

Productie Groene Grondstoffen

BO-03-007-012

Paulien Harmsen, Bram Sperber, Rob Bakker

April 2010, Rapport 1135

Colofon

Titel	Ketens groene grondstoffen
Auteur(s)	PFH Harmsen, B Sperber, R Bakker
Nummer	1135
ISBN-nummer	ISBN nummer
Publicatiedatum	6 april 2010
Vertrouwelijk	Ja, expiratiedatum 6 juli 2010
OPD-code	-
Goedgekeurd door	-

Wageningen UR Food & Biobased Research
P.O. Box 17
NL-6700 AA Wageningen
Tel: +31 (0)317 480 084
E-mail: info.afsg@wur.nl
Internet: www.wur.nl

©Wageningen UR Food & Biobased Research

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, hetzij mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. De uitgever aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele fouten of onvolkomenheden.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publisher. The publisher does not accept any liability for inaccuracies in this report.



Het kwaliteitsmanagementsysteem van Wageningen UR Food & Biobased Research is gecertificeerd door SGS International Certification Services EESV op basis van ISO 9001:2000.

Inhoudsopgave

1 Inleiding	4
2 Barnsteenzuur	8
2.1 Inleiding	8
2.2 Ketens	9
2.3 Toepassingen barnsteenzuur en -derivaten	10
2.4 Producenten van barnsteenzuur met focus op Nederland	12
2.4.1 DSM/Roquette	12
2.4.2 Bioamber	13
2.4.3 Myriant	15
2.4.4 BASF en CSM	15
2.5 Ontwikkelingen	15
2.6 Feedback industriële stakeholders	17
3 Melkzuur	18
3.1 Inleiding	18
3.2 Ketens	19
3.3 Toepassingen melkzuur	20
3.4 Producenten van melkzuur	20
3.5 Ontwikkelingen	21
3.6 Feedback industriële stakeholders	22
4 Cellulase	23
4.1 Inleiding	23
4.2 Keten	23
4.3 Toepassing cellulase	24
4.3.1 Textiel industrie	24
4.3.2 Levensmiddelenindustrie	24
4.3.3 Diervoeding	24
4.3.4 Papier en pulp industrie	24
4.3.5 Saccharificatie van lignocellulose bionmassa	24
4.4 Producenten van cellulases	25
4.5 Ontwikkelingen	25
4.6 Feedback industriële stakeholders	26
5 Case studie: Bioraffinage in Bazancourt, Noord-Frankrijk	28
5.1 Bedrijvenconglomeraat in Bazancourt	28
5.2 Randvoorwaarden voor commerciële ontwikkeling	30
6 Conclusies	31
Literatuur	34

1 Inleiding

De Nederlandse overheid stimuleert de ontwikkeling van de Biobased Economy (BBE) door middel van verschillende instrumenten, zoals onderzoeksfinanciering, investeringsubsidies en andere programma's. In de visie op de BBE wordt vanuit de keten geredeneerd: van productie naar verwerking en toepassingen.

In de beleidsagenda van de overheidsvisie is een lijn met betrekking tot de productie van biomassa, verwerking en toepassingen aangegeven. In de overheidsvisie en het Groenboek Energietransitie is aangegeven dat Nederland zeker 60% van de biomassa zou moeten importeren tegenover 40% van eigen bodem, waaronder ook de meer dan 6 Mton reststromen die jaarlijks in Nederland geproduceerd worden.

Kennisvraag

De centrale kennisvraag van deze studie is hoe het Nederlandse overheidsbeleid beter kan bijdragen aan de totstandkoming van de BBE in Nederland. Om deze vraag te beantwoorden is het noodzakelijk om ontwikkelingen te schetsen die nodig zijn om de productieketens in de BBE tot volledige commerciële ontwikkeling te brengen, en hoe nieuw of bestaand beleid daarop in kan spelen. De uiteindelijke doelstelling van het project is om een onderbouwing en verdere uitwerking te ontwikkelen voor een strategie die tot doel heeft de productie van grondstoffen voor de BBE in Nederland te stimuleren.

Dit project is geen nieuwe verkenning van welke biomassa stromen er in Nederland beschikbaar zijn of komen, of welke half- of eindproducten in de BBE geproduceerd kunnen worden; hiertoe zijn bestaande studies beschikbaar die het vertrekpunt vormen van dit project. Deze studie heeft als doelstelling om:

- Kansrijke grondstof-productketens voor de BBE in Nederland te definiëren, op basis van bestaande studies
- Een aantal van deze ketens verder in detail uit te werken

Bij het verder uitwerken van een BBE-productieketen kan het zowel gaan om het begin van de keten (productie van grondstoffen), het middendeel daarvan (conversie) of de productie en de inzet van het eindproduct. Ook koppeling van productieketens op basis van bestaande reststromen die in Nederland voorhanden zijn is mogelijk.

Aanpak

Er zijn al veel generieke studies beschikbaar over bioraffinage ketens, producten, en beschikbaarheid van biomassa in Nederland, maar deze bevatten over het algemeen weinig informatie over specifiek Nederlandse grondstof-product combinaties (ketens) en hoe deze gestimuleerd kunnen worden. Een voorbeeld is het TNO-rapport "Biobased Economy-

verkenning van kansrijke gebieden voor Nederland” (Enzing, Groenestijn et al. 2008) waarin 15 producten zijn gerangschikt op relevantie voor industrie en de time-to-market.

Deze generieke studies zijn binnen dit project als basis gebruikt voor het opstellen van een longlist van de 14 meest relevante biobased ketens, en deze ketens zijn vervolgens beoordeeld op een aantal aspecten:

- (1) Zijn er bedrijven actief binnen de keten in Nederland?
- (2) Wat is de toegevoegde waarde van de keten cq het eindproduct t.o.v. de grondstof?
- (3) Wat is de marktpotentie van de geproduceerde producten/halffabricaten?

Vanuit deze inventarisatie is een voorstel gedaan voor een aantal kansrijke biobased cases voor verdere uitwerking, hierbij zijn de volgende criteria gebruikt:

- De productieketen kan redelijkerwijs binnen 5 jaar commercieel geïmplementeerd worden
- De keten is relevant voor huidige Nederlandse agro/food bedrijven, chemiebedrijven of havens
- De keten biedt een zo hoog mogelijk toegevoegde waarde

Selectie van Ketens

De tabel op de volgende pagina geeft een overzicht van 14 op bovenstaande criteria getoetste productieketens. Hieruit zijn de volgende ketens aangedragen voor mogelijke verdere uitwerking d.m.v. case studies:

- 2^e generatie biobrandstoffen o.b.v. koolhydraten, met als actieve bedrijven Abengoa, Nedalco, Biorights (ethanol) en Avantium (furanen)
- Productie van melkzuur en aanverwante producten voor de productie van biopolymeren, met als actieve bedrijven Purac en Synbra
- Productie van barnsteen zuur (succinic acid) voor de productie van platform chemicaliën en polymeren, met als actieve bedrijven DSM/Roquette
- Productie van cellulase enzymen als hulpstof bij grootschalige inzet van lignocellulose met als actieve bedrijven DSM en Dyadic NL

Na verdere feedback van de opdrachtgever zijn de volgende cases voor de BBE in Nederland verder uitgewerkt:

- Productie van barnsteen zuur als halffabricaat voor biobased eindproducten (Hoofdstuk 2)
- Productie van melkzuur als halffabricaat voor de BBE (Hoofdstuk 3)
- Productie van cellulase, een hulpstof bij de inzet van laagwaardige (ligno-) cellulosehoudende grondstoffen (Hoofdstuk 4).

Tevens is een consortium van bioraffinage bedrijven in Pomacle, Noord-Frankrijk als casestudie toegevoegd (Hoofdstuk 5).

Als onderdeel van de diepte-uitwerking zijn per case een aantal eigenschappen beschreven, die mede bepalen in hoeverre de productieketen in Nederland of daarbuiten op commerciële schaal geïmplementeerd zal worden.

In het tweede jaar van de studie zal opnieuw een aantal ketens waaronder biobased producten op basis van plantaardige oliën en vetten verder uitgewerkt worden.

	Onderwerp	Keten	Feedstock	Toepassing	Bedrijven actief in Nederland	Toegevoegde waarde	Marktpotentie	Nevenstroom	Opmerkingen
1	Bioethanol	(Voorbehandeling → enzymatische hydrolyse) → Suikers → fermentatie → Bioethanol	Suikergewassen en zetmeelgewassen (suikerbiet, mais, tarwe, gerst) lignocellulose?	Biobrandstof	<ul style="list-style-type: none"> Nedalco Biorights Abengoa BER 	+/-	+	DDGS Zeine	2 ^e generatie ethanol heeft mogelijk hogere marktwaarde door nieuw beleid
2	Bioethanol	Suikers → fermentatie → bioethanol → dehydratie → <ul style="list-style-type: none"> ethyleen butadien 	Suikergewassen en zetmeelgewassen (suikerbiet, mais, tarwe, gerst) Lignocellulose?	Chemicaliën; grondstof voor <ul style="list-style-type: none"> ethyleen (PE, PVC) butadien (synthetisch rubber) 		+	??		
3	Biodiesel HTU	Lignocellulose biomassa → HTU → biocrude → HDO → biodiesel	Natte biomassa (bietenpulp, slib, bagasse)	Biobrandstof	Biofuel	+/-	+/-		<ul style="list-style-type: none"> HDO-proces energetisch en economisch ongunstig HTU mengbaar met gewone diesel, geen aanpassing motoren
4	Cellulase (hulpstoffen)	Bioconversie van koolhydraten (cellulose, hemicellulose) tot fermenteerbare suikers	Mais, tarwe, suikerbiet, lignocellulose	Hydrolyse van cellulose (lignocellulose als biomass)	<ul style="list-style-type: none"> DSM Dyadic NI 	++	++		
5	Melkzuur	Suikers → fermentatie → melkzuur → polymerisatie → PLA	Mais, tarwe, suikerbiet, wei-eiwit, lignocellulose	<ul style="list-style-type: none"> Verpakkingen Kleding Schuim (vervanging van EPS piepschuim) 	<ul style="list-style-type: none"> Purac (melkzuur en lactide productie) Synbra (PLA-schuim) 	+	++		
6	Barnsteenzuur (Succinaat is zoutvorm)	Suikers → fermentatie → barnsteenzuur	Mais, tarwe, suikerbiet, wei-eiwit, lignocellulose	<ul style="list-style-type: none"> Chemicaliën (THF) Voedsel Grondstof voor polymeren 	DSM & Roquette	+	+/-		Behoeft aan goedkope fermentatie routes
7	Glycerol	Nevenstroom biodiesel productie	(Olie veresteren (MeOH) biodiesel + glycerol)	Chemicaliën (bv epichloorhydrine) als grondstof voor polymeren (PU, PET)	<ul style="list-style-type: none"> Methanor Solvay? 	+/-	?		
8	Furanen	Suikers → conversie → furanen	Suikergewassen C6: HMF C5: furfural, furaan	Chemicaliën; HMF is mogelijk grondstof (FDA) voor alternatief voor PET	Avantium	+	?		
9	Algen			<ul style="list-style-type: none"> Biodiesel Grondstof voor coatings Bioplastics 	<ul style="list-style-type: none"> Akzo Ingrepro 				
10	Oliën en vetten	<ul style="list-style-type: none"> Extractie van Calendula Extractie/uitpersen olegewassen/zaden Biomassa → Pyrolyse → bio-olie 	<ul style="list-style-type: none"> Calendula zaad Plantaardige olie Biomassa 	<ul style="list-style-type: none"> Verdunner in aldkyverf (ter vervanging van VOS) Halffabrikaat voor chemische toepassingen Groene basisgrondstoffen 	<ul style="list-style-type: none"> Calendula Oil & Ursa Paint Croda BTG 	++	++		
11	Eiwitten	<ul style="list-style-type: none"> Extractie Nevenstroom van bioethanol productie 	<ul style="list-style-type: none"> Biomassa (bv aardappelen, gras) Mais 	<ul style="list-style-type: none"> Cosmetica, biomedisch, coatings, food etc Farmacie, papiercoatings, binder 	<ul style="list-style-type: none"> AVEBE (Solanic) Zea fuels 	+	+		
12	Isosorbide	Zetmeel → enzymatische hydrolyse → glucose → sorbitol	Zetmeel (graan, mais, aardappelen)	<ul style="list-style-type: none"> Ftalaat-vrije weekmaker Grondstof voor polyesters of polyamides 	DSM & Roquette	+	+/-		
13	Agrovezelcomposieten	Hennep/vlas/jute vezels + PE/PP/PLA → agrovezelcomposieten	Vezelgewassen	<ul style="list-style-type: none"> Auto-onderdelen Bouwmaterialen Consumenten producten 	<ul style="list-style-type: none"> NPSP Paperfoam Tech-wood Greengran Isovlas 	+/-	+		
14	Thermoplastisch zetmeel (halffabrikaat)	Zetmeel → extrusie → TPS	Zetmeel (mais, graan aardappelen, rijst) of uit aardappel reststromen	<ul style="list-style-type: none"> Verpakkingen (folies, schuimen) Consumenten producten 	<ul style="list-style-type: none"> Avebe Paragon Rhodenburg (Solaryl) 	+/-	+		

- Zeer laag; - Laag; + Gemiddeld; ++ Hoog; +++ Zeer hoog

2 Barnsteenzuur

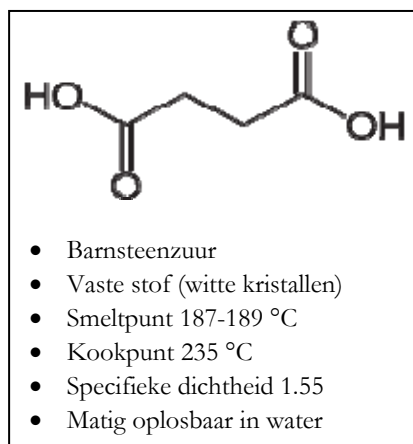
2.1 Inleiding

Barnsteenzuur (ethaan 1,2-dicarbonzuur of 1,4-butaandizuur, engelse term succinic acid) is een dicarbonzuur. De zoutvorm wordt succinaat genoemd, en het succinaat anion is een tussenproduct van de citroenzuurcyclus.

Barnsteenzuur wordt momenteel voornamelijk geproduceerd uit aardolie en aardgas. De stof als zodanig wordt veelvuldig gebruikt voor allerlei industriële toepassingen, bijvoorbeeld in geneesmiddelen, voedingsmiddelen en verven/coatings. Daarnaast wordt barnsteenzuur gebruikt als tussenproduct voor verschillende (hoogwaardige) polymeren.

Omdat barnsteenzuur veel lijkt op het veel gebruikte maleïnezuur (cis-buteendizuur) kunnen veel van de bekende industriële syntheses technieken worden geënt op barnsteenzuur. Amerikaanse bedrijven als MBI en DNP zijn bezig met de opschaling van de barnsteenzuurproductie na jaren van strategisch universitair onderzoek (Brouw op den 2008).

Barnsteenzuur kan met behulp van verschillende organismen via fermentatie uit glucose worden verkregen. Omdat het heel wat ingewikkelder is om barnsteenzuur uit een fermentatiemengsel te isoleren dan bijvoorbeeld een alcohol (isolatie door destilleren, kookpunt 78 °C) is het belangrijk een zo groot mogelijke opbrengst aan barnsteenzuur met zo min mogelijk bijproducten te krijgen. Hiervoor wordt veel onderzoek gedaan naar het verkrijgen van micro-organismen die productiever zijn en minder bijproducten leveren. Daarnaast moet het fermentatieproces ingepast kunnen worden in bestaande bioraffinageprocessen.



Succinic Acid (Gilmour 2009)

Biotech is not just about biofuels and medical research. A growing number of “white technologies”— industrial uses for biotech—are creating big changes in the manufacturing sector. The technology is bio-based and, if the industry experts are right, the products may prove better and cheaper than their current petrochemical counterparts.

Succinic acid is one such chemical product. In August 2004, the U.S. Department of Energy (DOE) identified succinic acid as one in a top twelve of priority chemicals, due to their technological feasibility, size of their potential market, and interest to the chemical industry. The race was soon on to produce succinic acid using biotech.

Historically known as “spirit of amber” succinic acid was traditionally obtained from ground amber and used medicinally. More recently, it has been derived from petrochemicals for diverse uses in the manufacturing of different plastic and polymer-based products.

Today, bio-based succinic acid from wheat or corn can produce exactly the same chemical as is derived from petrochemicals. And the price of production bucks the perceived trend of expensive green manufacturing processes. Bio-based succinic acid can already be produced for less than a dollar per pound—cheaper even than its Chinese counterpart produced from petrochemicals. Even better, the bio-based product is highly pure and not subject to the distribution problems that have sometimes affected imported supplies.

As a result, many products are already in production using bio-based succinic acid. They range from dashboards, side panels and other renewable car parts, to water bottles, the soles of running shoes, computer parts, PVC piping and other plastics. It has even been used to produce less corrosive and environmentally damaging forms of de-icing chemicals for runways, leading to significant reductions in the cost of servicing airplane braking systems.

Bio-based succinic acid is not only cheaper, it provides environmental advantages too. The manufacturing process is cleaner, producing less toxic waste, and because the base chemical product has not changed, manufacturers don't need to retool to build their products. And there's good news too on CO₂ emissions. The anaerobic fermentation in bio-based production actually consumes CO₂. Industry players claim that building one 25,000m² bio-based production plant is the equivalent to taking 8000 cars off the road every year.

With so much environmental and economic potential, bio-based succinic acid is spawning a new generation of tech start-ups with many big players already investing or waiting for the right time to buy up the leading-edge technologies as they emerge.

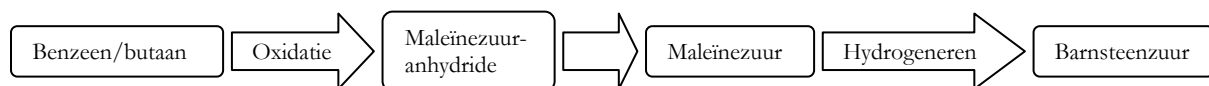
Yet, for all the potential and interest in white technologies, the U.S government has been slow to offer the same preferential loans to idea-based development as it does for more traditional manufacturing requirements like plant construction. Government backed loans in European countries have even led some US-based companies to build plants abroad while they await the outcome of the Obama administration's energy bill, expected later this year.

Biotech promises to bring sustainable and renewable products with a low environmental impact that generate whole new areas of business. To what extent the industry grows in the future, however, depends not only on great ideas, but savvy investments and political will too.

2.2 Ketens

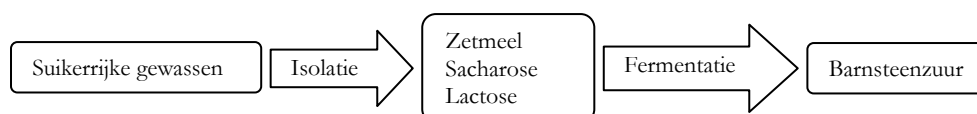
Voor de productie van barnsteenzuur kunnen 3 verschillende ketens worden beschreven, uitgaande van verschillende grondstoffen:

Petrochemische route



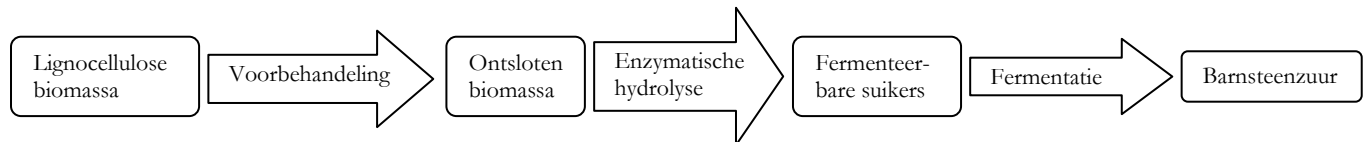
Suikerrijke gewassen

Grondstoffen voor deze route zijn bijvoorbeeld tarwe, maïs, suikerbiet, of wei (bijproduct van kaas maken). De koolhydraatrijke fracties zijn relatief eenvoudig te isoleren uit de gewassen en te fermenteren.



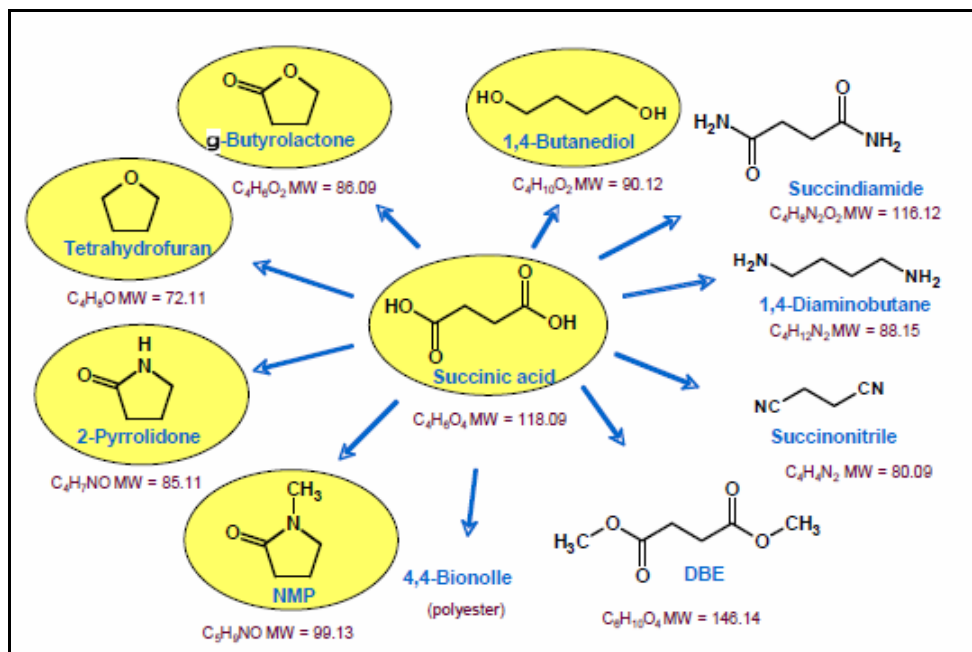
Lignocellulose biomassa

Grondstoffen voor deze route bestaan uit lignine-houdende gewassen zoals hout, stro, etc. Door de structuur van deze biomassa zijn verschillende stappen nodig om tot fermenteerbare suikers te komen. Voor de enzymatische hydrolyse is cellulase nodig om de cellulose af te breken (zie ook hoofdstuk 4).



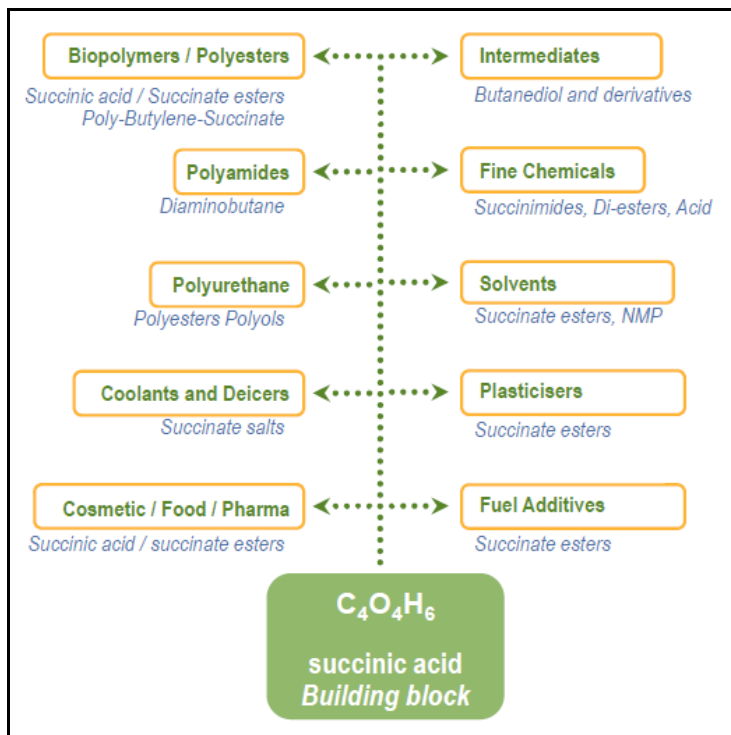
2.3 Toepassingen barnsteenzuur en -derivaten

Barnsteenzuur wordt gezien als een zeer belangrijke bouwsteen voor zowel bulk- als specialty chemicaliën. De wereldmarkt wordt geschat op 270 kton/jaar. Vanuit barnsteenzuur kunnen verschillende andere componenten geproduceerd worden (Figuur 1):



Figuur 1 Barnsteenzuur en conversieproducten (Werpy and Petersen 2004)

Barnsteenzuur kan primair worden ingezet voor de productie van butaandiol (BDO), tetrahydrofuraan (THF) en γ -butyrolacton (GBL). De chemie nodig voor het omzetten van barnsteenzuur tot BDO, THF en GBL is bekend en vergelijkbaar met de omzetting van maleïnezuur tot dezelfde familie van componenten. Volgens een studie uit 2004 ligt de uitdaging voor biobased barnsteenzuur met name op het ontwikkelen van katalysatoren die ongevoelig zijn voor de onzuiverheden die tijdens fermentatie kunnen ontstaan. Zolang de kosten voor fermentatie niet beneden een acceptabel niveau liggen (om te concurreren met petrochemisch barnsteenzuur moeten de kosten lager liggen dan \$ 0.55/kg) zal aan de ontwikkeling van katalysatoren weinig aandacht worden besteed (Werpy and Petersen 2004).



Figuur 2 Mogelijke applicaties van barnsteen zuur (Bioamber 2009)

Voorbeelden van polymeren met barnsteen zuur als grondstof zijn PBS en PBT:

- Poly(butyleen succinaat) (PBS)
 PBS is een biodegradeerbaar polymeer (polyester) met eigenschappen vergelijkbaar met PET (polyethyleentereftalaat). Het heeft zeer goede mechanische eigenschappen en kan tot een breed scala aan eindproducten verwerkt worden door conventionele technologieën. PBS wordt momenteel geproduceerd door condensatie polymerisatie van petrochemisch barnsteen zuur en 1,4-butaandiol, beide geproduceerd uit maleïnezuuranhydride zoals beschreven op pagina 9 (1,4-Butaandiol wordt gebruikt voor de productie van polymeren (bv PBT polyurethanen), oplosmiddelen (bv THF) en fijnchemicaliën) (Shen, Haupe et al. 2009). Biobased 1,4-butaandiol kan geproduceerd worden uit biobased barnsteen zuur door katalytische conversie, en PBS kan dus technisch gezien volledig biobased geproduceerd worden.
- Polybutyleentereftalaat (PBT)
 PBT is een lineaire aromatische polyester en vormt naast PET een van de meest belangrijke thermoplastische polyesters. PBT wordt geproduceerd door transesterificatie en condensatie polymerisatie van dimethyltereftalaat (DMT) en 1,4-butaandiol. Voor biobased PBT kan het petrochemische butaandiol vervangen worden door de biobased variant uit biobased barnsteen zuur.

2.4 Producenten van barnsteen zuur met focus op Nederland

In Nederland wordt synthetische barnsteen zuur geproduceerd door Arkema, Heybroek BV en NVCP Chemicals BV (Enzing, Groenestijn et al. 2008)(www.kompass.com). Initiatieven voor de productie van biobased barnsteen zuur worden hieronder beschreven.

2.4.1 DSM/Roquette

Grondstof:	Zetmeel uit graangewassen
Micro-organismen:	?
Pilot of demo:	Eind 2009, Lestrem (Frankrijk), capaciteit 'enkele honderden tonnen'
Commercieel:	2011/2012
Toepassingen:	Thermosets (poly-isosorbide succinaat), butaandiol, plasticizer, oplosmiddelen, thermoplastics

Voor het vervangen van petrochemisch barnsteen zuur door biobased barnsteen zuur hebben DSM en het Franse Roquette hun krachten gebundeld om gezamenlijk te werken aan de implementatie en commercialisatie van de productie van barnsteen zuur op basis van biologische en dus hernieuwbare grondstoffen met behulp van fermentatie.

Het biobased barnsteen zuur zal worden geproduceerd door middel van fermentatie van zetmeel. Het nieuwe productieproces is door DSM en Roquette gezamenlijk ontwikkeld. De huidige doelstelling van de samenwerking is om eind 2009 een demonstratiefabriek in bedrijf te hebben in Lestrem (Frankrijk). De capaciteit van deze fabriek zal enkele honderden tonnen aan biobased

De samenwerking tussen DSM en Roquette in dit project voor chemische producten op biobasis vloeit rechtstreeks voort uit het BioHub®-programma dat in 2006 werd goedgekeurd door het Franse Bureau voor Industriële Innovatie (AII). Het AII is een agentschap dat in 2005 is opgericht op initiatief van Jacques Chirac en is een schoolvoorbeeld van het Franse industriebeleid. Onder Sarkozy is de AII opgegaan in de OSEO (assistentie en financiële support voor Franse SMEs).

Het BioHub®-programma is opgezet voor het ontwikkelen van nieuwe businesskansen door middel van samenwerking tussen wetenschappelijke instituten, universiteiten en vooraanstaande Europese bedrijven op het gebied van industriële of 'witte' biotechnologie. Het is een 6-jarig R&D programma met als penvoerder de Franse zetmeelproducent Roquette Frères. Partners in het programma zijn het Nederlandse DSM, het Duitse Cognis, wegenbouwer Eurovia, verpakkingsleverancier Sidel en het jonge Franse biotechnologiebedrijf Metabolic Explorer. Een deel van het onderzoek wordt gedaan bij Franse onderzoeksinstituten zoals CNRS, INSA Lyon, INSA Rouen, en IMMCL Lille. Ook de TU Eindhoven en het Kluyver Centre in Delft zijn betrokken. Het projectbudget bedraagt € 92 miljoen over vijf jaar. Het AII draagt hieraan € 43 miljoen bij, in de vorm van een subsidie van € 22 miljoen en een voorschot van € 21 miljoen.

Het BioHub-programma onderscheidt twee innovatierichtingen, beide uitgaand van granen als grondstof, die door bioraffinage worden omgezet tot materialen en chemicaliën.

1. Ontwikkeling van geheel nieuwe ingrediënten zoals isosorbide, toepasbaar voor nieuwe polymeren. Toevoeging van isosorbide aan PET levert PET-flessen met een hogere temperatuurbestendigheid dan gebruikelijk, waardoor PET-flessen voortaan ook warme dranken kunnen bevatten. Isosorbide-derivaten kunnen dienen als weekmaker in PVC en als additief in een nieuw te ontwikkelen wegoppervlak.
2. Vervanging van petrochemische producten door biologische alternatieven, met als voordeel dat de vervaardiging hiervan energie- en dus kostenbesparend is. De samenwerking tussen DSM en Roquette valt hier ook onder.

barnsteenzuur per jaar bedragen. De verwachting is dat na een succesvolle proef de technologie binnen twee jaar zal worden ingezet voor grootschalige productie.

Fermentatieprocessen op basis van hernieuwbare grondstoffen zijn duurzaam. In het geval van barnsteenzuur levert het fermentatieproces een energiebesparing op van 30 tot 40% vergeleken met de gebruikelijke chemisch processen, waardoor de CO₂-uitstoot wordt verminderd.

Aangezien dit het eerste productieproces op biologische basis is waarin CO₂ actief wordt gebruikt bij de productie, is het positieve effect op de CO₂-uitstoot zelfs nog groter. Productieprocessen op basis van fermentatie zijn niet alleen gunstig voor het milieu maar leveren ook kostenbesparingen op omdat er minder energie voor nodig is. Barnsteenzuur op biologische basis heeft dus zowel ecologische als economische voordelen (DSM/Roquette 2008).

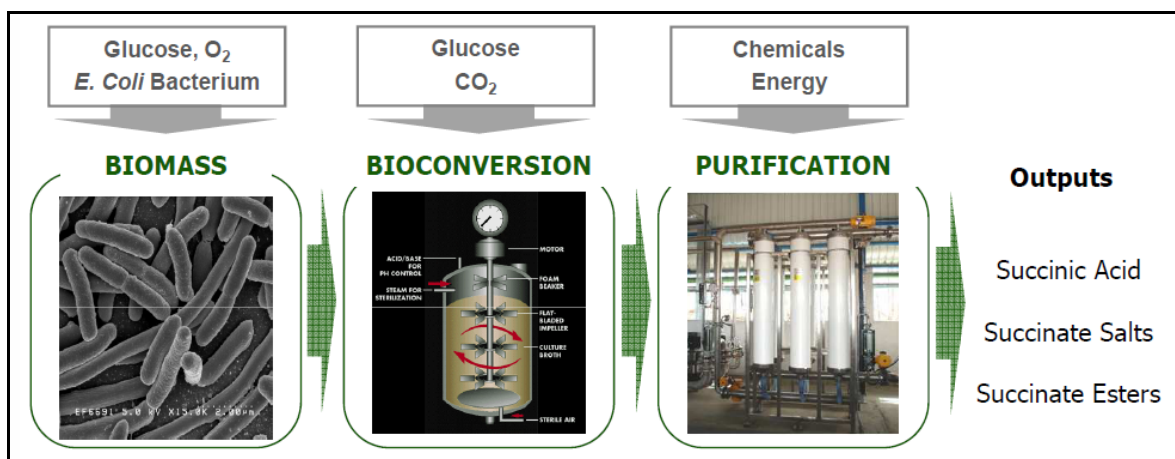
2.4.2 Bioamber

Grondstof:	Suikers (C5 en C6) uit suikerbiet en tarwe, CO ₂
Micro-organismen:	<i>Escherichia coli</i>
Pilot of demo:	2000 ton/y in Pomacle (Frankrijk), start eind 2009
Commercieel:	2011
Toepassingen:	Kalium succinaat in antivries (deicers?); succinaat esters in weekmakers, butaandiol en brandstof additief (fuel oxygenates); barnsteenzuur in polyurethanen en biopolymeren.

In laboratoria van DoE in Oak Ridge (ORNL) is een recombinante stam van de *Escherichia coli* ontwikkeld voor de productie van barnsteenzuur via fermentatie uit glucose. ORNL verwierf indertijd samen met de Michigan State University het octrooi op deze technologie, die in licentie is gegeven aan het bedrijf Diversified Natural Products (DNP) in New York. DNP heeft ondertussen een joint-venture opgezet met het Franse Agro Industries Recherche et Development (ARD), genaamd Bioamber (Brouw op den 2008).

Bioamber heeft inmiddels de barnsteenzuur productie opgeschaald tot 80.000 liter schaal en momenteel is een demonstratie fabriek van 2000 ton/jaar gebouwd in Pomacle, Frankrijk (zie ook beschrijving Bioraffinage in Noord-Frankrijk, Hoofdstuk 5). In deze fabriek is het gebruik van verschillende grondstoffen mogelijk zoals glucose en sucrose.

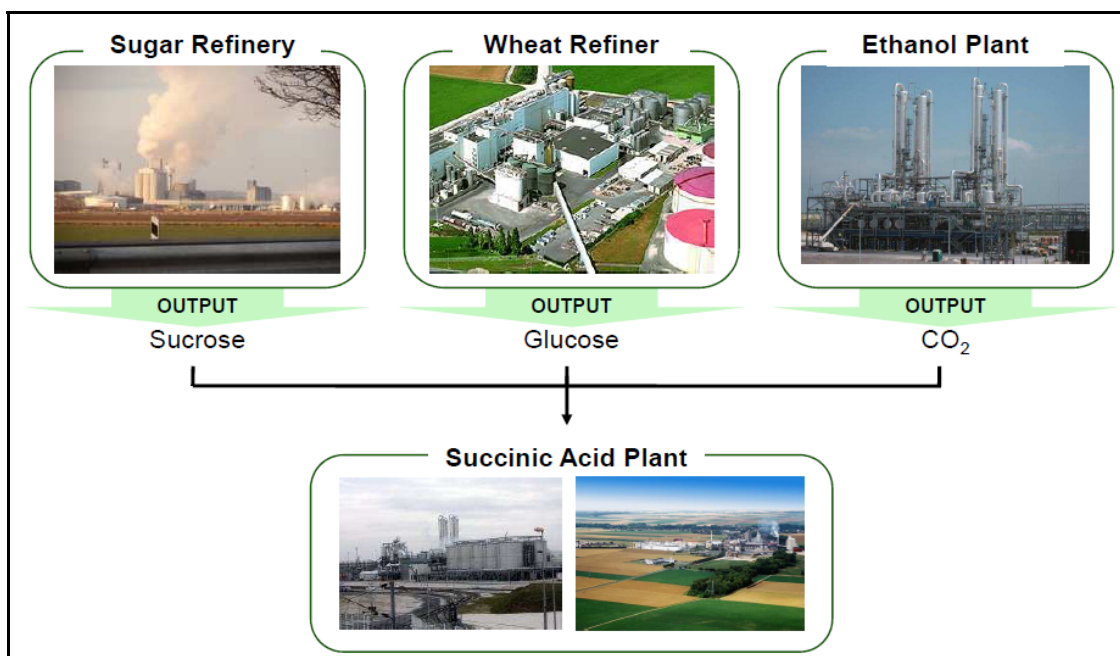
Het proces is schematisch weergegeven in Figuur 3. Bacteriën voor de fermentatie worden geproduceerd mbv glucose en zuurstof. Vervolgens zorgen deze bacteriën tijdens de fermentatie voor de omzetting van glucose en CO₂ tot barnsteenzuur. Na zuivering wordt zeer zuiver barnsteenzuur verkregen.



Figuur 3 Barnsteenzuur proces van Bioamber (Bioamber 2009)

Het is voorzien dat deze fabriek operationeel is eind 2009 en de technische en economische haalbaarheid van biobased barnsteenzuur kan aantonen. De productie van 1,4-butaandiol zal snel volgen. Tegelijkertijd worden nieuwe markten gezocht voor barnsteenzuur en –derivaten en zullen vanaf 2011 licenties verkocht gaan worden.

Ook zal er worden gewerkt aan de ontwikkeling van tweede generatie micro-organismen voor het omzetten van lignocellulose. De huidige barnsteenzuur markt wordt geschat op 30-50 kton/jaar en schattingen voor de toekomst liggen rond 180 kton/jaar (Annevelink 2009).



Figuur 4 Integratie van productstromen uit verschillende processen in Bazancourt-Pomacle voor de productie van barnsteenzuur (Bioamber 2009)

2.4.3 Myriant

Grondstof:	Zetmeel maar ook lignocellulose
Micro-organismen	Hetzelfde organisme als voor de productie van D-lactic acid in Spanje door Myriant en Purac
Pilot of demo:	Pilotschaal, productie van materiaal op ton-schaal in Q4 van 2009
Commercieel:	Halverwege 2010
Toepassingen:	Butaandiol, adipinezuur, biodegradeerbare polymeren

In 2008 is Myriant (USA) in samenwerking met Purac gestart met het produceren van (D)-melkzuur op commerciële schaal in Spanje (www.myriant.com/partnerships.htm, zie ook het hoofdstuk over melkzuur). Het proces van Myriant voor de productie van biobased barnsteen zuur is een afgeleide van deze melkzuur productie en hetzelfde organisme is daarvoor ingezet. Om deze reden heeft Myriant aanzienlijk kunnen besparen op de ontwikkelingskosten van het barnsteen zuur proces. Momenteel worden voor klanten samples geproduceerd op 1000 kg-schaal om de kwaliteit en specificaties van de biobased barnsteen zuur te verifiëren. Het is de verwachting dat halverwege 2010 de productie op commerciële schaal wordt uitgevoerd (McConnell 2009; McConnell 2009). Naast barnsteen zuur uit zetmeel werkt Myriant ook aan barnsteen zuur uit lignocellulose.

2.4.4 BASF en CSM

Grondstof:	Onbekend
Micro-organismen	"Innovative enzyme-based fermentation technology"
Pilot of demo:	Q2 van 2010
Commercieel:	Onbekend
Toepassingen:	Onbekend

BASF Future Business GmbH, onderdeel van BASF, en Purac, onderdeel van CSM, gaan samenwerken in de ontwikkeling van biobased barnsteen zuur. Ze hebben aangekondigd in het tweede kwartaal van 2010 barnsteen zuur te gaan produceren in een bestaande CSM fabriek in Spanje. Deze fabriek is al voorzien van apparatuur voor fermentatie en downstream processing op industriële schaal (CSM 2009).

2.5 Ontwikkelingen

Een van de meest recente review artikelen over de haalbaarheid van biobased barnsteen zuur is geschreven door Cukalovic en Stevens (Cukalovic and Stevens 2008). Hierin wordt het CO₂-verbruik en de mildere condities tijdens de bioconversie als groot voordeel gezien van barnsteen zuur productie in een bioraffinage proces. Daartegenover staat dat fermentaties vaak grote capaciteit vergen door sterke verdunning van substraten en producten en lange reactie tijden. Ook worden grote hoeveelheden zoutoplossingen geproduceerd (het fermentatie product is natrium succinaat) die een ecologisch en economisch probleem (kunnen) vormen. Een vergelijking tussen chemische en fermentatie routes is weergegeven in Tabel 1. Het omzetten van barnsteen zuur naar -derivaten wordt over het algemeen via chemische routes gedaan.

Tabel 1 Vergelijking tussen chemische routes en fermentatie routes voor de productie van barnsteenzuur (Cukalovic and Stevens 2008)

	Chemical routes	Fermentative routes
Origin	Non-renewable feedstocks – petrochemicals	Biobased feedstock – carbohydrates
Price considerations	Still cheaper than the renewable sources. Availability expected to decrease in time.	Feedstocks themselves do not contribute to the price as much as downstream processing
Routes	Developed routes, established technologies	Routes under constant improvement, young technologies
Yields and productivities	Generally high	Sometimes a large number of side products, diluted media, long reaction times
Major disadvantages	High energy demands (pressure and temperature). Catalysts disposal issues	Sensitivity of microorganisms, nutrient requirements, complicated product recovery, large amounts of waste
Public awareness	Decreasing popularity	Increased interest in improving currently applied routes and innovations

Barnsteenzuur wordt gezien als mogelijk vervanger van het petrochemische maleïnezuur. De dure fermentatieroutes worden vaak als grootste probleem van biobased barnsteenzuur genoemd, maar ook de recovery- en zuiveringsstappen na de fermentatie. Daarentegen wordt biobased barnsteenzuur steeds aantrekkelijker als vervanger van maleïnezuur door een sterke stijging van de petrochemische grondstofprijzen en de vraag naar maleïnezuur.

Onderwerpen waar momenteel veel onderzoek naar wordt verricht zijn:

- Het omzetten van barnsteenzuur tot derivaten met een hoge toegevoegde waarde in het fermentatie mengsel waardoor kosten voor opzuiveren verlaagd kunnen worden
- Alternatieve grondstoffen voor fermentatie naast glucose. Hierbij kan worden gedacht aan wei, glycerol, lignocellulose hydrolysaten of molasse van suikerriet, dus minder zuivere fermentatie grondstoffen
- Productievere micro-organismen
- Continue fermentatie, resulterend in hogere opbrengsten en productiviteit
- Goedkoper zuiveren en winnen van barnsteenzuur na fermentatie (downstream processing). Zo moeten na fermentatie cel-bijproducten en eiwitten verwijderd worden en succinaat zout worden omgezet in barnsteenzuur (pH moet neutraal blijven tijdens fermentatie).

Volgens het TNO-rapport (Enzing, Groenestijn et al. 2008) wordt voor de productie van barnsteenzuur in Nederland als voorwaarde een lage suikerprijs gegeven. Door de hoge suikerprijs in Nederland en West-Europa verplaatsen bedrijven hun fermentatie activiteiten naar gebieden met een lagere prijs.

Internationale bioraffinage activiteiten zijn vaak gekoppeld aan lokale grondstofproductie op grote schaal. Voor Nederland ligt de situatie anders; 60-80% van de biomassa moet worden geïmporteerd voor een BBE in Nederland. Op de lange termijn kan de grondstofprijs verlaagd worden door het verhogen van opbrengst/ha en het verbeteren van opslag technologie om zodoende seizoenonafhankelijke goedkope grondstoffen te verkrijgen (Annevelink, Broeze et al. 2009)

Het is voorzien dat er een grote markt bestaat voor de ontwikkeling van biobased producten uit barnsteen zuur als C4 bouwsteen. De markt voor synthetisch barnsteen zuur groeit 10% per jaar, en de verwachting is dat voor biobased barnsteen zuur deze groei veel groter kan zijn door nieuwe toepassingen. Voor Nederland zijn er ook mogelijkheden met DSM als trekker, en het is de verwachting dat meerdere bedrijven zullen volgen nadat haalbaarheid is aangetoond. Daarbij is de afzetmarkt voor biobased barnsteen zuur groot in Nederland (Enzing, Groenestijn et al. 2008).

2.6 Feedback industriële stakeholders

De huidige productie van barnsteen zuur op pilot-schaal is vooral gebaseerd op aanwezigheid van andere partijen (zie beschrijving Bioraffinage consortium Noord-Frankrijk; Hoofdstuk 5), en knowhow. Het is nog onzeker waar de verdere commercialisatie en opschaling van barnsteen zuur zal plaatsvinden: dit zal met name afhangen van het vinden van een afnemer/gebruiker voor barnsteen zuur.

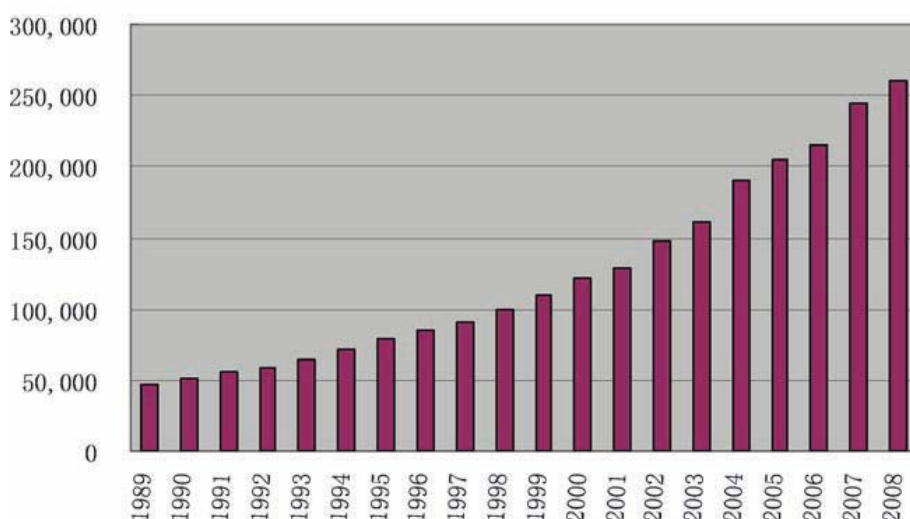
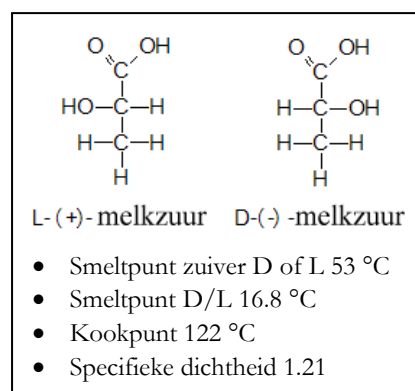
3 Melkzuur

3.1 Inleiding

Melkzuur (2-hydroxypropaanzuur, 2-hydroxypropionzuur, Engelse term lactic acid) kan door anaerobe fermentatie geproduceerd worden uit suikers. Hiervoor kunnen micro-organismen zoals bepaalde bacteriën of schimmels worden gebruikt. Materiaal dat geschikt is voor melkzuur fermentatie zijn C6-suikers uit bijvoorbeeld suikerbiet, maïs, tarwe, rijst, aardappel, wei of rietsuiker (Shen, Haufe et al. 2008). De keten voor de productie van melkzuur wordt beschreven in dit hoofdstuk, met de focus op Nederland.

Naast suikergewassen is er interesse voor het gebruik van lignocellulose biomassa als mogelijke grondstof voor melkzuur, maar momenteel is de technisch-economische haalbaarheid matig met name door complexe down-stream processing (zie ook bij barnsteenzuur). Daarentegen zijn er wel mogelijkheden door een snel groeiende markt voor de verwerking van melkzuur tot het bioplastische polymelkzuur of PLA (Enzing, Groenestijn et al. 2008).

Melkzuur met een hoge zuiverheid wordt toegepast in het hogere (fine chemical) marktsegment zoals melkzuur voor voedseltoepassingen en PLA voor medische toepassingen. Melkzuur kan echter ook als grondstof ('bulk chemical') dienen voor non-food en non-health toepassingen zoals voor bioplastics en in papier, lijm en textiel. Voor de laatste groep van toepassingen worden wat betreft zuiverheid veel minder hoge eisen gesteld. Chemisch geproduceerde melkzuur bestaat uit zowel D- als L-melkzuur (racemisch mengsel). Melkzuur uit fermentatie (biochemische route) geeft een chiraal zuiver product. De groei van het marktvolume van melkzuur en melkzuurderivaten is weergegeven in Figuur 5; de jaarlijkse groei is gemiddeld 10%.



Figuur 5 Commerciële marktvolume van melkzuur en derivaten (in ton). (Jim Jem, van der Pol et al. 2010)

3.2 Ketens

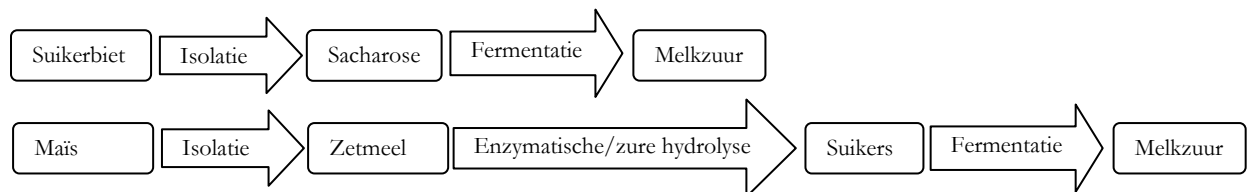
Voor de productie van melkzuur kunnen 3 verschillende ketens worden beschreven, uitgaande van verschillende grondstoffen:

Petrochemische grondstoffen

Historisch gezien werd melkzuur geproduceerd uit petrochemische grondstoffen zoals acetyleen of ethyleen. Het product is een racemisch mengsel (50% L en 50% D) met mogelijke toepassing als degradeerbare lijm. De productie van melkzuur via fermentatie van hernieuwbare grondstoffen is echter veel succesvoller (Shen, Haufe et al. 2009) en op dit moment wordt 95% van het melkzuur geproduceerd via de biochemische route.

Suikerrijke gewassen

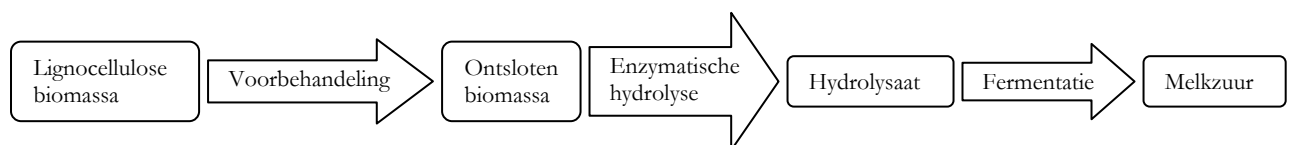
Via de biochemische route kan door fermentatie van koolhydraten optisch zuiver melkzuur verkregen worden. Grondstoffen voor deze route zijn bijvoorbeeld suikerbiet of maïs (of tapioca en suikerriet).



De efficiency van de suikerconversie door melkzuurbacteriën is meer dan 95% (Datta, Tsai et al. 1995). De fermentatie kan als batch of continu proces worden uitgevoerd. Aangezien meeste micro-organismen geen zure condities kunnen doorstaan wordt meestal gebluste kalk (calcium hydroxide) toegevoegd ter neutralisatie. De melkzuur wordt dan uiteindelijk verkregen door concentreren en aanzuren. Hiervoor wordt zwavelzuur toegevoegd waardoor grote hoeveelheden gips worden gevormd (calcium sulfaat) als nevenproduct. Het vrije melkzuur wordt dan verder opgezuiverd tot een bepaalde kwaliteit noodzakelijk voor chemische conversies (Wilke 1999).

Lignocellulose biomassa

Grondstoffen voor deze route bestaan uit lignine-houdende gewassen zoals hout, stro, etc. Door de structuur van deze biomassa zijn verschillende stappen nodig om tot fermenteerbare suikers te komen. Voor de enzymatische hydrolyse is cellulase nodig om de cellulose af te breken (zie ook hoofdstuk 4).



Uit een study van Reith *et al.* (Reith and de Bont 2007) is gebleken dat het technisch haalbaar is om melkzuur uit lignocellulose te produceren. Het modelsubstraat, Nederlands tarwestro, is mechanisch en chemisch voorbehandeld en enzymatisch gehydrolyseerd. Het hydrolysaat is vervolgens gefermenteerd.

Uit deze experimenten is gebleken dat melkzuur uit tarwestrohydrolysatens geproduceerd kan worden als de hoeveelheid toxische componenten zoals furanen gelimiteerd kan worden. Dit vermindert de noodzaak voor kostbare upstream processtappen voor het verwijderen van deze toxische stoffen. De melkzuurbacteriën bleken behoorlijk tolerant voor azijnzuur, furfural en hydroxymethylfurfural.

De economische haalbaarheid kon echter niet worden aangetoond. Productiekosten van fermenteerbare suikers uit tarwe stro was 0.19 €/kg. Hoewel dit lager ligt dan voor pure suiker zal de uiteindelijk kostprijs voor melkzuur uit stro hoger komen te liggen door dure zuiveringsstappen. Om het proces economisch haalbaar te maken zijn de volgende aanbevelingen gedaan:

- Optimaliseren van de voorbehandeling (hoger consistentie en hogere opbrengst fermenteerbare suikers)
- Optimaliseren van de enzymatische hydrolyse (lagere kosten en hogere stabiliteit enzymen)
- Optimaliseren fermentatie (recycling stromen)

Uit massa- en energie balansen voor de case *tarwe stro* → *melkzuur* via milde alkalische voorbehandeling en SSCF (Simultaneous Saccharification and Co-fermentation) bleek dat per ton stro 0.5 ton aan fermenteerbare suikers werd verkregen en uiteindelijk 0.42 ton melkzuur.

3.3 Toepassingen melkzuur

Melkzuur en -derivaten worden voor een groot deel ingezet in de voedingsmiddelenindustrie. Andere afzetmarkten zijn de verf-, chemische- en farmaceutische industrie, diervoederindustrie en petfoodbranche (Wijbenga 2008). Met name de voor productie van het bioplastisch polymelkzuur (PLA) is een grote hoeveelheid melkzuur nodig. Momenteel wordt wereldwijd ongeveer 150 kton/jaar geproduceerd, en de verwachting is dat dit verder zal groeien naar >260 kton/jaar. Ook is het mogelijk dat de markt de komende jaren exponentieel zal gaan groeien.

3.4 Producenten van melkzuur

Producenten van melkzuur wereldwijd zijn Purac (Nederland, wereldmarktleider), Galactic (Belgie), NatureWorks (USA) en ADM (USA). Purac produceert melkzuur en lactide als eindproduct en verkoopt dit aan klanten zoals het Nederlandse Synbra dat er PLA-schuim van maakt (Biofoam). Galactic en Nature Works produceren melkzuur en polymeriseren dit vervolgens tot PLA. Galactic is ook actief in de recycling van PLA door het inzamelen van PLA-producten en deze weer af te breken tot melkzuur (Galactic 2009).

Voor de productie van melkzuur is er een verschuiving gaande naar landen met lage lonen en lage suiker prijzen. Momenteel wordt er geen melkzuur geproduceerd uit Nederlandse gewassen (Enzing, Groenestijn et al. 2008).

PURAC

Grondstof:	Suikerriet en tapioca (Thailand)
Micro-organismen:	Onbekend
Commercieel:	November 2007 (Thailand, 100.000 ton L (+) melkzuur/y en 15.000 ton lactaat/y)
Toepassingen:	Voedingsmiddelenindustrie, verf, chemie (PLA), farmaceutische industrie, veevoeding

Purac is een dochtermaatschappij van CSM en producent van melkzuur, lactaten (zoutvorm van melkzuur), gluconaten, lactiden (cyclisch di-ester van melkzuur) en polylactiden; R&D van Purac is gevestigd in Gorinchem. In 2007 heeft Purac de melkzuurproductie in Nederland beëindigd en verplaatst naar fabrieken in Thailand, Brazilië en de VS. Purac heeft destijds ervoor gekozen de productie van melkzuur te concentreren in die landen waar dat het meest kostenefficiënt kan plaatsvinden. Zo zijn de grondstoffen voor de melkzuurfabriek in Thailand gewassen die daar ruimschoots beschikbaar zijn: suikerriet en tapioca. Purac gaat naast de bestaande melkzuur fabriek in Thailand een nieuwe lactide fabriek bouwen. Het is de verwachting dat de fabriek in 2011 operationeel zal zijn (Purac 2009). Lactide wordt door prepolymerisatie uit melkzuur verkregen en is een grondstof voor PLA. Lactide heeft bovendien als voordeel boven melkzuur dat het een vaste stof is die makkelijk vervoerd kan worden.

Afhankelijk van de grondstof zijn er een aantal zuiveringsstappen na fermentatie nodig; zo is kristalsuiker een relatief schone basisgrondstof vergeleken met tapioca. Daarnaast levert het proces naast melkzuur ook nog coproducten op die kunnen worden toegepast. De productie van melkzuur in Gorinchem is gestopt, wel worden melkzuurderivaten geproduceerd. Deze productie is toegenomen door het wegvallen van de melkzuurproductie (Wijbenga 2008).

3.5 Ontwikkelingen

Ontwikkelingen op het gebied van melkzuur zijn als volgt (Jim Jem, van der Pol et al. 2010):

- Productie van D(-)-melkzuur op grote schaal voor de ontwikkeling van hitteresistent PLA (stereocomplex PLA). Het huidige PLA geproduceerd uit L-(+)-melkzuur wordt zacht boven 55 °C en daardoor kunnen bv huidige PLA-bekers alleen gebruikt worden voor koude dranken. Verbeteren van de warmtegevoeligheid van PLA betekent een enorme verbreding van de mogelijkheden van PLA.
- Bij het huidige productieproces van melkzuur worden grote hoeveelheden gips gevormd. Momenteel wordt er gewerkt aan een zogenaamd 'gips-vrij proces' om de hoeveelheid chemicaliën en afvalstoffen te verminderen en zo het proces milieuvriendelijker te maken.
- Productie van melkzuur uit cellulose en lignocellulose om de competitie met voedsel-toepassingen te vermijden.

3.6 Feedback industriële stakeholders

Zoals eerder aangegeven is de productie van melkzuur in Nederland verplaatst naar productielocaties buiten Europa (o.a. Thailand, Brazilië). Dit heeft met name met de ruwe grondstofprijzen (suiker) te maken. De verdere verwerking van melkzuur naar producten blijft echter gelokaliseerd in Nederland. Ook de onderzoeks- en ontwikkelingsactiviteiten blijven voor een belangrijk gedeelte in een centrale locatie in Nederland, en het op het pilot-schaal uittesten van nieuwe productietechnieken voor melkzuur wordt in Nederland uitgevoerd.

De huidige industrie ziet veel toekomst in de inzet van alternatieve grondstoffen voor melkzuurproductie, inclusief cellulose-rijke biomassa (makkelijk ontsluitbaar materiaal zoals secundaire agro-reststromen), en op termijn lignocellulose (moeilijk ontsluitbaar materiaal zoals stro en hout). Mede daartoe heeft de industrie zich aangesloten bij de lopende onderzoeksconsortia op dit gebied, zoals het BE-Basic Programma en het Kluyver Centrum.

Naarmate de technologie voor inzet van nieuwe grondstoffen verder ontwikkeld is, verwacht men dat melkzuurproductie uit primaire grondstoffen ook weer in Nederland zal plaatsvinden. Plannen voor de bouw van een pilot-installatie voor productie van melkzuur uit cellulose-rijke grondstoffen zijn al in een ver gevorderd stadium. De industrie ziet dus een belangrijke rol weggelegd voor inzet van nieuwe grondstoffen, en het verduurzamen van het productieproces voor melkzuur.

4 Cellulase

4.1 Inleiding

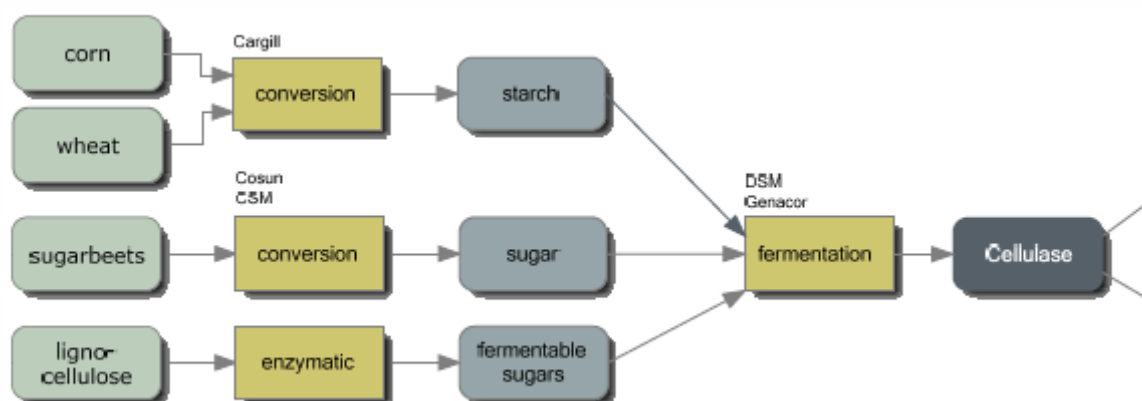
Cellulase is de verzamelnaam voor enzymen die synergistisch werken in de hydrolyse van cellulose (poly- β -1,4-glucose) tot glucose. Cellulose komt in de natuur voornamelijk voor in de celwand van planten en maakt deel uit van een complex met hemicellulose en lignine dat de plant zowel stevigheid geeft als beschermt tegen infecties.

Het complex van cellulose, hemicellulose en lignine wordt lignocellulose genoemd en is de basis voor processen gebaseerd op 2^e generatie biomassa's. Voor de afbraak van cellulose tot glucose dient dus ook hemicellulose en lignine te worden afgebroken of verwijderd. Dit gebeurt vaak door de lignocellulose rijke biomassa een fysisch-chemische (hoge temperatuur, zuur of loog) voorbehandeling te geven. Commerciële cellulase preparaten bevatten ook enzymen (hemicellulases) die in staat zijn om hemicellulose af te breken. Glucose, maar ook suikers uit de hemicellulose fractie, kunnen vervolgens gefermenteerd worden tot producten als ethanol, butanol, aceton, barnsteenzuur of melkzuur.

Cellulases worden veelal in schimmels (*Trichoderma*, *Humicola*) geproduceerd, maar er zijn ook bacteriën die cellulases produceren (Lynd, Weimer et al. 2002). Op dit moment is de prijs van cellulases nog te hoog voor een economisch rendabel proces. Ook zijn niet alle benodigde activiteiten (in voldoende mate) in de cellulases aanwezig voor een efficiënte saccharificatie (tot suikers omzetten) van de biomassa.

4.2 Keten

Commerciële cellulases worden veelal geproduceerd door een schimmel uit de *Trichoderma* familie, maar kunnen ook een andere bron (bacterie) hebben afhankelijk van hun toepassing. Het micro-organisme groeit op een suikerbron en de cellulases worden in het fermentatie medium uitgescheiden. Na het opwerken van het fermentatiemedium wordt een vloeibaar of vast cellulase preparaat verkregen. De grootste ingaande grondstofstroom zijn de suikers die in de fermentatie worden gebruikt door het micro-organisme.



Figuur 6 Keten voor productie van cellulase (Enzing, Groenestijn et al. 2008)

4.3 Toepassing cellulase

Cellulases kennen verschillende industriële toepassingen. Ze worden gebruikt in de textielindustrie, voedingsmiddelenindustrie, voor dierlijke voeding en de papier- en pulpindustrie (Bhat 2000). Recent is hier het gebruik voor saccharificatie van lignocellulose-rijke biomassa bijgekomen.

4.3.1 *Textiel industrie*

Cellulases worden in de textiel industrie gebruikt om een stonewash finish te geven aan stoffen door het verwijderen van kleurstoffen. Ook worden ze gebruikt om de textiel een "biopolish" te geven. Op het oppervlak van de textiel steken korte fibrillen uit het oppervlak die een negatief effect hebben op de zachtheid en kleureigenschappen. Met behulp van cellulases kunnen deze fibrillen worden verwijderd. Om dezelfde redenen worden cellulases toegevoegd aan wasmiddelen (Galante, De Conti et al. 1998). De cellulases die in de wasmiddelindustrie worden gebruikt hebben een goede activiteit onder basische condities (Bhat 2000).

4.3.2 *Levensmiddelenindustrie*

De levensmiddelenindustrie gebruikt cellulases (in combinatie met hemicellulases en pectinases) om de sapopbrengst uit fruit te verhogen en om het troebel worden van het sap tegen te gaan. Door het desintegreren van de celwand wordt de sapopbrengst verhoogd. Fruitsoorten die moeilijk persbaar zijn (bv. abrikoos, mango, papaja, banaan) kunnen met behulp van de juiste enzymcocktail worden uitgeperst en aan gemengde fruitdranken worden toegevoegd (Grassin and Fauquembergue 1996). Voor het brouwen van bier worden enzymen, waaronder cellulases, toegevoegd om een goede mout te maken. Bij de productie van wijn worden o.a. ook cellulases gebruikt om de extractie uit de druiven te verbeteren, de filtratiesnelheid te verhogen en viscositeit te verlagen (Galante, De Conti et al. 1998).

4.3.3 *Diervoeding*

Cellulases worden in diervoeding gebruikt om de voedingswaarde te verhogen. Door polysacchariden (niet afkomstig van zetmeel) gedeeltelijk te hydrolyseren in graangebaseerde voeding voor bijvoorbeeld kippen wordt de voederomzetting verbeterd en wordt een snellere gewichtstoename van het dier verkregen. Bij runderen wordt ook een toename van de melkproductie bewerkstelligd (Bhat 2000).

4.3.4 *Papier en pulp industrie*

De papier- en pulpindustrie gebruikt cellulases voor vezelmodificatie, het verwijderen van inkt bij papier recycling en verbetering van de ontwatering van de pulp. In al deze processen zijn ook de activiteiten van de hemicellulases erg belangrijk (Bhat 2000).

4.3.5 *Saccharificatie van lignocellulose biomassa*

In tweede generatie biobrandstoffenproductie (ethanol, butanol) vormen cellulases een essentieel onderdeel van het proces. Lignocelluloserijke grondstoffen (bv. stro van tarwe, gerst, rijst of maïsstengels) bestaan voor een belangrijk gedeelte uit cellulose. Om uit deze cellulosefractie

glucose vrij te maken wordt de biomassa eerst chemisch/mechanisch voorbehandeld. Vervolgens zijn de cellulases verantwoordelijk voor het omzetten van cellulose in glucose. Glucose wordt dan door micro-organismen omgezet in ethanol of butanol in geval van biobrandstoffen (Wilson 2009). De cellulases in dit proces dienen een zo hoog mogelijke activiteit te hebben, voor de laagst mogelijke productie prijs, aangezien de producten moeten concurreren met producten uit de petrochemische industrie.

4.4 Producenten van cellulases

Wereldwijd wordt de enzymmarkt voor industrieel gebruik gedomineerd door 2 Deense bedrijven: Novozymes met een marktaandeel van 47% en Genencor (Danisco) met een marktaandeel van 21%. Het Nederlandse DSM heeft een marktaandeel van 6% (Novozymes 2009). Hoe de verdeling specifiek is voor de cellulasemarkt is niet duidelijk.

De waarde van de totale enzymmarkt wordt op 3 miljard euro geschat, waarvan 60% industriële enzymen zijn. Cellulases beslaan 8% van de wereldwijde industriële enzym vraag (Enzing, Groenestijn et al. 2008). Het is de verwachting dat het marktaandeel voor cellulases sterk zal toenemen wanneer lignocellulose biomassa op grote schaal ingezet gaat worden voor de productie van biobrandstoffen of bulk(chemicaliën) (Wolfson 2005).

In Nederland is alleen DSM actief als producent van cellulase. De cellulaseproducten van DSM zijn bedoelt voor de levensmiddelenmarkt (DSM 2005; DSM 2009). Wereldwijd zijn met name Novozymes en Genencor actief op verschillende toepassingsgebieden, maar er zijn ook diverse andere kleinere bedrijven actief zoals Dyadic, Biocatalysts, Lyven, en Rohm-AB Enzymes.

4.5 Ontwikkelingen

De voornaamste ontwikkelingen met betrekking tot cellulases vinden plaats op het afbreken van lignocellulose biomassa tot fermenteerbare suikers. Vanuit dit oogpunt worden niet alleen cellulases ontwikkeld maar ook enzymen die andere structurele componenten (met name hemicellulose en lignine) uit lignocellulose biomassa kunnen afbreken. Deze ontwikkelingen kunnen niet los van elkaar worden gezien.

DSM heeft een programma voor de ontwikkeling van cellulases en heeft daarvoor een subsidie gekregen van de Amerikaanse overheid van 7.4 M\$ voor een consortium waar ook Abengoa Bioenergy New Technologies, Los Alamos Laboratory en Sandia National Laboratory deel van uit maken (Aa 2008; DSM 2008; Van der Meulen 2008).

Ondanks dat er in Nederland geen andere producenten zijn van cellulases, zijn de ontwikkelingen van Genencor, Dyadic alsmede Novozymes wel van belang voor Nederland; Genencor en Dyadic voeren in Nederland een belangrijk deel van hun onderzoek uit, terwijl Novozymes een belangrijke concurrent is voor de bedrijven met een Nederlandse vestiging.

Dyadic heeft een onderzoeksfaciliteit in Wageningen waar voornamelijk onderzoek wordt gedaan naar (hemi)cellulases in samenwerking met partners als Wageningen University and Research centre, Royal Nedalco, TU-Delft, ECN, Abengoa Bioenergy New Technologies, Universiteit Utrecht en meerdere internationale partners in programma's gesponsord door EOS, KP7 (EU)

en EUREKA (EU) (Dyadic 2009; Dyadic 2009). Dyadic heeft inmiddels twee cellulase preparaten op de markt voor lignocellulose saccharificatie (Dyadic 2009).

Genencor heeft een onderzoeksfaciliteit in Leiden, maar heeft geen directe samenwerkingsverbanden met Nederlandse partners. Genencor betreft veel sponsoring van de Amerikaanse overheid. Verder heeft het onderzoekspartners in Scandinavië, België en Frankrijk (Genencor 2009). Genencor was de eerste cellulase producent die een commercieel cellulase op de markt bracht voor lignocellulose saccharificatie (Genencor 2007). Genencor heeft dit product verder ontwikkeld en er bestaat inmiddels een tweede generatie van (Genencor 2009).

Novozymes bracht in 2009 de Cellic series op de markt voor saccharificatie van lignocellulose biomassa. Het heeft als doel om de kosten van dit product in 2010 met 50% te verminderen, teneinde een commercieel levensvatbaar proces op te zetten voor de productie van biobrandstoffen uit lignocellulose (Novozymes 2009). Novozymes heeft voornamelijk partners in het opzetten van productiefaciliteiten voor biobrandstoffen. Hiervoor heeft het partnerships in o.a. Brazilië (Novozymes 2007), Denemarken (Novozymes 2009), India (Novozymes 2009), China (Novozymes 2009) en de VS (Novozymes 2006). Onderzoek naar de verbetering van cellulases wordt voornamelijk door Novozymes zelf gedaan. Daarvoor kregen ze wel een subsidie voor dit onderzoek van het Amerikaanse Department of Energy in 2008 ter waarde van 12.3 M US\$ (Novozymes 2008).

4.6 Feedback industriële stakeholders

De productie van cellulose-afbrekende enzymen is relevant voor een groot aantal industrieën, waaronder de pulp en papierindustrie, de productie van veevoer, biobrandstofproductie, en de voedingsindustrie. Het gebruik van deze enzymen zal verder toenemen bij verdere ontwikkeling van de BBE. Naarmate de inzet van cellulose-rijke biomassa toeneemt, zal cellulase op grootschalige wijze worden ingezet op productielocaties voor biobrandstoffen, melkzuur, veevoer en andere productieprocessen.

De industrie verwacht dat de productie van cellulases niet op een of enkele centrale locaties zal plaatsvinden, maar op locatie waar cellulase als hulpstof wordt ingezet. Als voorbeeld wordt genoemd een grote tweede generatie bio-ethanolfabriek, waarbij de benodigde cellulase in dezelfde fabriek geproduceerd wordt. Hiertoe zullen ook fermenteerbare suikers uit cellulose-rijke grondstoffen worden ingezet. Deze decentrale productie heeft een aantal voordelen, waaronder lagere transportkosten, en ook lagere productiekosten doordat enzymen minder gezuiverd hoeven te worden.

De productie van cellulase zal verder m.b.v. moderne biotechnologie toegespitst worden op de specifieke alternatieve grondstoffen die worden ingezet in de BBE. In vergelijking met de productie van melkzuur, barnsteen zuur en ethanol zijn de grondstofkosten voor cellulaseproductie minder van belang.

Samenvattend kan gesteld worden dat productie van cellulase in de BBE vooral daar zal plaatsvinden waar ook andere productieprocessen, waarbij cellulose-rijke grondstoffen ingezet worden, uitgevoerd worden. Zo zal bij verdere ontwikkeling van tweede generatie biobrandstoffen in Nederland ook grootschalige productie van cellulase in Nederland plaatsvinden.

5 Case studie: Bioraffinage in Bazancourt, Noord-Frankrijk

5.1 Bedrijvenconglomeraat in Bazancourt

Om verder te analyseren welke omstandigheden ertoe kunnen bijdragen dat Biobased Productieketens in Nederland tot commerciële ontwikkeling worden gebracht is het relevant om ontwikkelingen in de ons omringende landen te beschrijven. Als voorbeeld worden hier bioraffinage ontwikkelingen in Noord-Frankrijk beschreven.

In de plaats Bazancourt, iets ten noorden van de stad Reims, is een conglomeraat van agro-bedrijven ontstaan waarbij gezamenlijk geïnvesteerd wordt in nieuwe, biobased productieketens, zowel op het gebied van onderzoek en ontwikkeling, alsook de verdere commerciële productie van biobased producten. De ontwikkelingen in Bazancourt zijn met name relevant voor de situatie in Nederland omdat de bioraffinageketens gebaseerd zijn op primaire landbouwproductie die ook in Nederland bestaat, te weten productie van suiker uit suikerbiet en de productie van granen en veevoer.

De bedrijven zijn sterk met elkaar verbonden, onder meer door de onderlinge toeleverantie van primaire grondstoffen, co-producten, hulpstoffen en water en energie (zowel elektriciteit als proceswarmte). Daarnaast wordt er onder leiding van een gespecialiseerd onderzoeksbedrijf, ARD, dat zich geheel richt op ontwikkeling van nieuwe Biobased Productieketens, een groot aantal processen en producten verder ontwikkeld. Voorbeelden zijn de productie van barnsteenzuur, ethanol uit lignocellulose, melkzuur, maar ook hoogwaardige producten zoals extracten uit plantaardige olie.

Het onderzoeksbedrijf ARD beschikt over een state-of-the art onderzoekscentrum voor opschaling van fermentatie en bioraffinage processen op pilot- en demonstratieschaal, en participeert in verschillende nationale en internationale kennisconsortia waaronder BioSynergy. Het consortium van bedrijven investeert gezamenlijk in dit onderzoek, en door de organisatie van bedrijven rondom het onderzoek heeft zich een belangrijk incubatiecentrum voor nieuwe biobased technologieën gevormd.

Een schematische weergave van het bedrijvenconglomeraat is weergegeven in Figuur 7. Deze figuur geeft onder meer de onderlinge verbanden weer en of het gaat om levering c.q. gebruik van elkaars halfproducten, diensten en gezamenlijke investeringen.

Binnen het conglomeraat kunnen verschillende bedrijven uit bestaande agro-industrie, energiebedrijven, onderzoek, en onderwijs onderscheiden worden:

Bestaande agro-industrie

Sucrierie Cooperative: kristalsuiker uit suikerbieten (307 pers)

Chamtor: productie van graanproducten uit tarwe (195 pers)

Cristanol: bioethanol uit suikerbiet en tarwe (125 pers)

Champagne Cereale: coöperatieve opslag/toeleverancier primaire grondstoffen

Energiebedrijven en -toeleveranciers

Elektriciteit en warmte productie uit organisch afval (15 pers)

Suikerfabriek levert processtoom aan ander bedrijven

Onderzoeksuitvoering en –coördinatie

ARD: centrale rol in kennisontwikkeling, procesontwerp (80 pers)

Onderwijs

Ecole Centrale Paris

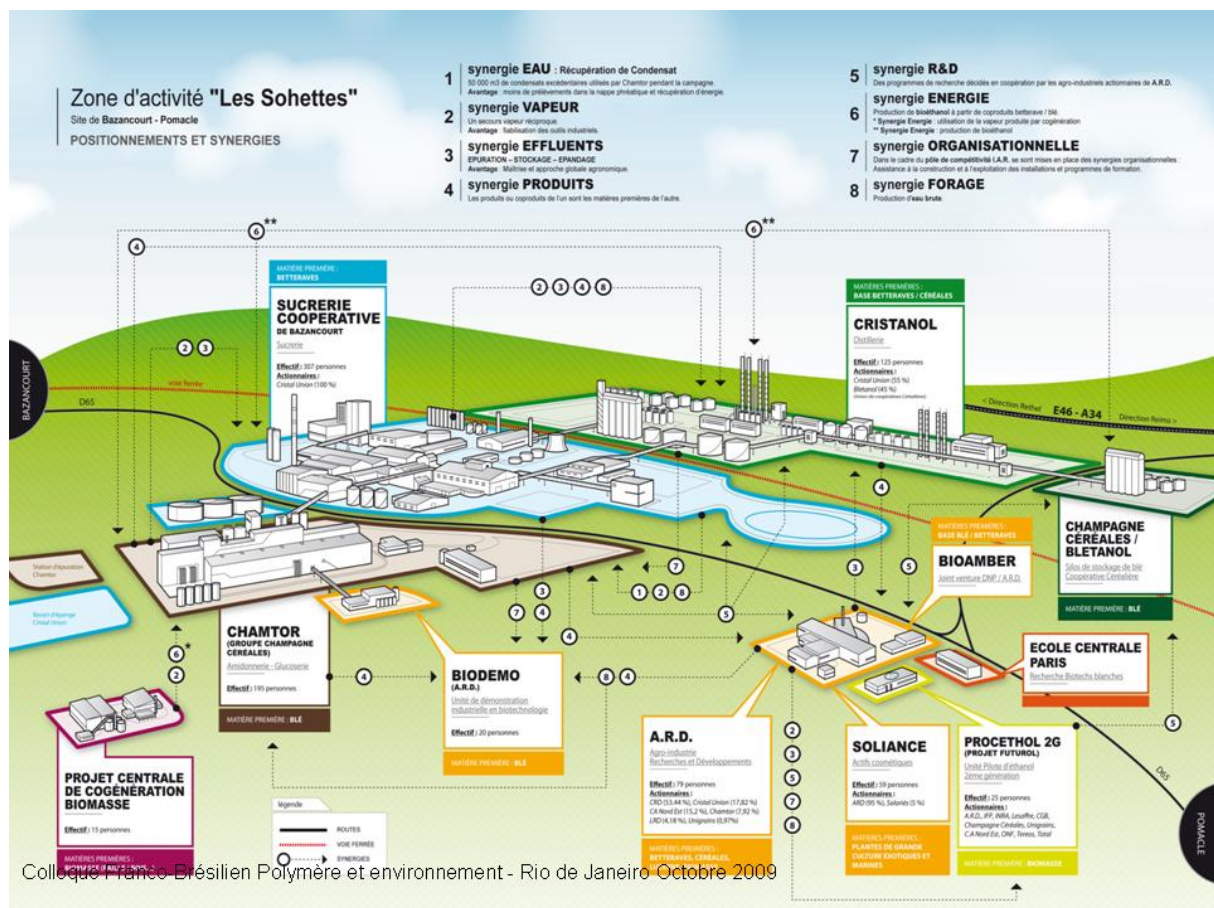
Nieuwe bedrijven voor biobased producten

BioDemo: demonstratieplant industriële biotechnologie

BioAmber: barnsteenzuurproductie op basis van suikerbiet en tarwe

Futuro: tweede generatie bioethanolproductie o.b.v. lignocellulose (25 pers)

Soliance: cosmetica producten o.b.v. plantenextracten (59 pers)



Figuur 7 Overzicht van Biobased Productiebedrijven in Bazancourt, N-Frankrijk (bron: ARD)

5.2 Randvoorwaarden voor commerciële ontwikkeling

Een aantal factoren dragen ertoe bij dat de ontwikkeling van nieuwe productieketens voor Biobased Ketens juist in Bazancourt tot ontwikkeling komen:

- **Aanwezigheid goedkope grondstoffen.** Cruciaal in de ontwikkeling van nieuwe biobased ketens in Bazancourt is de vestiging van de vier agro-bedrijven. Hierdoor is er al grootschalige aanvoer, opslag en verwerking van biograndstoffen, hetgeen een vaste aanvoer van grondstoffen tegen een lage prijs garandeert. Ook de productie en aanvoer van celluloserijke grondstoffen zoals alfalfa of tarwestro is aanwezig in de regio.
- **Integratie met bestaande industrie.** De aanwezige agro-industrie en andere toeleverende bedrijven zorgen voor zowel aanvoer van halffabricaten (bijvoorbeeld glucose voor de productie van barnsteenzuur), energie (bijvoorbeeld in de vorm van proceswarmte uit de bestaande suikerraffinaderij), hulpstoffen (bijvoorbeeld water) en andere diensten. Hierdoor kunnen nieuwe biobased productieketens relatief snel en tegen lagere meerprijs op grote schaal ontwikkeld worden.
- **Aanwezigheid afnemers eindproducten.** De bestaande industrie is naast leverancier ook een afnemer van de nieuwe biobasedproducten. Een voorbeeld is de bestaande ethanolfabriek, die een afnemer voor de productie van tweede generatie bioethanol kan zijn.
- **Kennispartners.** Door de locatie van een gespecialiseerd kennisbedrijf beschikt het conglomeraat over een state-of-the art onderzoekscentrum, waar naast fundamenteel onderzoek het opschalen naar pilotschaal en demonstratieschaal wordt ontwikkeld. Hierdoor kan met name opschalingsonderzoek snel en relatief goedkoop uitgevoerd worden, doordat niet steeds een nieuwe pilotfabriek geheel opgebouwd hoeft te worden. Naast onderzoeksfaciliteiten vormt het onderzoeksbedrijf ook een link met kennisconsortia buiten de regio.
- **Investeringsklimaat.** Zowel bestaande bedrijven als nieuwe bedrijven investeren in nieuw onderzoek en nieuwe productiebedrijven. Wat opvalt is dat de coöperatieve landbouworganisaties als stakeholders deelnemen in het onderzoeksbedrijf. Het conglomeraat van bedrijven profiteert daarnaast van verschillende regionale, nationale en Europese subsidieregelingen.

Het verdient aanbeveling om bovenstaande factoren mee te laten wegen bij het bepalen van de kansrijkheid van biobased productieketens in Nederland.

6 Conclusies

Een groot aantal grondstof-halffabrikaat-eindproduct combinaties is relevant voor de Biobased Economy in Nederland. Op basis van de in de inleiding gestelde selectiecriteria zijn de volgende case verder uitgewerkt: barnsteenzuur, melkzuur en cellulase. Een van de belangrijkste aspecten daarbij was het actief zijn van Nederlandse bedrijven, of in Nederland gevestigde internationale bedrijven, in de keten. Bij de uitwerking stond de beschrijving en analyse welke ontwikkelingen en randvoorwaarden nodig zijn voor de biobased productieketen om tot volledige commerciële ontwikkeling te komen centraal.

Barnsteenzuur wordt gezien als een zeer belangrijke bouwsteen voor zowel bulk- als specialty chemicaliën. De wereldmarkt wordt geschat op 270 kton/jaar. Vanuit barnsteenzuur kunnen verschillende andere componenten geproduceerd worden. Barnsteenzuur wordt momenteel voornamelijk geproduceerd uit aardolie en aardgas. De stof als zodanig wordt veelvuldig gebruikt voor allerlei industriële toepassingen, bijvoorbeeld in geneesmiddelen, voedingsmiddelen en verven/coatings. Daarnaast wordt barnsteenzuur gebruikt als tussenproduct voor verschillende (hoogwaardige) polymeren. Er zijn twee productieketens voor barnsteenzuur denkbaar in de Biobased Economy, namelijk de productie op basis van suiker- of zetmeelrijke gewassen of op basis van lignocellulose-houdende gewassen of residuen. De internationale bedrijven DSM/Roquette, en het Franse Bioamber zijn actief in het commercialiseren van dergelijke productieketens. De huidige productie van barnsteenzuur op pilot-schaal is vooral gebaseerd op aanwezigheid van andere partijen op locatie.

Melkzuur met een hoge zuiverheid wordt momenteel toegepast in het hogere ("fine chemical") marktsegment zoals melkzuur voor voedseltoepassingen en PLA voor medische toepassingen. Melkzuur kan echter ook als grondstof ("bulk chemical") dienen voor non-food en non-health toepassingen zoals voor bioplastics en in papier, lijm en textiel. De groei van het marktvolume van melkzuur en melkzuurderivaten is significant, met een jaarlijkse groei van meer dan 10%. Melkzuur wordt voornamelijk uit biobased grondstoffen geproduceerd, met name suiker- of zetmeelrijke gewassen. In die zin is de huidige melkzuurproductie verwant aan de eerste generatie bioethanol industrie. Naast productie op basis van suikerrijke gewassen is melkzuurproductie op basis van lignocellulose biomassa technisch mogelijk. Deze productieketen is echter nog niet economisch rendabel. De (deels) Nederlandse bedrijven en internationale bedrijven Purac, Galactic, Natureworks en ADM zijn actief in de verdere ontwikkeling en implementatie van melkzuurproductie voor de BBE. Naarmate de technologie voor inzet van nieuwe grondstoffen verder ontwikkeld is, verwacht men dat melkzuurproductie uit primaire grondstoffen ook weer in Nederland zal plaatsvinden. De industrie ziet daarbij een belangrijke rol weggelegd voor de inzet van nieuwe grondstoffen en het verduurzamen van het productieproces voor melkzuur.

Cellulase is de verzamelnaam voor enzymen die synergistisch werken in de hydrolyse van cellulose tot glucose. De glucose kan vervolgens gefermenteerd worden naar verschillende producten. Cellulose komt in de natuur voornamelijk voor in de celwand van planten en maakt deel uit van een complex met hemicellulose en lignine dat de plant zowel stevigheid geeft als beschermt tegen infecties. Het complex van cellulose, hemicellulose en lignine wordt lignocellulose genoemd en is de basis voor processen gebaseerd op 2^e generatie biomassa grondstoffen. Op dit moment is de prijs van cellulases nog te hoog voor een economisch rendabel proces op grote schaal. De verwachting van de industrie is echter dat, bij verdere ontwikkeling en implementatie van biobased productieprocessen, de prijs van cellulases drastisch zal dalen. Naast de biobrandstofindustrie kunnen cellulases in een groot aantal processen ingezet worden, o.a. pulp en papierproductie, diervoeding, textielindustrie en voedingsmiddelenindustrie. Nederlandse bedrijven die actief zijn bij de ontwikkeling en productie van cellulases zijn ondermeer DSM, Dyadic Nederland en andere internationale bedrijven met een belangrijke vestiging in Nederland waaronder Genencor. Naarmate de inzet van celluloserijke biomassa in de BBE toeneemt, zal cellulase op grootschalige wijze worden ingezet op productielocaties voor biobrandstoffen, melkzuur, veevoeding en andere productieprocessen. De industrie verwacht dat de productie van cellulases niet op een of enkele centrale locatie zal plaatsvinden, maar op locatie waar cellulase als hulpstof wordt ingezet.

Voor twee van de drie uitgewerkte cases, i.e. barnsteenzuur en melkzuur, vormt de beschikbaarheid van goedkope en gemakkelijk fermenteerbare grondstoffen een zeer belangrijk criterium voor bepaling van locatie van de productie aangezien de kosten van de fermentatie nog te hoog zijn om te concurreren met de bestaande productieketens. De verwachting is echter dat, terwijl de fermentatietechnologie snel verder ontwikkeld wordt, ook de productiecosten dalen mede door de inzet van goedkope, koolhydraatrijke grondstoffen zoals lignocellulose. Voor productieketens op basis van suiker- of zetmeelrijke gewassen ligt het niet voor de hand dat productie in Nederland zal plaatsvinden, echter bij verbreding van inzet van grondstoffen naar lignocellulose kan/zal dit veranderen. Een speciale positie m.b.t. het beschikbaar komen van goedkope, fermenteerbare grondstoffen wordt gevormd door de Nederlandse havens.

Voor de derde case, i.e. cellulase, vormt de aanwezigheid van andere op lignocellulose gebaseerde productieprocessen (bijv. 2^e generatie bioethanol of andere lignocellulose gebaseerde fermentatieprocessen) een belangrijk criterium voor vestiging in Nederland. De verwachting van de industrie is namelijk dat cellulase, mits op grote schaal ingezet, op die locatie wordt gebruikt waar het wordt ingezet. De vestiging van andere bedrijven in Nederland, waaronder bedrijven die werken met lignocellulose grondstoffen, is dus bepalend of ook cellulase productie hier zal plaatsvinden. Voor de productie van melkzuur kan primaire bioraffinage (productie van het halffabricaat uit de grondstof) en secundaire bioraffinage (productie van eindproducten uit het halffabricaat) in principe op gescheiden locatie plaatsvinden. Gezien de knowhow en

infrastructuur van bedrijven in Nederland zal dus zeker een gedeelte van de keten in Nederland gevestigd kunnen worden.

Voor de meer geavanceerde productieprocessen, zoals op lignocellulose gebaseerde melkzuur maar ook de cellulase productie, is naast goedkope grondstoffen ook de aanwezigheid van technologiepartners belangrijk. Dat de nabijheid van verschillende bedrijven tot nieuwe bedrijvigheid in de Biobased Economy leidt laat het voorbeeld van het bedrijven consortium in Pomacle, Noord Frankrijk, goed zien. Hier zijn op basis van bestaande agro-verwerkingsbedrijven (een tarweverwerker, suikerfabriek, en veevoederproducent) een aantal nieuwe bedrijfjes ontstaan (waaronder productie van barnsteen zuur en 2^e generatie bioethanol) en wordt gezamenlijk in onderzoek en ontwikkeling geïnvesteerd.

Tot slot is ook het investeringsklimaat belangrijk. Het feit dat in bepaalde landen zeer goedkope grondstoffen voorradig zijn leidt niet automatisch tot vestiging van (buitenlandse) biobased bedrijven aldaar. Voorbeelden hiervan zijn Brazilië, waar de economie na significante groei in de periode 2004-2008 stagneerde als gevolg van de financiële crisis in 2009, en de Oekraïne, waar buitenlandse investeringen nog beperkt zijn mede als gevolg van een hoge inflatie, tegenstrijdige wetgeving en een inconsistent economisch beleid. Toch verwacht men dat na 2009 investeringen in veel landen zullen toenemen, o.a. door invoer van nieuwe stimuleringsmaatregelen (Brazilië) of door uitzicht op een vrijhandelsaccord met de EU (Oekraïne). Zo kondigde het oliebedrijf Shell in februari 2010 een omvangrijke investering van ruim 1.5 miljard \$ aan in de Braziliaanse bio-ethanol industrie.

In hoeverre het investeringsklimaat voor BBE-productieketens in Nederland, ongeacht de aanwezigheid van stimuleringsmogelijkheden, beter of slechter is dan andere Europese landen of daarbuiten zou verder onderzocht dienen te worden.

Bronnen www.oecd.org , www.evd.nl , www.wsj.com

Literatuur

- Aa, E. v. d. (2008). "DSM wil graag meedoen met slag om biobrandstoffen." 2009, from http://www.telegraaf.nl/dft/bedrijven/dsm/1831019/_DSM_wil_meedoen_met_slag_om_biobrandstoffen_.html.
- Annevelink, B. (2009). Biopol. Assesment of biorefinery concepts and the implications for agricultural and forestry policy, AFSG. **D 5.1.2. Prospects for further demonstration.**
- Annevelink, B., J. Broeze, et al. (2009). Opportunities for Dutch Biorefineries, Wageningen UR & ECN.
- Bhat, M. K. (2000). "Cellulases and related enzymes in biotechnology." Biotechnology Advances **18**(5): 355-383.
- Bioamber. (2009). "Presentation Bioamber overview April 2009." from <http://www.bio-amber.com/release/pdf/0081bb108f.pdf>.
- Brouw op den, P. (2008). "Barnsteenzuur." TWA Netwerk, from <http://www.twanetwerk.nl/default.ashx?DocumentId=10132>.
- CSM. (2009). "BASF and CSM announce joint production development of biobased Succinic Acid." Press release, from <http://www.csm.nl/sana/handlers/downloadfile.ashx?fileID=07556eed-e9d6-43c8-97c5-ab758fed3a1f>.
- Cukalovic, A. and C. V. Stevens (2008). "Feasibility of production methods for succinic acid derivatives: A marriage of renewable resources and chemical technology." Biofuels, Bioproducts and Biorefining **2**(6): 505-529.
- Datta, R., S. P. Tsai, et al. (1995). "Technological and economic potential of poly(lactic acid) and lactic acid derivatives." FEMS Microbiology Reviews **16**(2-3): 221-231.
- DSM. (2005). "Roxazyme G2 The multipurpose enzyme." from http://www.dsm.com/nl_NL/downloads/dnpsa/Roxazyme_G2.pdf.
- DSM. (2008). "DSM ontvangt stimuleringsfonds van Amerikaanse ministerie voor energie voor biotechnologisch onderzoek." from http://www.dsm.com/nl_NL/html/media/press_releases/06_08_dsm_receives_grant_us_department_energy.htm.
- DSM. (2009). "BakeZyme® X-cell." from http://www.dsm.com/le/nl_NL/bake/html/fl_Bakezyme_Xcell.htm.
- DSM/Roquette. (2008). "DSM en Roquette ontwikkelen gezamenlijk tusenproduct op bio-basis voor groene hoogwaardige materialen." Press Release, from http://www.dsm.com/en_US/downloads/media/03n_08_dsm_roquette_biobased_succinic_acid.pdf.
- Dyadic. (2009). "Current projects." from <http://www.dyadic.nl/currentprojects.html>.
- Dyadic. (2009). "Dyadic International and Abengoa Bioenergy New Technologies settle litigation and enter into license agreement for the production of cellulosic ethanol." Press Release, from http://www.dyadic.com/wt/dyad/pr_1242224921.
- Dyadic. (2009). "Ethanol." from <http://www.dyadic.com/wt/dyad/ethanol>.
- Enzing, C., J. v. Groenestijn, et al. (2008). Biobased Economy- verkenning van kansrijke gebieden voor Nederland. Rapport. Delft, TNO.
- Galactic. (2009). "Loopla: The best end-of life option for PLA." from <http://www.loopla.org/default.htm>.

- Galante, Y. M., A. De Conti, et al. (1998). Application of *Trichoderma* enzymes in food and feed industries. *Trichoderma & Gliocladium - Enzymes, biological control and commercial applications*. G. F. Harman and C. P. Kubicek. London, Taylor & Francis. **2**: 327-342.
- Galante, Y. M., A. De Conti, et al. (1998). Application of *Trichoderma* enzymes in textile industry. *Trichoderma & Gliocladium - Enzymes, biological control and commercial applications*. G. F. Harman and C. P. Kubicek. London, Taylor & Francis. **2**: 311-326.
- Genencor. (2007). "Genencor launches first ever commercial enzyme product for cellulose ethanol." from http://www.genencor.com/wps/wcm/connect/genencor/genencor/media_relations/news/archive/2007/gen_businessupdate_393_en.htm.
- Genencor. (2009). "ACCELLERASE® product line." from http://www.genencor.com/wps/wcm/connect/genencor/genencor/products_and_services/agri_processing/renewable_fuels/fuel_ethanol_xbiomassx/accelerace_product_line_en.htm.
- Genencor. (2009). "Partnerships." from http://www.genencor.com/wps/wcm/connect/genencor/genencor/products_and_services/business_development/biorefineries/partnerships/partnerships_en.htm.
- Gilmour, P. (2009). "Succinic acid." Wall Street Journal.
- Grassin, C. and P. Fauquembergue (1996). Fruit juices. Industrial enzymology. T. Godfrey and S. West. UK, Macmillan: 226-264.
- Jim Jem, K., J. F. van der Pol, et al. (2010). Microbial lactic acid, its polymer poly(lactic acid), and their industrial applications. Plastics from bacteria: natural functions and applications. G. Q. Chen, Springer-Verlag. **Vol 14, Microbiology micrographs**.
- Lynd, L. R., P. J. Weimer, et al. (2002). "Microbial cellulose utilization: Fundamentals and biotechnology." Microbiology and Molecular Biology Reviews **66**(3): 506-577.
- McConnell, S. (2009). "Myriant technologies LLC announces commercial milestone for its renewable succinic acid." Press release Retrieved July 14, 2009, from <http://www.myriant.com/pdfs/Myriant%20SAC%20announcement.PDF>.
- McConnell, S. (2009). "Myriant Technologies LLC, UHDE corporation of America and UHDE GmbH announce alliance for engineering, procurement and construction of world scale renewable succinic acid plants." Press release, from <http://www.myriant.com/pdfs/Myriant%20Uhde%20press%20release%202009-11-06%20-%20final.pdf>.
- Novozymes. (2006). "Broin and Novozymes to collaborate on development of ethanol from cellulosic biomass." from <http://www.novozymes.com/en/MainStructure/PressAndPublications/PressRelease/2006/NzBroinBiomass.htm>.
- Novozymes. (2007). "Novozymes concludes agreement in Brazil on the development of second-generation biofuels." from <http://www.novozymes.com/en/MainStructure/PressAndPublications/PressRelease/2007/2nd+generation+biofuel.htm>.
- Novozymes. (2008). "Novozymes awarded USD 12.3 million contract from the U.S. Department of Energy." from <http://www.novozymes.com/en/MainStructure/PressAndPublications/PressRelease/2008/Novozymes+awarded+USD+12.3+million+contract.htm>.
- Novozymes. (2009). "The Market." from <http://www.novozymes.com/en/MainStructure/Investor/The+market/>.

- Novozymes. (2009). "New deal to make biofuel based on plant residues commercially viable." from <http://www.novozymes.com/en/MainStructure/PressAndPublications/PressRelease/2009/Inbicon.htm>.
- Novozymes. (2009). "Novozymes' cellulosic biofuel solutions." from <http://bioenergy.novozymes.com/cellulosic-biofuel/novozymes-cellulosic-solutions/>.
- Novozymes. (2009). "Novozymes and Sinopec sign new second-generation framework agreement in China." from <http://www.novozymes.com/en/MainStructure/PressAndPublications/PressRelease/2009/sinopec-novozymes.htm>.
- Novozymes. (2009). "PRAJ Industries Ltd. and Novozymes A/S to collaborate on advanced biofuels." from <http://www.novozymes.com/en/MainStructure/PressAndPublications/PressRelease/2009/Advanced+Biofuels.htm>.
- Purac. (2009). "CSM bouwt fabriek in Thailand." from <http://www.bnr.nl/artikel/13816798/csm-bouwt-fabriek-thailand>.
- Reith, J. H. and J. A. M. de Bont (2007). Co-production of bioethanol, lactic acid, electricity and heat from lignocellulosic biomass. Public report EET project K0116.
- Shen, L., J. Haufe, et al. (2008). Three key emerging bio-based plastics; starch polymers, polylactic acid and biobased polyethylene. Utrecht, Utrecht University.
- Shen, L., J. Haufe, et al. (2009). Product overview and market projection of emerging bio-based plastics. Utrecht, Utrecht University.
- Van der Meulen, A. M. (2008). "DSM lanceert het onderzoek naar biobrandstof." Retrieved 2009-12-11, 2009, from <http://www.fd.nl/artikel/10345980/dsm-lanceert-onderzoek-biobrandstof>.
- Werpy, T. and G. Petersen (2004). Volume I-Results of screening for potential candidates from sugars and syntehsis gas. Top value added chemicals from biomass, PNNL and NREL.
- Wijbenga, J. (2008). "Food en feed versterken elkaar bij Purac." De Molenaar, 6, from http://www.purac.com/ufc/file2/purac_sites/monique/bf4171c1c00162f0fc20545b4aed3634/pu/Article_De_Molenaar.pdf.
- Wilke, D. (1999). "Chemicals from biotechnology: Molecular plant genetics will challenge the chemical and the fermentation industry." Applied Microbiology and Biotechnology **52**(2): 135-145.
- Wilson, D. B. (2009). "Cellulases and biofuels." Current Opinion in Biotechnology **20**(3): 295-299.
- Wolfson, W. (2005). "Diversa Builds a Business with Designer Bacteria." Chemistry & Biology **12**(5): 503-505.