het lignocellulose bijna volledig afbreken door hydrolyse van de hemicellulose en cellulose fractie. De resterende fractie is een fijn grijs poeder (lignine) met nog enkele vezeltjes.



Figuur 5: proof of principle combinatie stommontsluiting en enzymatische hydrolyse

3.4 Conclusies

Alle doelen uit het werkpakket enzymatische hydrolyse zijn gehaald. Het is mogelijk met stoom ontsloten natuurgas enzymatisch te ontsluiten. Er is eerst een proof-of-principle gegeven van volledige enzymatische ontsluiting van met oververhitte stoom behandelde biomassa. Ook is er aangetoond dat ontsluiting met alleen stoom ook een effect heeft op de biomassa. Verder is bevestigd dat op niet voorontsloten lignocellulose biomassa enzymen geen effect hebben. In dit werkpakket zijn een aantal testmethodes ontwikkeld die het mogelijk maken de hydrolyse kwantitatief te monitoren. Een COD assay geeft een maat voor de in oplossing aanwezige gehydrolyseerde suikers. Een RE assay geeft een maat voor de hoeveelheid gereduceerde ketenuiteindes. De verhouding van COD/RE (de 'oligo index') geeft een maat voor de gemiddelde ketenlengte van de gehydrolyseerde suikers.

Met behulp van de ontwikkelde methodes is bevestigd dat commerciële enzympreparaten met stoom ontsloten natuurgas onder optimale condities bijna volledig (70-90%) kunnen hydrolyseren waardoor een 'sugar crude' ontstaat. Natuurgas dat alleen met SHS is ontsloten is al voor circa 30-40% gehydrolyseerd. Ook is er aangetoond dat de uit labweek afkomstige Greenstep EP30 enzymcocktail een bijna vergelijkbare performance geeft in vergelijking met commerciële enzymen (circa 80-90% rendement ten opzicht van commerciële enzymen). Verdere doorontwikkeling en opschaling van de Greenstep cocktail is wenselijk. Een aandachtspunt wat duidelijk naar voren is gekomen is de benodigde hoeveelheid enzymen voor volledige hydrolyse van de organische stof (10-100% enzymcocktail benodigd op basis van toegevoegde OS). Perspectief rondom decentraal geproduceerde Greenstep enzymen en economisch perspectief rondom het gebruik van enzymen wordt gegeven in Hoofdstuk 6.



Hoofdstuk 4

Vergisting van ontsloten
biomassa (WP3)



4.1 Doelstellingen

Het doel van WP3 was om kennis op te doen over de vergisting van de ontsloten biomassa. Het eerste doel van dit werkpakket was om te bepalen wat voor toepassing in vergisting een optimale ontsluitingsprocedure is. Dit is gebeurd door antwoord te vinden op de vragen of het gebruik van zuur en enzymen noodzakelijk is. Het tweede doel van dit werkpakket was om de vergistingsprocedure verder te optimaliseren om een maximale vergistingssnelheid en biogasopbrengst te krijgen. Het laatste doel was om data te genereren ten behoeve van de technische en economische evaluatie in WP4.

4.2 Uitgevoerde werkzaamheden

In dit werkpakket zijn door Bioclear verschillende soorten biomassa vergist onder mesofiele condities met het AMPTSII testsysteem (Bijlage 3). De resultaten van de stoomontsluiting en enzymatische hydrolyse op deze biomassa zijn te vinden in Hoofdstuk 2 en Hoofdstuk 3. Er zijn in dit werkpakket in totaal elf vergistingstesten uitgevoerd in batch op een schaal van 0,5 liter. Als uitgangsmateriaal voor het onderzoek in dit werkpakket is, net als voor de andere werkpakketten gekozen voor natuurgas ontsloten met SHS of met SHS en enzymen. Ook is er een test uitgevoerd met runder- en varkensmest. Referentie in de testen is de niet ontsloten biomassa. Begonnen is met een screening ter evaluatie van de testmethode en vergistbaarheid van het uitgangsmateriaal. Vervolgens zijn testen uitgevoerd om de noodzaak van ontsluiting met zuur en het gebruik van enzymen in kaart te brengen. Daarna zijn testen uitgevoerd om de biogasopbrengst te maximaliseren. Er is getest met verschillende soorten entmateriaal.

4.3 Samenstelling natuurgas

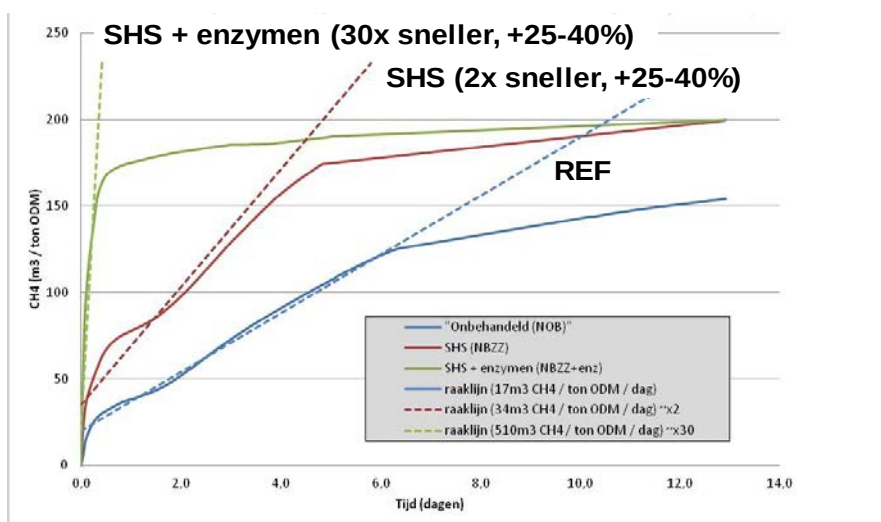
De droge stof van NOB en NBZZ is geanalyseerd op gehalte aan cellulose, hemicellulose en lignine (Tabel 1). Uit de resultaten blijkt dat de droge stof van het gebruikte natuurgas voor 32-34% uit cellulose bestaat, voor 21% uit hemicellulose en voor 11-12% uit lignine. Het totale gehalte lignocellulose komt hiermee op circa 65%. Uit verscheidene analyses gedurende het project blijkt dat natuurgas voor 5-10% uit anorganische stof (mineralen) bestaat.

Tabel 1: samenstelling van natuurgas als percentage van de totale hoeveelheid droge stof

Component	NOB	NBZZ
Cellulose	32%	34%
Hemicellulose	21%	21%
Lignine	12%	11%

4.4 Vergisting natuurgas

Uit batch vergistingstesten met natuurgas is met digestaat uit covergisting een meeropbrengst van +14% tot +34% verkregen ten opzichte van onbehandeld natuurgas. Door optimalisatie van het entmateriaal werd de meeropbrengst verhoogd tot +24% tot +100%. Een gemiddelde methaanopbrengst van onbehandeld natuurgas met digestaat is $154 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{ton}$ Organische Stof (OS). De opbrengst van SHS behandeld natuurgas met digestaat is $190 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{ton OS}$. De opbrengst kon via verdere optimalisaties aan de entcultuur verhoogd worden naar 236, 254 en $281 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{ton OS}$. Door het natuurgas met enzymen voor te hydrolyseren werd er geen hogere opbrengst verkregen, wel werd de vergisting 30x versneld ten opzichte van onbehandeld natuurgas. Op deze manier kan het grootste gedeelte van de opbrengst binnen één dag bereikt worden. Het gebruik van alleen SHS verdubbelde de snelheid. Onderstaande figuur laat een algemeen beeld zien van vergisting van niet ontsloten natuurgas, met stoom ontsloten natuurgas en met stoom en enzymen ontsloten natuurgas.

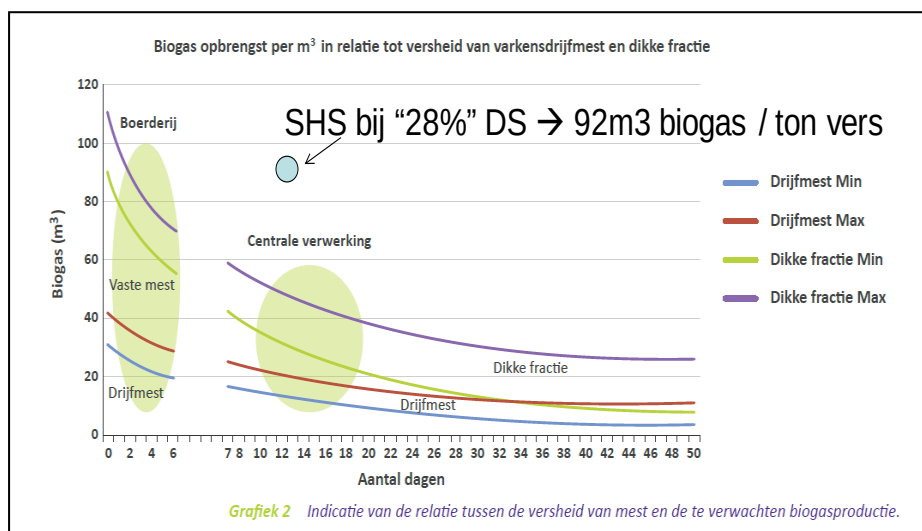


Figuur 6: algemeen beeld vergisting natuurgas

4.5 Vergisting dikke fractie van mest

Er is een verkennende vergistingstest uitgevoerd met de SHS ontsloten dikke fracties van runder- en varkensmest. De fracties betroffen niet verse fracties en zijn met SHS ontsloten. De SHS ontsluiting is nog niet geoptimaliseerd. De in deze test gebruikte ontsluitingsprocedure was tevens nog niet de optimale setting. Na 34 dagen vergisting was de methaanopbrengst uit varkensmest $212 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{ton OS}$ (circa 53% omzetting van OS) en uit rundermest $180 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{ton OS}$ (circa 45% omzetting van OS). De omzettingspercentages op basis van organische stof zijn goed te noemen voor deze recalcitrante materialen. De gemeten opbrengsten zijn vervolgens vergeleken met de literatuur (Handreichung Biogas Gewinnung, FNR 2006, aannahme 55% methaangehalte). De opbrengst uit de dikke fractie van rundermest lag 9% boven de hoogst opgegeven waarde uit de literatuur ($116\text{-}165 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{ton OS}$). De opbrengst uit varkensmest lag binnen de uit literatuur bekende waarden ($149\text{-}248 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 /$

ton OS). De opbrengst uit varkensmest is verder in perspectief gebracht van centrale mestverwerking. De methaanopbrengst geeft omgerekend naar een ton vers materiaal met een droge stof gehalte van 28% een biogasopbrengst van 92 Nm³. Deze waarde ligt ruim boven de door Groen Gas Nederland opgegeven range van 10-60 Nm³ per ton vers materiaal (Figuur 7). Deze resultaten bieden een eerste perspectief voor centrale verwerking van de dikke fractie in combinatie met SHS ontsluiting. Verdere optimalisatie van SHS ontsluiting en vergisting is hiervoor een noodzakelijke vervolgstap.



Figuur 7: eerste perspectief centrale mestvergisting

4.6 Conclusies

In dit werkpakket is veel ervaring opgedaan met het vergisten van met SHS ontsloten materiaal in batch vergistingstesten op kleine schaal. Alle doelen binnen dit werkpakket zijn gehaald. Het is duidelijk geworden hoe SHS ontsloten materiaal optimaal vergist kan worden. Ook is het duidelijk geworden wat de optimale ontsluitingsprocedures zijn voor een maximale biogasopbrengst. Verder is de vergistingsprocedure verder geoptimaliseerd zodat een maximale biogasopbrengst verkregen werd. Tenslotte is voldoende data gegenereerd die als basis dient voor de verdere technische en economische evaluatie.

Het is mogelijk SHS ontsloten materiaal te vergisten. De beoogde verdubbeling is in één test behaald. Via een optimale voorontsluiting is het mogelijk om natuurgas in één dag te vergisten. Bij het vergisten van natuurgas wordt door het gebruik van SHS zowel een versnelling als een meeropbrengst verkregen. Met digestaat afkomstig uit covergisting werd voor stoom ontsloten natuurgas een opbrengst verkregen van 160-230 Nm³ CH₄ / ton OS. Dit is een meeropbrengst van +14-34% ten opzichte van het niet ontsloten natuurgas (140-190 Nm³ CH₄ / ton OS). Belangrijke aandachtspunt is optimalisatie van de microbiologie via keuze van het entmateriaal en adaptatie van het entmateriaal. Met geoptimaliseerd entmateriaal werd voor met stoom ontsloten natuurgas een gemiddelde opbrengst verkregen van 236 Nm³ CH₄ / ton OS. De vergisting kon verder worden geoptimaliseerd door het entmateriaal te adapteren

aan de specifieke biomassa. De opbrengst kon zo verder verhoogd worden tot 254 en 281 Nm³ CH₄ / ton OS. De maximale opbrengst staat voor een omzetting van 70% van de aanwezige organische stof en 80% van de aanwezige vergistbare organische stof in het gebruikte natuurgras. Dit een zeer sterke verbetering van +24-100% in vergelijking met de vergisting van onbehandeld natuurgras (140-190 Nm³ CH₄ / ton OS).

Naast de hogere opbrengst zorgt het gebruik van SHS voor een versnelling van circa tweemaal ten opzichte van niet ontsloten materiaal. Door het SHS materiaal voor te hydrolyseren met behulp van enzymen kon verder versneld worden. Het hydrolysaat vergist dusdanig snel (30x sneller) dat natuurgras binnen een dag grotendeels vergist kan worden. Er werd door het gebruik van enzymen geen meeropbrengst verkregen in vergisting. Met andere woorden; na het voorontsluiten van het materiaal kan met behulp van de juiste biologie de hydrolyse in een vergister uitstekend gecompleteerd worden. De meerwaarde van enzymen voor de praktijk wordt besproken in Hoofdstuk 5.

Vergisting van de dikke fracties van varkens- en rundermest gaf een eerste perspectief op het gebruik van SHS in de centrale verwerking van dikke fracties. Verdere optimalisatie van SHS ontsluiting en vergisting is hiervoor een belangrijke vervolgstap.



Hoofdstuk 5

Perspectief richting praktijk:
technologische & economische
evaluatie (WP4)



5.1 Doelstellingen

Het doel van WP4 was om de in dit project geteste technologieën te evalueren op technische en economische haalbaarheid. Beoogd resultaat is een optimale procesconfiguratie voor een kosteneffectieve ontsluitingsprocedure voor lignocellulosehoudende biomassa. Dit hoofdstuk bevat de belangrijkste uitkomsten uit deze verkenning.

De in dit project beoogde kostenbesparing was €0,15 per Nm³ groen gas. Deze kostenbesparing zou ten goede kunnen komen aan de ondernemer en / of de overheid. Het lijkt voor de hand te liggen dat de kostenbesparing in de beginfase van de uitrol van een nieuwe technologie ten goede komt aan de pionierende ondernemer. Bij een sectorbrede uitrol van een technologie zou op termijn (een gedeelte) van de kostenbesparing in mindering kunnen worden gebracht op de SDE bijdrage en zo ten goede kunnen komen aan de overheid.

5.2 Uitgevoerde werkzaamheden

Input voor dit werkpakket was de in dit onderzoek gegenereerde technische data (WP2-4), de praktijkkennis van de consortiumpartners en de economische gegevens rondom de technologieën en vergisting. Op basis hiervan is de technische haalbaarheid consortiumbreed geëvalueerd. De business cases zijn door Ekwadraat (K. de Jong) opgesteld. De gedetailleerde inhoud van de business cases is op verzoek beschikbaar.

5.3 Technische evaluatie

Potentieel SHS

SHS lijkt technisch te passen bij vergisting. De biogasopbrengst wordt verhoogd en het vergistingsproces wordt met een factor twee versneld waardoor natuurgas in rond de veertien dagen vergist kan worden. Voor een optimale inpassing is het gebruik van restwarmte wenselijk.

De ontsluitingstijd is een belangrijke parameter voor de doorvoercapaciteit van de installatie. Hoe korter de ontsluitingstijd, hoe meer biomassa een gegeven installatie kan verwerken, hoe lager de kosten per ton verwerkte biomassa

De biogasopbrengst voor natuurgas die gebruikt is voor de business case is 190 en 236 Nm³ CH₄ / ton OS. In een enkele geoptimaliseerde test is er een potentieel aangetoond tot 281 Nm³ CH₄ / ton OS. Deze 'upward potential' van de technologie is nog niet meegenomen in de economische evaluatie om geen te rooskleurig beeld te schetsen. Als referentiewaarde voor natuurgas is gerekend met 154 Nm³ CH₄ / ton OS. Voor de dikke fractie van varkensmest is er met een biogasopbrengst van 92 Nm³ per ton vers materiaal met een droge stof gehalte van 28% gerekend. De gebruikte waarden zijn afkomstig uit biogastesten en te vinden in Hoofdstuk 4.

Potentieel enzymen

Hoewel enzymen in combinatie met SHS de biomassa bijna volledig hydrolyseren, heeft de combinatie SHS + enzymen in dit project geen meeropbrengst opgeleverd ten opzichte van enkel SHS in vergisting. De versnelling die enzymen geven in combinatie met SHS zorgt vooralsnog niet voor een toegevoegde waarde in vergisting aangezien er twee andere limiterende factoren in beeld komen.

De eerste bottleneck voor de toepassing van enzymen is de minimaal benodigde verblijftijd. Om het uitspoelen van langzaamgroeïende methanogenen te voorkomen, is in covergisting doorgaans een minimale verblijftijd van 12 dagen (theorie) tot 20 dagen (praktijk ervaring) benodigd. Door het ontsluiten met enkel SHS zou de verblijftijd voor lignocellulose materialen verkort kunnen worden. Het toevoegen van enzymen om de vergisting van natuurgras verder te versnellen brengt wel kosten met zich mee, maar levert geen mogelijkheid om de verblijftijd in de vergisting verder te verkorten. Voor de scenario's in covergisting zijn enzymen dan ook niet geëvalueerd. Om de grote versnelling van de combinatie van de technologieën tot waarde te laten komen is andere vergistingstechnologie nodig waarbij de verblijftijd van het te vergisten substraat wel verlaagd kan worden. Anaerobe zuiveringstechnologie, toegepast in de watersector (IC en UASB), kan worden gebruikt om de biomassa (bacteriën en methanogene archaea) in de reactor te houden. De verblijftijd van water met substraat (de Hydraulic Retention Time) van dergelijke reactoren is kort. De verblijftijd van de biomassa (de Solid Retention Time) is lang. In het scenario 'Industrieel korrelslib' (paragraaf 5.3) is het inzetten van deze technologie geëvalueerd.

De tweede bottleneck voor de toepassing van enzymen is de maximale belastbaarheid van het vergistingsproces. Ondanks dat enzymen in combinatie met SHS een factor 30 kunnen versnellen, kan per kubieke meter reactorinhoud de vergisting echter maar een factor 4 tot 6 versneld worden (zie Figuur 8). De reden hiervoor is dat er per technologie een maximale Organic Loading Rate (OLR) wordt gehanteerd die aangeeft hoeveel organische stof er maximaal per kubieke meter reactorinhoud per dag omgezet kan worden. Het gevolg hiervan is dat het benodigde reactorvolume van een te ontwerpen installatie relatief groot blijft waardoor het potentieel van volledige voorhydrolyse via SHS en enzymen niet volledig benut kan worden. Dit scenario is economisch geëvalueerd onder categorie 'Industrieel korrelslib'.

Technologie	OLR (kg ODM omgezet / m³ / d)	Factor	Reactorvolume (m³ / MW)
Vergister (gem.)	5	Ref.	3000
Vergister (max)	8	x1,6	1875
UASB	12-15	X2,4-3	1000-1250
IC	20-30	X4-6	500-750

Figuur 8: karakteristieken van enkele vergistingstechnologieën

5.4 Economische evaluatie

De economische evaluatie is uitgevoerd door Ekwadraat (K. de Jong). Binnen deze economische evaluatie zijn SDE vergoedingen gehanteerd die in 2015 door RVO zijn verstrekt. Binnen de SDE regeling van 2016 zijn geen grote aanpassingen van specifieke SDE vergoedingen waargenomen. Mogelijk kunnen toekomstige regelingen een grotere afwijking vertonen (zowel positief als negatief) en zullen dan opnieuw geëvalueerd moeten worden.

5.4.1 Scenario's

Er zijn binnen de economische evaluatie drie hoofdsenario's verkend. Inpassing van SHS in Co-mestvergisting, inpassing van SHS in Mono-mestvergisting en inpassing van SHS en enzymen in een installatie met industrieel korrelslib. Onderstaande figuur (Figuur 9) geeft een overzicht weer van de verschillende vergistingscategorieën met een evaluatie op hoofdlijnen.

	Mesofiel/ thermofiel	Opbrengst door SHS	Bestaande installaties	Hoogte SDE vergoeding	Financieel rendement
Co-mestvergisting	mesofiel	++	+++	++	++
Mono-mestvergisters	mesofiel	++	o	+++	+
Industrieel korrelslib	mesofiel	+++	o	+	o

Figuur 9: overzicht vergistingscategorieën en waarderungen bij diverse onderdelen

5.4.2 Industrieel korrelslib

Vergisting van natuurgras op industriële schaal met korrelslib (Industrieel korrelslib) bracht het laagste financieel rendement op. Dit werd voornamelijk veroorzaakt door de relatief hoge investeringskosten (nieuwbouw) tegenover relatief lage SDE vergoeding in vergelijking met Co-mestvergisting en Mono-mestvergisting. Daarnaast moesten extra kosten gerekend worden voor de enzymtechnologie en de benodigde warmte voor de SHS technologie. Een optimalisatie van dit scenario zou zijn om de technologie in te passen bij een bestaande waterzuiveringsinstallatie waar ook restwarmte aanwezig is.

5.4.3 Mono-mestvergisting

In de categorie 'Mono-mestvergisters' in combinatie met de SHS technologie bleek het financieel rendement laag door de relatief hoge investeringskosten voor complete nieuwbouw en de (ondanks de ontsluiting) relatief lage biogasopbrengst per ton dikke fractie. De biogasopbrengsten waarmee gerekend is bleken uit onderzoek van TNO nog wel suboptimaal (paragraaf 4.4 'Vergisting dikke fractie van mest'), dus mogelijk kan een dergelijk scenario na optimalisatie van het SHS proces op dikke fractie in de toekomst worden verbeterd. De SDE vergoeding binnen deze categorie voor het geproduceerde groen gas is daarentegen relatief hoog maar de kans dat deze categorie (als laatst beschikbare fase) ook daadwerkelijk wordt toegekend is binnen de SDE systematiek van 2015 gering. Ook geldt dat binnen dit scenario kosten gerekend moesten worden voor de warmte die benodigd is voor de SHS installatie.

5.4.4 Co-mestvergisting

SHS technologie toegepast binnen Co-mestvergisting levert het hoogste financieel rendement op. Deze business case is genomen als basis om de inpassing van SHS technologie volledig door te rekenen. Er wordt uitgegaan van bestaande vergistingsinstallaties met SDE op verlengde levensduur WKK (elektriciteit + warmte) met daarnaast een SDE op uitbreiding naar groen gas. Het voordeel van deze regeling is dat zowel de vergistingsinstallatie als WKK volledig of grotendeels zijn afgeschreven. De investeringskosten van de SHS installatie kunnen hierdoor financieel gemakkelijker worden gedragen. Als referentiecasse wordt natuurgras voorbehandeld met een extruder. Grote hoeveelheden natuurgras dienen hoe dan ook een voorbereidingsstap te ondergaan om te voorkomen dat er drijfslagen en verstoppingen in de vergistingstanks ontstaan. Beide processen maken het mogelijk om relatief grote hoeveelheden natuurgras (10-20kton) geschikt te maken voor vergisting en zijn dus concurrerende technieken.

Financiële uitgangspunten

Binnen de verschillende financiële scenario's zijn de onderstaande uitgangspunten gehanteerd. De aflossingstermijn is gelijkgesteld met de looptijd van de SDE, namelijk 12 jaar. Bij het aandeel eigen vermogen is uitgegaan van 15% volledig eigen vermogen aangevuld met een risicodragend vermogen-deel van 35%. Diverse investeringsfondsen zijn tegenwoordig bereid risico kapitaal te investeren in duurzame energieproductie tegen een rentepercentage van bijvoorbeeld 8%. Voor de invulling van het Vreemd Vermogen middels een bancaire lening is een rentepercentage van 6% gehanteerd. Als jaarlijkse inflatiecorrectie op de OPEX is gerekend met 1,8%, en 5% voor zowel onvoorziene investeringen als onvoorziene operationele kosten.

Businesscase scenario's

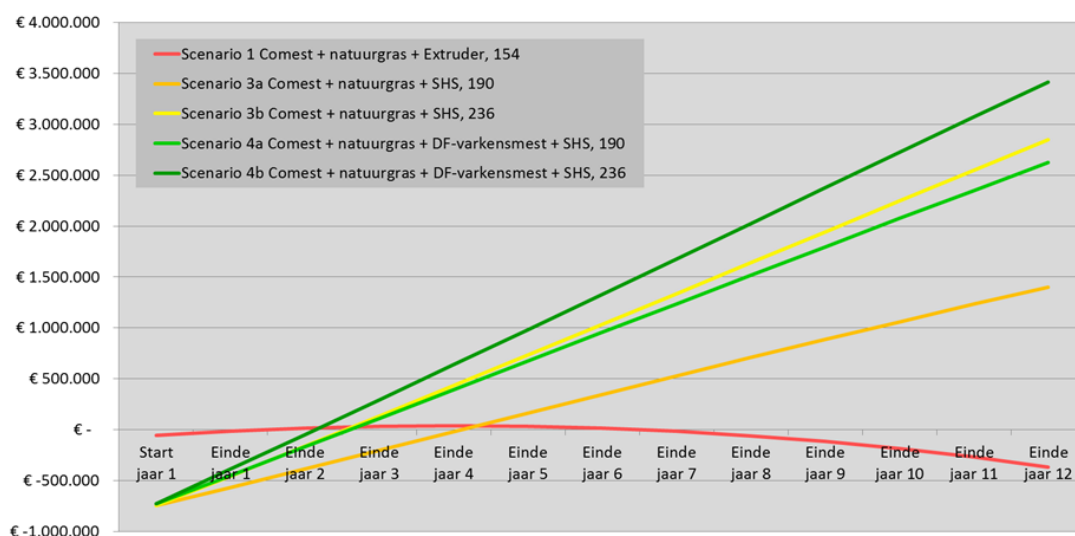
Er zijn een aantal scenario's in detail doorerekend.

- Scenario 1 betreft co-mestvergisting met WKK en extruder en 10kton natuurgras als referentiecasse.
- Scenario 3 betreft co-mestvergisting met WKK en uitbreiding groen gas met SHS en 20kton natuurgras.
- Scenario 4 betreft mestvergisting met WKK en uitbreiding groen gas met SHS en 10kton natuurgras en 10kton dikke fractie van varkensmest.

Resultaten

Onderstaande figuur (Figuur 10) geeft een overzicht van het cumulatieve eigen vermogen per scenario gedurende de looptijd van de 12 jaar van de verlengde levensduur. Uit deze opbrengsten die de ondernemer toekomen is de kostprijzdaling per m³ groen gas berekend. De kostprijzdaling ligt voor de doorgerekende scenario's tussen de €0,03 en €0,08 per m³ groen gas.

Resultaten businesscases met/zonder SHS Eigen Vermogen kasstroom (cumulatief)



Figuur 10: weergave van het cumulatieve eigen vermogen per scenario

5.5 Conclusies

In dit werkpakket is gebleken dat SHS een meerwaarde kan geven aan vergisting. Voor de combinatie SHS plus enzymen bestaat nog geen rendabel technisch perspectief in covergisting. Verdere evaluatie van de aanknopingspunten en mogelijkheden wordt gedaan in hoofdstuk 6.

De kapitaalslasten voor een bestaande comestvergister (scenario 3) die in aanmerking komt voor verlengde levensduur en uitbreid met 100% en groen gas opwerking en SHS ontsluiting is in totaal €5,0 miljoen, waarvan €1,8 miljoen voor de SHS installatie. Verdere aannames zijn: het gebruik van 20 kton natuurgas, een verblijftijd van 3 minuten in de SHS installatie, de productie van 5,5m miljoen m³ biogas per jaar (3,5 miljoen m³ groen gas, ~1,4MWhe), een afschrijvingstermijn van 12 jaar, het aandeel eigen vermogen van 15% en aandeel risicodragend vermogen 35%. Voor het conservatieve scenario 3a van +23% biogas uit natuurgas is er een kostprijsdaling van €0,03 per Nm³ groen gas, een totale Internal Rate of Return (IRR) van 22% op eigen vermogen en 10% op totaal vermogen. Voor scenario 3b met +53% biogas uit natuurgas wordt er nog verder bespaard op inkoop van co-producten en digestaat afvoer. Dit scenario geeft een kostprijsdaling van €0,07 per Nm³ groen gas, een IRR van 39% op eigen vermogen en van 13% op totaal vermogen. Verdere verhoging van de biogasopbrengst en slimme inzet van biomassa per seizoen (scenario 4a en 4b) zullen de kostprijsdaling nog meer richting de beoogde €0,15 per Nm³ groen gas kunnen brengen.



Hoofdstuk 6

Perspectief en vervolg

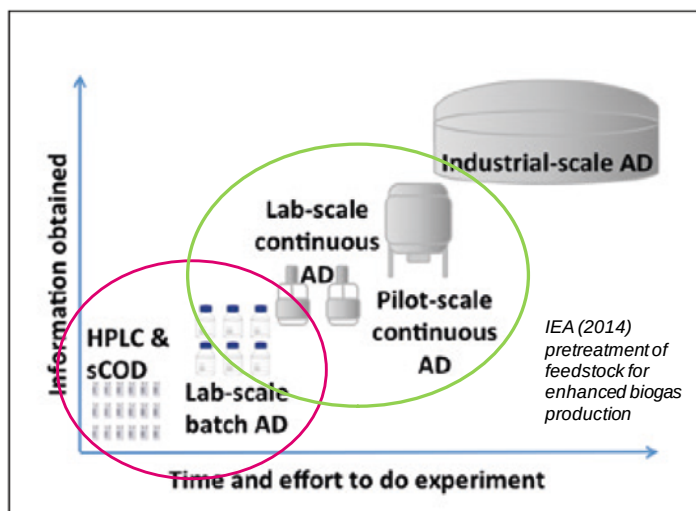


6.1 Perspectief SHS

Vergisting

In dit project een technische proof-of-principle en een positieve business case ontwikkeld voor het toepassen van SHS als pretreatment techniek voor een versnelde en verhoogde biogasproductie. Voor natuurgras waren de resultaten positief, verdere optimalisaties zijn nodig om de ontsluiting van de dikke fracties van digestaat en mest te verbeteren. De behaalde resultaten geven voldoende perspectief voor verdere doorontwikkeling van de technologie richting praktijk. Zeker ook omdat de technologie naast vergisting mogelijk andere markten zoals veevoer, papier en karton en groene chemie kan bedienen.

Figuur 11 geeft een overzicht van het traject van lab richting praktijk voor pretreatment technieken in de biogas sector. Dit onderzoek betrof een eerste screening, in de figuur rood omcirkeld. De vergistbaarheid van SHS ontsloten materiaal is getest op kleine schaal in batch testen. De SHS ontsluiting zelf vond plaats op lab-schaal. De volgende stap, groen omcirkeld, geeft de logische en noodzakelijke vervolgstappen aan richting toepassing in de praktijk.



Figuur 11: IEA doorontwikkeling van pretreatment technieken van lab naar praktijk

Continue vergistingstesten op labschaal zijn noodzakelijk om de vraag te beantwoorden of de cultures in stand gehouden kunnen worden, en of de cultures verder geoptimaliseerd kunnen worden. Daarnaast moet de opbrengstdata ter input van de business case robuuster gemaakt worden door middel van het ontsluiten van meerdere batches biomassa en deze te testen in vergisting. Naast de focus op vergisting is verdere ontwikkeling van de SHS nodig om met behulp van een pilot reactor de continue ontsluiting van biomassa en het effect daarvan op vergisting in de praktijk te demonstreren. Het uitvoeren van een detailed engineering kan de onzekerheidsmarge in de kapitaalslasten verminderen.

Naast de technische aspecten dient aandacht gegeven te worden aan de inpasbaarheid en business model. Genoemde kans is het toepassen van SHS op een centrale locatie zoals bijvoorbeeld een groenplein of groenplein. Op een dergelijke locatie kan de technologie

gedemonstreerd en gevalideerd worden. Ook kunnen op een centrale locatie grondstoffen voorbereid worden. Belangrijke aandachtspunt genoemd door ondernemers is de hoge investeringsdrempel van de technologie en de momenteel lastige financiering van projecten in de bio-energie sector. De onzekerheid in toekomstige biomassaprijzen en toekomstige wet- en regelgeving (bijvoorbeeld omtrent zware metalen en organische microverontreinigingen in bermgras) in relatie tot de lange afschrijvingstermijn van de apparatuur kan ondernemers ook weerhouden van investeren in dergelijke technologie. Verder zitten er limieten op het aanvoeren van laagwaardige biomassa in relatie tot transportkosten en verkrijgen van milieuvergunningen. Genoemde uitdaging is om als vervolgstap een sluitende business case te ontwikkelen voor een specifieke praktijklocatie.

6.2 Perspectief SHS + enzymen

Vergisting

In dit project een technische proof-of-principle gegeven van bijna volledige hydrolyse van natuurgras tot een zogenaamde 'sugar-crude'. Dit suikermengsel kan als inputstroom voor vergisting dienen. De enzymen zijn met name verantwoordelijk voor de versnelling waardoor lastig verteerbare lignocellulose substraten binnen een dag bijna volledig vergist kunnen worden. In de opgestelde business cases geeft deze versnelling echter nog geen economische meerwaarde. De extra snelheid die volledige ontsluiting brengt kan in praktijk niet optimaal benut worden. Reden hiervoor is dat in dit scenario de uitspoeling van methanogenen en de maximale belastbaarheid aan organische stof per kubieke meter reactorinhoud limiterende factoren worden. Om uitspoeling van methanogenen te voorkomen is andere vergistingstechnologie nodig, zoals gebruikt in de waterzuivering (IC of UASB technologie). Door limieten aan de maximale belastbaarheid van een vergister blijft het volume van de installatie relatief groot, waardoor de investering relatief hoog blijft en er geen maximaal voordeel gehaald kan worden uit de volledige ontsluiting.

Mogelijke aanknopingspunten voor de combinatie van SHS en enzymen in vergisting zijn:

- Het toepassen van een kleine hoeveelheid enzymen in combinatie met SHS om het proces een kleine boost te geven.
- Het toepassen van de gecombineerde technologie op een locatie in combinatie met een bestaande waterzuiveringsinstallatie met voldoende restwarmte voor de SHS.
- Het toepassen van de gecombineerde technologie op een centrale locatie en de geproduceerde 'sugar crude' als snel vergistbaar co-substraat te gebruiken.
- Het inventariseren of een volledige ontsluiting van dikke fractie van mest met SHS en enzymen het terugwinnen van mineralen uit oplossing mogelijk zou kunnen vereenvoudigen om zo extra impuls aan de business case te geven.

Het toepassen van enzymen op biomassa zonder voorontsluiting is niet effectief. Een vergister zelf geeft echter ook voorontsluiting van de biomassa waardoor enzymen in de vergister wel aan kunnen grijpen. Enzymen zelf kunnen een waardevolle toevoeging geven aan vergisting mits ze een meeropbrengst kunnen genereren. Andere types enzymen dan de enzymen in dit project geteste enzymen zijn hiervoor nodig. In een ander initiatief werken Bioclear en Ekwadraat hieraan, dit initiatief bevindt zich momenteel in de pilotfase.

Groene chemie

Voor toepassing richting groene chemie blijft de combinatie SHS en enzymen veelbelovend. Er is perspectief voor het doorontwikkelen van de gecombineerde technologieën waarmee een tweede generatie 'sugar crude' als grondstof voor de groene chemie geproduceerd kan worden. Uit de uit lignocellulose vrijgemaakte suikers zou dan vervolgens melkzuur of bioethanol geproduceerd kunnen worden. Voor de hand liggende vervolgstappen zijn:

- het verkennen van de economische haalbaarheid en de inpasbaarheid in de industriële keten
- het geven van proof-of-principle in de productie van groene chemicaliën op basis van het tweede generatie suikermengsel
- het optimaliseren en opschalen van de decentraal geproduceerde enzymcocktail.

6.3 Perspectief decentrale enzymproductie

Er is in dit project aangetoond dat de voor hydrolyse benodigde dosis van enzymen behoorlijk hoog is. De hoeveelheid van in dit project geteste commerciële enzymen nodig om een goede hydrolyse te verkrijgen was minimaal 10% van het aanwezige organische substraat. Dit betrof echt een ondergrens. Wanneer een ton organische stof op zijn beurt volledig wordt vergist, geeft dit bij omzetting naar elektriciteit een waarde van circa €250. Deze waarde is vergelijkbaar met de kostprijs van de benodigde commerciële enzymcocktails bij de genoemde dosering van 10%. Dit geeft aan dat er momenteel geen haalbare business case bestaat voor de toepassing van enzymen in combinatie met stoomontsluiting voor een relatief laagwaardige toepassing als bio-energie. Een business case voor een 'sugar crude' voor toepassing in groene chemie is ook nog verre van haalbaar met een suikerprijs van rond de €400 per ton.

Een flinke kostprijsreductie is daarom noodzakelijk. Multinationals die via traditionele industriële biotechnologie enzymcocktails op centrale locaties produceren werken continu aan kostprijsreductie van de benodigde enzymen via cocktail optimalisatie en schaalvergroting. Een alternatieve aanpak is om enzymcocktails lokaal te produceren. Dit is de visie van Bioclear en Ekwadraat. Voordeel van decentrale productie is dat er via inductie met de lokaal aanwezige voorontsloten biomassa een optimale cocktail geproduceerd kan worden. Kostenbesparingen kunnen gerealiseerd worden door het vermijden van kosten voor opzuivering, stabilisatie, verpakking, transport, opslag en winstmarge. Verdere voordeel van het gebruik van natuurlijke organismes (non GMO) kunnen zijn een reductie in de kosten voor sterilisatie en containment waardoor een relatief eenvoudig proces kan volstaan.

In dit project is de bruikbaarheid van enzymcocktails die geproduceerd zijn met geselecteerde natuurlijke organismes aangetoond. Verder is het aangetoond dat deze organismes onder niet steriele omstandigheden kunnen domineren. Het gebruiken van een tegen lagere kosten decentraal geproduceerde cocktail blijft daarom kansrijk. Een logische vervolgstap zou het optimaliseren en opschalen van deze cocktail zijn met het oog op het krijgen van verder inzicht in de kosten en performance in vergelijking met commerciële preparaten.



Bijlagen

- Bijlage 1 Project flyer
- Bijlage 2 Overzicht werkpakketten
- Bijlage 3 Testopstelling AMPTSII

Bijlage 1 Project flyer



TKI-project **Vergisting 2.0**



kostprijsreductie groen gas door verbeterde ontsluiting lignocellulose

Aanleiding

Er bestaat een groeiende behoefte en noodzaak om biogas te produceren uit lastig afbreekbare biomassa zoals mest, GFT-afval, bermgras en natuurgas. Deze materialen bestaan voor een groot gedeelte uit lignocellulose. Dat is een stevig complex van cellulose, hemicellulose en lignine dat nauwelijks vergistbaar is wegens de slechte toegankelijkheid van deze stoffen. Daardoor ontstaat een onvolledige omzetting van de biomassa en vermindert de economische haalbaarheid van de vergisting. Een betere en snellere omzetting van de uitgangsmaterialen kan uitkomst bieden.

Doel project

Binnen het project wordt een economisch haalbaar proces ontwikkeld voor de voorbehandeling van lignocellulosehoudende biomassa voor biogasproductie. Hierdoor moet het mogelijk zijn om met dezelfde hoeveelheid biomassa in dezelfde vergister in dezelfde tijd tot maximaal tweemaal zoveel biogas te produceren tegen lagere productiekosten. Doordat lignocellulose op een efficiënte manier in suikers wordt omgezet, biedt dit proces op termijn perspectief voor de decentrale productie van groene chemicaliën.

Uitvoering

De eerste stap in het beoogde proces is een Superheated Steam (SHS) technologie van TNO. Hiermee kunnen de lignocellulose macromoleculen worden opengeboken. Daarmee ontstaat een enorm aanbod aan toegankelijke biomassa voor de vergister. Om het vergistingsproces te versnellen is de toevoeging van enzymen nodig die ontsloten cellulose en hemicellulose hydrolyseren. Daarvoor zorgt de Greenstep technologie van Bioclear en Ekwadraat. In de Greenstep reactor worden enzymen met behulp van natuurlijke schimmels op locatie geproduceerd, waardoor de kostprijs van enzymen laag blijft. Deze combinatie van ontsluitingstechnologie en enzymtechnologie is nieuw voor Nederland en daarbuiten.

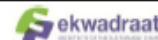
Het project wordt uitgevoerd in 2014 en 2015. Het eerste deel bestaat uit het aantonen van de technische haalbaarheid van het proces. Verschillende soorten mest(fracties) en co-substraten zullen in een kleine laboratoriumopstellingen getest worden. Met de meest kansrijke procescondities wordt daarna materiaal behandeld waarmee in kleine vergistingsproeven de biogasopbrengst wordt gemeten ('proof of principle'). Parallel daaraan wordt de technisch economische haalbaarheid doorgerekend voor een aantal scenario's. Bij een succesvolle uitkomst is het de bedoeling om de meest kansrijke combinatie(s) in een vervolgpilot verder door te ontwikkelen richting demonstratie van de technologie in een pilot.

Partners en financiering

Het project wordt financieel ondersteund door het Ministerie van Economische Zaken binnen de BBEG-regeling; een combinatie van de TKI Energie en TKI BioBased. Partners zijn kennisleveranciers Bioclear B.V. (projectleiding), TNO en Ekwadraat Group B.V., branchevertegenwoordiger ZLTO en firma's met eigen vergisters Jansen Wijhe Loonbedrijf en Grondwerken B.V., Schaap Bio-energie B.V. en De Betonpleats.



Agentschap NL
Ministerie van Economische Zaken



Bijlage 2 Overzicht werkpakketten

WP	Beschrijving	Uitvoerders	Resultaat	Periode
1	Ontsluitings-procedure	TNO Jansen Wijhe Betonpleats Schaap Bio-Energie ZLTO	*Kennis over de ontsluiting van lignocellulosehoudende biomassasoorten die worden gebruikt in mest/covergisting en bruikbaarheid van ontsloten materiaal voor vergistingsprocessen waaraan ook enzymen worden toegevoegd; een kosten-effectieve ontsluitingsprocedure	01.01.14 – 31.07.15
2	Enzymatische hydrolyse	Bioclear	*Kennis over procescondities voor toepassing enzymen op SHS-ontsloten lignocellulose biomassa *Kennis van de bruikbaarheid van ontsloten biomassa voor de enzymen van Bioclear.	01.03.14 – 31.07.15
3	Vergisting ontsloten biomassa	Bioclear TNO Jansen Wijhe Betonpleats Schaap Bio-Energie ZLTO	*Kennis over procescondities benodigd voor het succesvol vergisten van ontsloten biomassa. *Kennis van het effect van ontsluiting in combinatie met enzymen op de vergisting van lignocellulosehoudende biomassa (biogasopbrengst, snelheden, remmingen).	01.05.14 – 30.08.15
4	Technologische & economische evaluatie	Alle partners	*Kennis van de investeringskosten en operationele kosten van de ontsluiting en het economisch effect op het hele systeem. *Kennis van de optimale set-up van de gecombineerde ontsluitingstechnologieën voor verscheidene scenario's relevant aan de praktijk. *Doorrekening van economische haalbaarheid van de gecombineerde ontsluitingstechnologieën op verschillende bedrijfsgroottes en inpassing in bestaande en nieuwe bedrijven.	01.03.15 – 30.08.15
5	Rapportage	Bioclear TNO Ekwadraat	*Rapport	01.09.15 – 30.12.15
6	Project-management	Alle partners	*Afronding project binnen inhoudelijke doelstellingen en budget	01.01.14 – 30.09.15

Alle WP's betreffen Industrieel Onderzoek

Bijlage 3 Testopstelling AMPTSII

Bioclear gebruikt het afgebeelde AMPTSII systeem voor het uitvoeren van vergistingstesten. Dit systeem bestaat uit mechanisch geroerde flessen geplaatst in een temperatuur gecontroleerd waterbad. Het systeem is geschikt voor het uitvoeren van zowel droog- als natvergistingstesten waarbij condities zowel mesofiel als thermofiel ingesteld kunnen worden. In de configuratie kan er verder gekozen worden tussen het plaatsen van vijftien flessen met een inhoud van 0,5 liter of zes flessen met een inhoud van 2 liter. Testen gebeuren batchgewijs. Voor de flessen van 2 liter bestaat de additionele mogelijkheid om gedurende de test substraat toe te voegen en digestaat te verwijderen om zo een fed-batch of een continu proces te simuleren. Het geproduceerde biogas wordt eerst door een geconcentreerde loogoplossing geleid. De koolstofdioxide en waterstofsulfide uit het biogas wordt in het loog gefixeerd en kan aan het eind van de test door titratie bepaald worden. Het volume van het methaan wat na fixatie overblijft wordt vervolgens in een waterbad op kamertemperatuur per tien milliliter gemeten en gelogd. De gasmeting is continu waardoor er tijdens de test geen overdruk op de flessen ontstaat.



De precisie en accuraatheid van de vergistingtest is gevalideerd met een homogeen referentie substraat. Met de AMPTSII werd voor een triplo cellulose poeder de volgende waarden gemeten:

- variabiliteit van <1% in methaan opbrengst;
- gasopbrengst van $348 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4$ / ton organische stof;
- methaanpercentage van 49,4 vol.% CH_4 van het totale gasvolume.

De gemeten variabiliteit van <1% is voor een vergistingtest zeer laag. Voor de meeste soorten biomassa wordt met de AMPTSII typisch een variabiliteit van rond de 5% behaald, voor erg inhomogene substraten als bijvoorbeeld GFT ligt de verwachte variabiliteit maximaal rond de 10%.

De gemeten gasopbrengst van $348 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4$ / ton organische stof komt zeer goed overeen met verwachte theoretische waarden op basis van literatuur. In de literatuur wordt voor cellulose een gasopbrengst van $350 \pm 29 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4$ per ton organische stof gerapporteerd¹.

Het gemeten methaan percentage van 49,4 vol.% CH_4 komt zeer goed overeen met het verwachte methaan percentage van 50,0 vol.%. Het verwachte percentage is berekend op basis van de molecuulformule van cellulose $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ en de Buswell reactievergelijking $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_4 + 3\text{CO}_2)$.

¹ Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study., J Chem Technol Biotechnol 2011, 86, 1088-1098.