

Bioraffinage



Naar een optimale verwaarding van
biomassa

BERT ANNEVELINK EN PAULIEN HARMSSEN

Bioraffinage

Naar een optimale verwaarding van biomassa

Bert Annevelink en Paulien Harmsen

Oktober 2010

Uitgegeven in de reeks “Groene Grondstoffen”

1. Technologie voor gezondheid en milieu; agenda voor duurzame en gezonde industriële toepassingen van organische nevenstromen en agrogrondstoffen in 2010, S. Vellema en B. de Klerk-Engels (2003).
2. Nieuwe composteerbare verpakkingsmaterialen voor voedseltoepassingen, C. Bolck, M. van Alst, K. Molenveld, G. Schennink en M. van der Zee (2003).
3. Markten voor groene opties: ervaringen in verpakkingen, verven en isolatiematerialen, S. Vellema (samenstelling) (2003).
4. Groene grondstoffen in productie; recente ontwikkelingen op de markt, H. Bos en B. van Rees (2004).
5. Technologische innovatie in de keten; groene grondstoffen in ontwikkeling, H. Bos en M. van den Heuvel (2005).
6. Bioplastics, C. Bolck (2006).
7. Weekmakers; groene grondstoffen bieden nieuwe mogelijkheden, K. Molenveld (2006).
8. Doorbreken van de innovatieparadox, 9 voorbeelden uit de Biobased Economy, C. Bolck en P. Harmsen (2007).
9. Agrificatie en de Biobased Economy; Een analyse van 25 jaar beleid en innovatie op het gebied van Groene Grondstoffen, H. Bos (2008).

Voor meer informatie zie ook www.groenegrondstoffen.nl

Voorwoord

Voor u ligt het tiende boekje in de reeks 'Groene Grondstoffen'. In 2003 is het eerste boekje verschenen en sindsdien is er op het gebied van biomassagebruik veel veranderd: groene grondstoffen worden steeds meer ingezet als grondstof voor de industrie ter vervanging van de steeds schaarser wordende aardolie.

In analogie met de verwerking van ruwe aardolie in olieraffinaderijen kan ook biomassa geraffineerd worden tot waardevolle producten; dit wordt bioraffinage genoemd. In bepaalde situaties kan gebruik worden gemaakt van de bestaande industriële infrastructuur, maar ook nieuwe processen worden ontwikkeld.

Dit boekje is geschreven met als doel bioraffinage meer bekendheid te geven. In hoofdstuk 1 is de Biobased Economy beschreven en de sleutelrol die bioraffinage daarin speelt, met een focus op Nederland. Bioraffinage is een zeer brede term en een classificatiesysteem is noodzakelijk; dit is beschreven in hoofdstuk 2. In de hoofdstukken 3 en 4 wordt vervolgens dieper ingegaan op de grondstof voor bioraffinage, de biomassa, en de verschillende conversiemethoden die kunnen worden toegepast voor de verwerking van biomassa tot waardevolle producten. Vervolgens wordt in de hoofdstukken 5 t/m 7 een aantal voorbeelden van bioraffinage beschreven. Dit boekje wordt afgesloten met een aantal aspecten die van belang zijn voor de verdere ontwikkeling van bioraffinage in de toekomst.

Inhoudsopgave

1. Biobased Economy	7
2. Definitie van bioraffinage en classificatie	11
3. Biomassa	15
4. Conversiemethoden	19
5. Groene bioraffinage.....	23
6. Lignocellulose bioraffinage	27
7. Marine bioraffinage	31
8. Belangrijke zaken voor de toekomst.....	35
Terminologie	39
Literatuur referenties.....	41

1. Biobased Economy

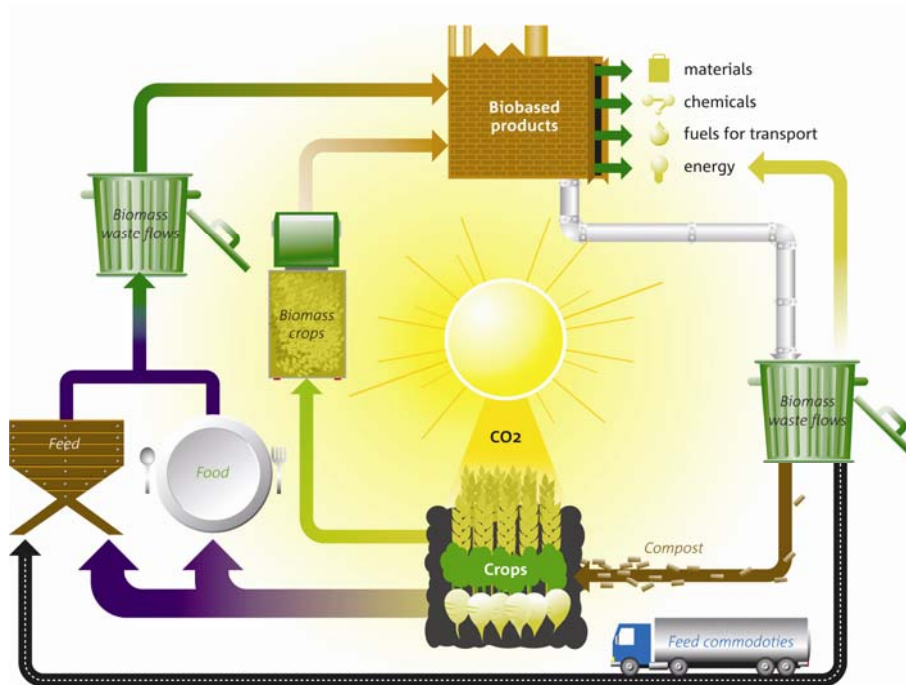
De Biobased Economy is een economie waarin gewassen en reststromen uit de landbouw en voedingsmiddelenindustrie, de zogenaamde groene grondstoffen ofwel biomassa, worden ingezet voor niet-voedsel toepassingen zoals materialen, chemicaliën, transportbrandstoffen en energie (elektriciteit en warmte). Het ontwikkelen van een Biobased Economy is een omvangrijke en gezamenlijke opdracht voor overheid, bedrijfsleven en kennisinstellingen. Daarbij zijn verschillende drijfveren van belang:

- Verminderen van de uitstoot van broeikasgassen (Kyoto-verplichtingen)
- Onafhankelijk(er) worden van geïmporteerde fossiele brand- en grondstoffen
- Veranderende Europese landbouwpolitiek die boeren ertoe aanzet om inkomsten te genereren uit nieuwe producten
- Toenemende vraag vanuit de maatschappij naar duurzame productie
- Economische overwegingen; zo zijn bijvoorbeeld de stijgende olieprijsen gunstig voor de verdere ontwikkeling van de Biobased Economy

Uiteindelijk gaat het bij de Biobased Economy om het sluiten van kringlopen bij de productie van goederen en het leveren van diensten: in het ideale geval is er geen sprake meer van afval en is de productie geheel CO₂-neutraal (figuur 1).

In 2007 zijn door de leiders van de EU afspraken gemaakt voor een gezamenlijk klimaat- en energiebeleid (EU, 2007). Deze afspraken, bekend onder de naam '20-20-20-targets', moeten in 2020 zijn behaald en houden het volgende in:

- Een verlaging van de uitstoot van broeikasgassen met minstens 20% vergeleken met de situatie in 1990
- Het energieverbruik te verlagen met 20% door verbeteren van energie efficiëntie
- 20% van het energieverbruik binnen de EU moet afkomstig zijn van hernieuwbare grondstoffen

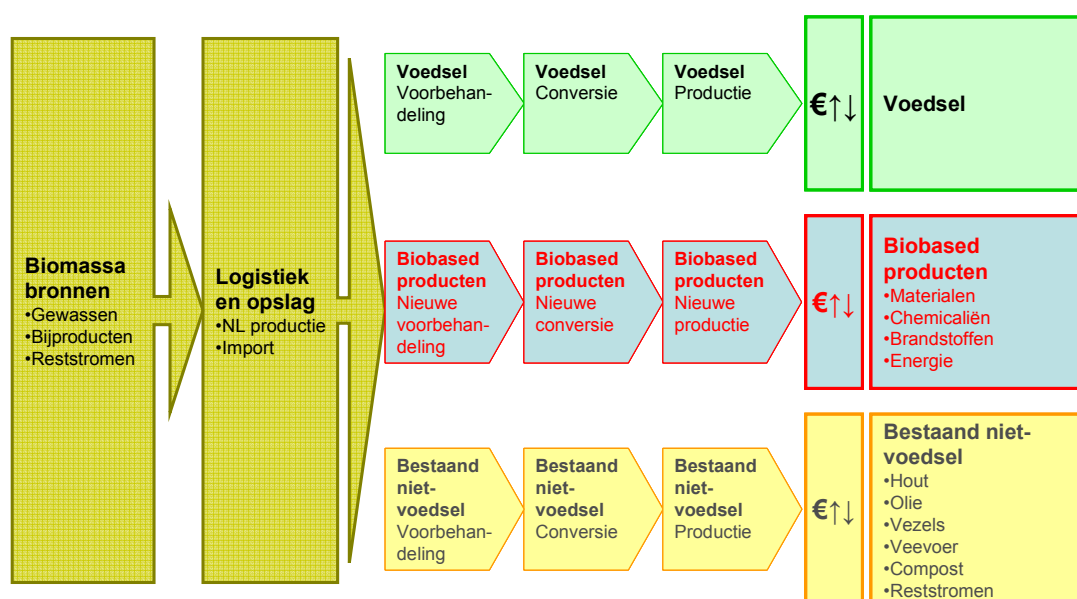


Figuur 1: Kringlopprincipe van de Biobased Economy (LNV, 2007).

Wereldwijd zal de vraag naar biomassa de komende tientallen jaren sterk stijgen door het verder uitbouwen van de Biobased Economy. In principe wordt voldoende biomassa op de aarde geproduceerd om aan de toegenomen vraag te voldoen. Hierover zijn al zeer veel beschikbaarheidstudies verschenen (bv. Dornburg et al., 2008). Het vereist echter wel een enorme aanpassing (transitie) om de benodigde biomassa ook daadwerkelijk te kunnen mobiliseren. Dit heeft een grote impact op vrijwel de gehele economie en veroorzaakt dan ook flink wat discussie. Het huidige voedsel-veevoer-brandstof (food-feed-fuel) debat is daarvan een duidelijk voorbeeld.

Van oudsher zijn er twee omvangrijke afzetmarkten voor biomassa (figuur 2), n.l. de voedselmarkt en de bestaande niet-voedselmarkt (o.a. hout, olie, vezels, veevoer, compost, reststromen). Hier komt nu een nieuwe groeiende waardeketen bij voor biobased producten (materialen, chemicaliën, brandstoffen en energie). Hierdoor zal de wisselwerking tussen de waardeketens veranderen, met name soort, omvang en gebruik van verschillende biomassastromen.

Biomassa van voedselketens en bestaande niet-voedselketens kan verwerkt worden in nieuwe biobased productketens. Het ontstaan van nieuwe waardeketens voor biobased producten levert op deze manier kansen voor diverse marktpartijen. Een voorbeeld hiervan is het beschikbaar komen van grote hoeveelheden reststromen uit de biobrandstofproductie die als veevoer kunnen dienen of als grondstof voor de chemische industrie.



Figuur 2: Biobased Economy: een nieuwe waardeketen (biobased products) tussen de voedselketen en bestaande niet-voedsel keten.

Bij de overgang (transitie) van de huidige, op fossiele grondstoffen gebaseerde, economie naar een Biobased Economy zal bioraffinage een sleutelrol spelen. Bioraffinage is het op duurzame wijze verwerken van biomassa tot een verscheidenheid aan producten en energie. Hierbij wordt gestreefd naar een zo efficiënt mogelijk gebruik van de biomassa: alle componenten worden optimaal gebruikt en het ontstaan van reststromen wordt geminimaliseerd. In een ideale situatie wordt door een volledige benutting van de biomassa geen extra beslag gelegd op landbouwgronden. Ook later in de verschillende waardeketens kunnen reststromen van biomassa onderling worden uitgewisseld voor een optimale benutting en kan de competitie tussen voedsel, veevoer en brandstoffen worden voorkomen.

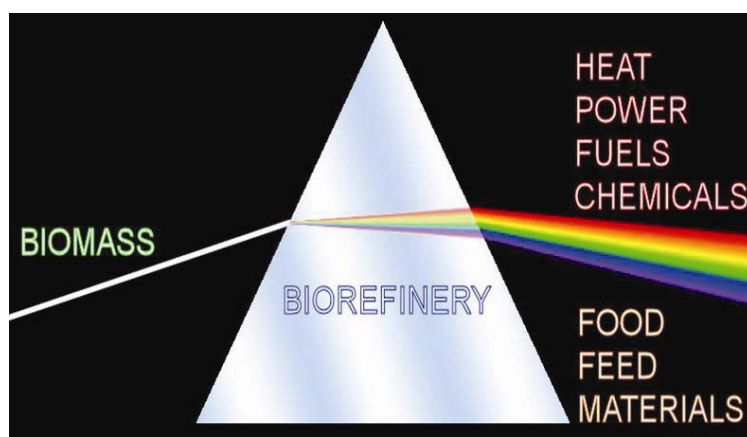
De Biobased Economy in Nederland

De Biobased Economy dient een hoofdrol te vervullen in de duurzame ontwikkeling van Nederland, zoals aangegeven in de 'Overheidsvisie op de Biobased Economy in de Energietransitie' (LNV, 2007). De overheid heeft kansen voor het Nederlandse bedrijfsleven geïdentificeerd, met name op het gebied van (hoge) toegevoegde waarde producten uit biomassa. De Innovatieagenda Energie (EZ, 2008) schetst concrete doelen voor 2020 op het gebied van de energietransitie. Eén van de innovatiethema's is Groene Grondstoffen. Dit betreft o.a. duurzame productie en ontwikkeling van biomassa en productie van transportbrandstoffen, chemicaliën, elektriciteit en warmte door middel van bioraffinage.

Het Platform Groene Grondstoffen (Platform Groene Grondstoffen, 2006 en 2007) heeft voor Nederland een ambitieus doel gesteld, n.l. om 30% van de Nederlandse energiebehoefte in 2030 te voorzien met groene grondstoffen. Men verwacht daarbij niet dat in alle sectoren evenveel groene grondstoffen gebruikt zullen worden. In 2030 kan biomassa de basis vormen voor 25% van de chemicaliën en materialen, 60% van de transportbrandstoffen, 25% van de elektriciteit en 17% van de warmte. Deze substitutiepercentages zijn specifiek voor Nederland en zullen voor andere landen zeker verschillen afhankelijk van de lokale situatie. Bovendien zullen ze nog verder oplopen in de daarop volgende periode, tussen 2030 en 2050. Het is overigens nog niet zo eenvoudig om al deze nationale doelen te halen. Daarvoor zal een enorme gemeenschappelijke inspanning nodig zijn. Inmiddels is aangetoond dat de ambitie om in totaal 30% van de fossiele grondstoffen te vervangen door groene grondstoffen haalbaar is, en bovendien een enorme impuls geeft aan de Nederlandse economie (Platform Groene Grondstoffen, 2010).

2. Definitie van bioraffinage en classificatie

In de jaren '70 is het International Energy Agency (IEA) opgericht voor de implementatie van een internationaal energie programma. Later is binnen dit verband de 'IEA Bioenergy Task 42 on Biorefineries' opgericht voor de verdere uitwerking van het concept bioraffinage (figuur 3). Deze task is een openbaar informatieplatform waarin 13 landen kennis uitwisselen op het gebied van bioraffinage met onder andere landenrapporten en databases met overzichten van de belangrijkste commerciële-, demonstratie- en pilotfabrieken en R&D-projecten.



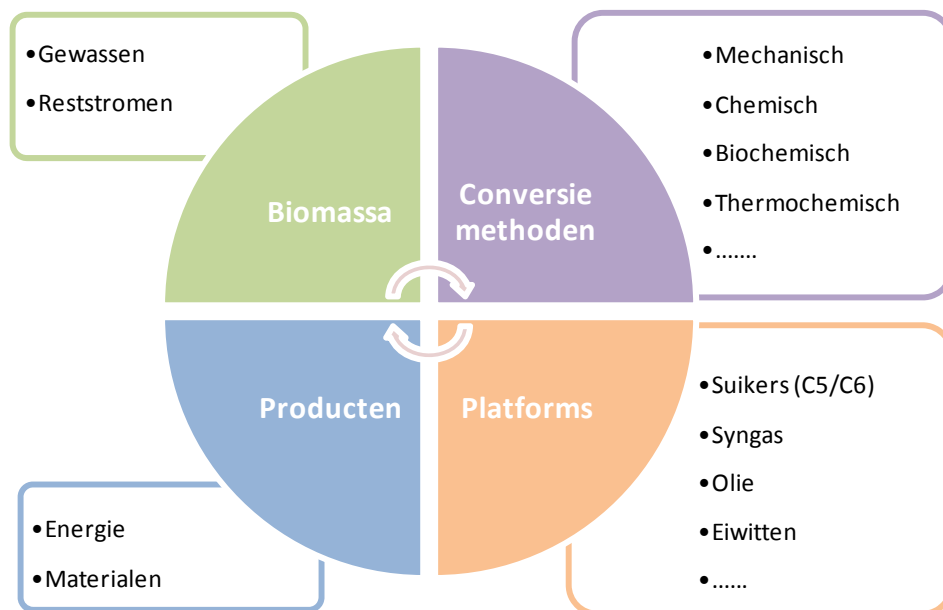
Figuur 3: Bioraffinage levert een spectrum aan producten en energie (IEA Bioenergy Task 42 on Biorefineries, 2009a).

Binnen de Task wordt bioraffinage als volgt gedefinieerd: 'De duurzame verwerking van biomassa in een spectrum van vermarktbaar producten en energie'. Deze definitie bevat de volgende sleutelwoorden:

- Bioraffinage: concepten, faciliteiten, processen, cluster van industrieën
- Duurzaam: maximaal economisch rendement, minimale milieubelasting, sociaal acceptabel
- Verwerking: voorbehandeling en primaire raffinage, transformatie, fractionering, thermochemische en (bio)chemische conversie, extractie, product scheiding, product opwerking
- Biomassa: gewassen, hout, residuen (organisch, agro, bosbouw), aquatische biomassa
- Spectrum: meer dan één

- Vermarktbaar: er bestaat al een markt (zowel qua marktvolume als prijsstelling) voor de afzet van de producten of er wordt verwacht dat er op de korte termijn een markt zal ontstaan
- Producten: chemicaliën, voedsel, veevoer, materialen (tussen- en eindproducten)
- Energie: brandstoffen, elektriciteit, warmte

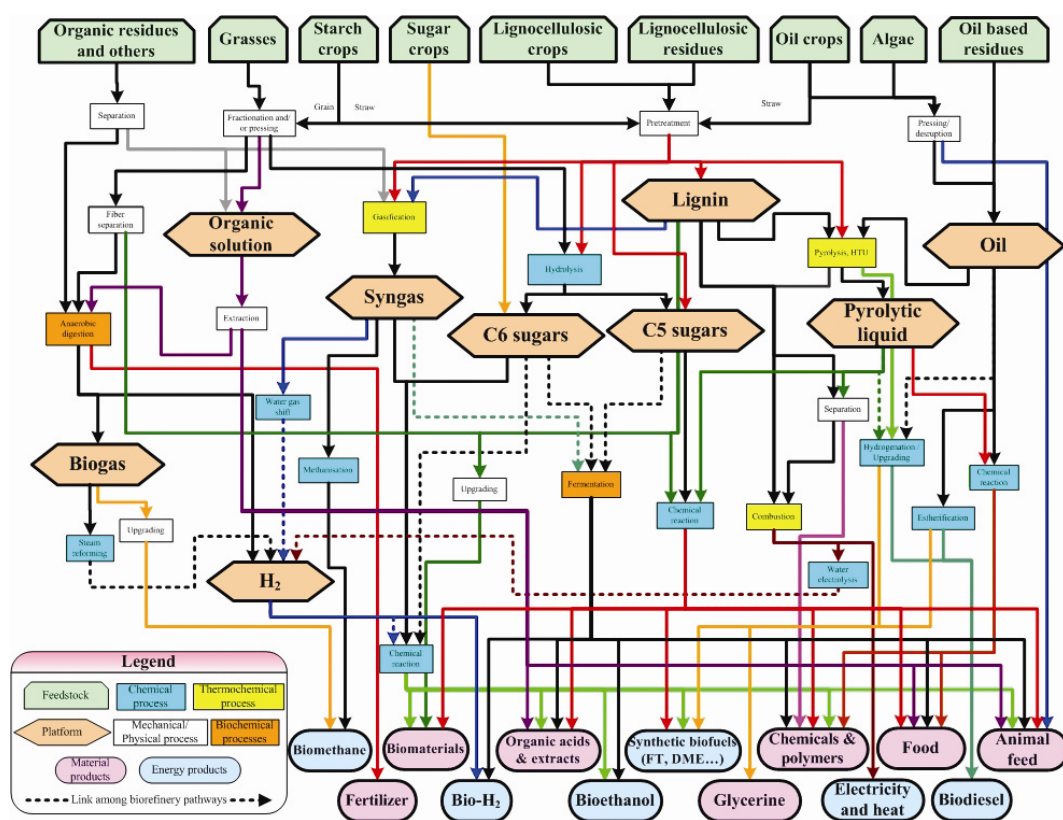
Voor het classificeren van de verschillende bioraffinageconcepten heeft de IEA Bioenergy Task 42 on Biorefineries een systeem ontwikkeld waarmee elk concept kan worden beschreven. Daarbij worden verschillende componenten onderscheiden waaruit bioraffinage bestaat: biomassa, conversiemethoden, platforms en producten. Deze methode van classificeren is in figuur 4 schematisch weergegeven en de componenten worden nader toegelicht in de volgende hoofdstukken.



- Biomassa : Afkomstig van gewassen of reststromen uit bv de agro- en voedingsmiddelenindustrie
 Conversiemethoden : Methoden die worden toegepast om de biomassa om te zetten naar tussen- of eindproducten
 Platforms : Tussenproducten of intermediären zoals (fermenteerbare) suikers, lignine, olie, eiwitten, biogas, syngas, waterstof en pyrolyse-olie
 Producten : Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen energieproducten zoals bioethanol, biodiesel, elektriciteit, warmte en materialen zoals chemicaliën, polymeren, voedsel en veevoeding

Figuur 4: Componenten van bioraffinage gebaseerd op het IEA-classificatiesysteem.

Biomassa (hoofdstuk 3) en conversiemethoden (hoofdstuk 4) worden hierbij apart behandeld, terwijl producten en platforms aan de orde komen in de hoofdstukken groene bioraffinage (hoofdstuk 5), lignocellulose bioraffinage (hoofdstuk 6) en marine bioraffinage (hoofdstuk 7). Een overzicht van de huidige bioraffinage systemen op basis van bovenstaande classificatie is weergegeven in figuur 5. Dit overzicht zal veranderen en uitgebreid worden naarmate nieuwe processen worden ontwikkeld.



Figuur 5: Overzicht classificatie bioraffinage (IEA Bioenergy Task 42 on Biorefineries, 2009b).

Bioraffinage is in veel opzichten vergelijkbaar met de traditionele aardolieraffinage. In de petrochemische industrie wordt de grondstof, ruwe olie, door destillatie gescheiden in talrijke fracties en transportbrandstoffen zoals benzine, diesel, kerosine, nafta en stookolie. Ook wordt butaan/propana (LPG) gewonnen. Bepaalde stromen worden verder bewerkt tot grondstoffen voor de polymeer- en chemische industrie, zoals het kraken van nafta tot etheen, propaan, butadien, benzeen, toluen en xyleen. Als restproduct blijft bitumen over dat als

grondstof dient voor asfalt. Op deze manier wordt de ruwe olie nagenoeg volledig benut. In analogie met de aardolieraffinage heeft ook bioraffinage tot doel de grondstof, in dit geval biomassa, uiteen te rafelen en de verschillende fracties verder te bewerken tot materialen, chemicaliën, transportbrandstoffen en energie zodat de biomassa volledig benut kan worden. Een groot verschil tussen bioraffinage en aardolieraffinage is dat men al meer dan 50 jaar ervaring heeft met aardolieraffinage, terwijl veel nieuwe bioraffinageconcepten nog in ontwikkeling zijn of nog ontwikkeld moeten worden.

Dit komt mede door de grote verscheidenheid aan biomassa die voor bioraffinage kan worden ingezet. Maar in zekere zin wordt bioraffinage al eeuwen toegepast. Voorbeelden van "conventionele bioraffinage" zijn de suikerindustrie, de zetmeelindustrie, de productie van plantaardige oliën, de voedingsmiddelenindustrie, de veevoederindustrie, de papier- en kartonindustrie en de conventionele productie van (eerste generatie) biobrandstoffen zoals bioethanol, biodiesel en biogas.

Net zoals bij nieuwe bioraffinageconcepten wordt ook bij conventionele bioraffinage technologie toegepast om de aangevoerde biomassa te scheiden en om te vormen tot hoofdproducten en nevenproducten. Meestal ligt de nadruk echter op het leveren van slechts één waardevol hoofdproduct (suiker, zetmeel, plantaardige olie, biodiesel of bioethanol), en wordt verder weinig moeite gedaan om een breed spectrum aan andere waardevolle bijproducten te leveren. Natuurlijk trachten conventionele bioraffinage-industrieën nu ook al toegevoegde waarde te creëren voor hun bijproducten door ze af te zetten in andere sectoren. In veel gevallen worden nevenproducten echter alleen maar tegen zo laag mogelijke kosten afgevoerd, bijvoorbeeld als veevoer of meststof, of worden de nevenproducten gebruikt voor de productie van elektriciteit of warmte voor intern of extern gebruik.

3. Biomassa

Indeling van biomassa

Biomassa vormt het startpunt van elk bioraffinageconcept. Het kan van gewassen afkomstig zijn die groeien op land of in zee, maar ook reststromen uit de bosbouw, agro- en voedingsmiddelenindustrie vallen hieronder. In een studie naar de beschikbaarheid van biomassa in Nederland (Koppejan, 2009) wordt biomassa ingedeeld in groepen met vergelijkbare eigenschappen en technische mogelijkheden (figuur 6):

- Gewassen (bv graan, maïs, koolzaad, suikerbieten), groene biomassa (gras), houtige biomassa (wilg, populier, snoei- en dunningshout), aquatische biomassa (algen, zeewier),
- Reststromen die in het veld vrijkomen (bv stro, hooi, bietenloof maar ook mest)
- Reststromen die bij een productieproces vrijkomen (bv resthout, aardappelstoomschillen, olieadenschroot, wortelschaafsel en koffiedik)
- Reststromen die vrijkomen na het gebruik als product (bv zuiveringslib, afvalhout, GFT en textiel)



*Figuur 6: Voorbeelden van biomassasoorten: wortelschaafsel en tarwestro
(Foto's: Bert Annevelink).*

De samenstelling en structuur van de biomassa is van grote invloed op het bioraffinageproces. In de volgende paragrafen worden deze aspecten van biomassa nader toegelicht (voor meer toelichting op bepaalde termen zie de terminologielijst op pagina 39).

Gewassen met een vrucht, knol of wortel

Deze gewassen hebben een vrucht, knol of wortel met een hoge concentratie aan suiker, zetmeel, olie of eiwit en relatief weinig water. Voorbeelden zijn granen, zaden, aardappels en suikerbieten. Bovengenoemde componenten vormen het hoofdproduct van de plant en hebben de volgende kenmerken:

- Suiker (sucrose): dient als voedselreserve voor de plant en bestaat uit een glucose- en fructose molecuul (dissaccharide). Door de chemische structuur is sucrose zeer snel verteerbaar. Gewassen met veel sucrose zijn suikerbiet en rietsuiker.
- Zetmeel: dient als voedselreserve voor de plant. Het is een polymeer van glucose moleculen (C₆-suiker) en is goed afbreekbaar of verteerbaar. Gewassen met veel zetmeel zijn aardappel, tarwe en maïs.
- Olie: dient als voedselreserve voor de plant en bevindt zich in vruchten (zaden). De olie bestaat uit onverzadigde vetzuren. Gewassen die veel olie bevatten zijn koolzaad, zonnebloem, soja en oliepalm.
- Eiwit: speelt een belangrijke rol in functie van cellen en kan als voedselreserve dienen voor de plant. Eiwitten zijn opgebouwd uit aminozuren (chemische verbindingen met twee of soms meer functionele groepen). Gewassen met eiwitrijke zaden zijn o.a. erwten, linzen en bonen. Ook het uitpersen van zonnebloem- en koolzaad geeft als nevenstroom een zeer eiwitrijke perskoek.

Vruchten, knollen en wortels kunnen goed worden bewaard. Door de hoge concentratie aan waardevolle component in vruchten, knollen en wortels kost het relatief weinig moeite om het hoofdproduct te scheiden van de minder bruikbare delen van de plant. Daarnaast zijn het delen van de plant die vaak ook als voedsel dienen.

Dit type biomassa wordt veelal verwerkt in conventionele bioraffinagesystemen. Suikers (sucrose), zetmeel, oliën en eiwitten worden traditioneel gebruikt voor de productie van levensmiddelen of veevoer, maar zijn ook geschikt als basis voor (nieuwe) biobased producten. Voorbeelden zijn de fermentatie van suikers tot bioethanol of chemicaliën, olie voor de productie van zeep, verven, of biodiesel, en eiwitten die na hydrolyse worden toegevoegd als essentiële aminozuren aan veevoer of die dienen als grondstof voor de productie van chemicaliën.

Groene biomassa

Groene gewassen zoals bepaalde groentes (sla) en vers gras worden groene biomassa genoemd. Ook reststromen (bladeren en stengels) met een veel lagere waarde dan vrucht-, knol- of wortelgewassen vallen onder deze categorie (bv bietenloof). Deze biomassa bestaat over het algemeen voornamelijk uit cellulose en hemicellulose, en wordt gekenmerkt door een hoog gehalte aan water.

Groene biomassa is erg nat en bederfelijk, en kan moeilijker worden bewaard. Het transport is relatief duur en daarom moet verwerking decentraal plaatsvinden. Gewasresten worden op het moment niet volledig benut. Vaak worden ze ondergeploegd om de bodemstructuur van de akker te verbeteren. Een andere mogelijkheid is het verwerken van de bladeren tot veevoer. De bladeren bevatten een relatief groot deel aan eiwitten die afgebroken kunnen worden tot (essentiële) aminozuren. Daarnaast kunnen de vezels in de bladeren worden afgebroken tot suikers en lignine. Dit type biomassa wordt verwerkt in groene bioraffinagesystemen (zie hoofdstuk 5). Kenmerken van waardevolle componenten in groene biomassa zijn als volgt:

- Cellulose: komt voor in de celwand en geeft stevigheid en structuur aan een plant. Cellulose is net als zetmeel een polymeer van glucose moleculen (C₆-suiker), maar is door de specifieke rangschikking van de glucose moleculen (kristallijn) zeer moeilijk afbreekbaar.
- Hemicellulose: komt voor in de celwand van de plant. Het is een polymeer van voornamelijk xylose en arabinose (C₅-suikers). De moleculen in hemicellulose zijn zodanig gerangschikt dat een ongeordende structuur wordt verkregen (amorf). Om deze reden is hemicellulose veel makkelijker afbreekbaar dan cellulose.
- Lignine: komt voor in de celwand van de plant en is een polymeer van aromatische verbindingen. Het vormt samen met hemicellulose een matrix van ongeordend (amorf) materiaal, waarin de geordende cellulose moleculen zijn ingebed. Lignine fungeert als een soort lijm en geeft ook bescherming aan de plant.

Lignocellulosehoudende biomassa

De term lignocellulose is een verzamelnaam die wordt gebruikt als het gaat over plantaardige biomassa die voornamelijk bestaat uit cellulose, hemicellulose en lignine. Voorbeelden van lignocellulosehoudende biomassa zijn hout (figuur 7) en stro.

Planten en bomen hebben door de specifieke lignocellulose structuur een grote mate van stevigheid en zijn beschermd tegen aanvallen van bacteriën en schimmels. Maar door deze specifieke structuur is het isoleren van waardevolle componenten uit lignocellulose een bewerkelijk proces.

In tegenstelling tot de eetbare fractie van een plant is lignocellulose materiaal nog wel ruim beschikbaar. Lignocellulosehoudende biomassa kan over het algemeen goed worden opgeslagen. Dit type biomassa wordt verwerkt in lignocellulose bioraffinagesystemen (zie hoofdstuk 6).



*Figuur 7: Lignocellulose houdende biomassa: houtchunks
(Foto: Bert Annevelink).*

Aquatische biomassa

Een relatief nieuwe groep vormt aquatische biomassa, de microalgen en zeewieren. Deze gewassen zijn substantieel verschillend van landgewassen. Zo hebben microalgen en zeewieren bijvoorbeeld geen of minder stevigheid nodig en bevatten dan ook geen lignine en aanzienlijk minder cellulose. Dit type biomassa wordt verwerkt in marine bioraffinagesystemen (zie hoofdstuk 7).

4. Conversiemethoden

Afhankelijk van de biomassa en de gewenste neven- of eindproducten kunnen verschillende conversiemethoden worden ingezet. Hieronder wordt een viertal methoden beschreven (mechanisch, chemisch, biochemisch en thermochemisch), maar ook combinaties van technieken worden toegepast.

Mechanische processen zijn veelal het beginpunt van bioraffinage. De biomassa wordt verkleind, gescheiden in verschillende fracties of uitgeperst voor het verkrijgen van de oliefractie (oliehoudende gewassen) of eiwitrijke sapstromen (figuur 8).



*Figuur 8: Mechanisch proces voor het persen van gras
(Foto: Wageningen UR Food & Biobased Research).*

Onder *chemische processen* worden methoden verstaan waarbij de biomassa of tussenproducten een chemische reactie ondergaan. Veelal worden daarbij chemicaliën gebruikt. In het geval van lignocellulosehoudende biomassa zoals hout of stro moet de biomassa gescheiden worden in de afzonderlijke componenten cellulose, hemicellulose en lignine. Pas daarna kunnen de afzonderlijke stromen verder worden verwerkt.

Voor het verwerken van lignocellulose wordt vaak zuur of loog in combinatie met een hoge temperatuur toegepast om de structuur te verbreken. Op dit moment wordt veel onderzoek gedaan naar methoden die lignocellulose onder zo mild mogelijke condities (weinig zuur of loog en lage temperaturen) kunnen afbreken. Dit dient om de kosten en het energieverbruik te beperken en de vorming van ongewenste nevenproducten te minimaliseren.

De cellulose- en hemicellulosefracties vormen meestal de hoofdproducten. Deze fracties kunnen door enzymatische hydrolyse (zie ook biochemische processen) verder worden afgebroken tot suikerrijke stromen die als grondstof kunnen dienen voor fermentaties of chemische processen.

Naast de cellulose- en hemicellulosestromen wordt lignine verkregen als bijproduct. Afhankelijk van de eigenschappen kan lignine worden toegepast als brandstof voor de productie van warmte of elektriciteit, of als grondstof voor de productie van biopolymeren, lijm of chemicaliën.

Biochemische processen (figuur 9) maken gebruik van enzymen, bacteriën of schimmels om een bepaalde omzetting tot stand te brengen. Dit kan resulteren in tussenproducten of eindproducten. Zo kan bijvoorbeeld een celluloserijke fractie verder worden afgebroken tot glucose tijdens de hydrolyse stap. Hiervoor worden commerciële enzympreparaten gebruikt die cellulases bevatten voor de afbraak van cellulose tot glucose, maar ook hemicellulases die in staat zijn hemicellulose af te breken. Glucose maar ook C₅-sukers uit de hemicellulosefractie kunnen vervolgens gefermenteerd worden tot producten zoals ethanol, butanol, aceton, barnsteenzuur of melkzuur.



*Figuur 9: Enzymatische hydrolyse van tarwestro
(Foto: Paulien Harmsen).*

Voor de *thermochemische route* wordt de biomassa bij hoge temperatuur behandeld. Hierbij wordt de biomassa niet uiteengerafeld tot de basale bouwstenen (sukers, lignine, olie, en eiwitten), maar worden alle verbindingen in de biomassa afgebroken tot niet-functionele componenten. Te onderscheiden zijn de volgende processen:

- Verbranding (overmaat zuurstof): levert hete rookgassen (voornamelijk CO₂ en H₂O) voor de productie van warmte en elektriciteit
- Vergassing (ondermaat zuurstof): levert stook- en synthesegas (voornamelijk CO en H₂). Het stookgas wordt gebruikt voor de productie van warmte en elektriciteit; het synthesegas voor transportbrandstoffen (groen aardgas (Synthetic Natural Gas (SNG)), Fischer-Tropsch diesel, dimethylether (DME, als mogelijk vervanger van diesel en LPG) en chemicaliën (synthesegas na reiniging en katalytische synthese)
- Pyrolyse (geen zuurstof): levert afhankelijk van de procescondities biochar (langzame pyrolyse) of pyrolyse-olie (snelle pyrolyse). Bij beide processen wordt het nevenproduct pyrolysegas toegepast voor de energievoorziening van het pyrolyseproces
- Torrefactie/pelletisering (geen zuurstof, lage temperatuur) levert getorrificeerde biomassapellets

Zowel snelle pyrolyse als torrefactieprocessen worden thans ontwikkeld om biomassa decentraal energetisch te verdichten, waarna transport van de pyrolyse-olie en torrefactie-pellets plaatsvindt naar een centrale bioraffinageplant of elektriciteitscentrale.

5. Groene bioraffinage

Bioraffinage van groene biomassa wordt toegepast op groene, verse planten zoals vers gras, alfalfa, klaver of luzerne, en mogelijk bladresten van andere gewassen zoals suikerbieten. De eerste stap (zogenaamde primaire raffinage) bestaat uit een scheiding in een vezelige stroom en waterige eiwitstroom, veelal door persen. Conversie van deze twee stromen tot waardevolle producten kan zowel chemisch als mechanisch zijn.

Het gebruik van verse, natte biomassa brengt allerlei specifieke aandachtspunten met zich mee. Zo is de biomassa over het algemeen maar in een beperkte periode beschikbaar (tijdens de oogst), kan moeilijk bewaard worden, en veranderen de eigenschappen en componenten van de biomassa tijdens het bewaren. Dit betekent dat speciale maatregelen genomen moeten worden zoals zeer snelle primaire verwerking of het gebruik van conserveringsmethoden (bv. inkuilen) om het degraderen van het geogoste materiaal te voorkomen. Voordelen van groene bioraffinage zijn de goede koppeling aan de traditionele agrarische productiewijzen (bv. van gras). Verder kunnen relatief simpele scheidingsmethoden worden toegepast voor de primaire raffinage, zoals persen.

Een voorbeeld van groene bioraffinage is het verwerken van gras. Gras bestaat voor 80-90% uit water en de rest, het droge materiaal, bestaat voor 30% uit vezels, 20% eiwitten, 25% suikers, 10% mineralen en 15% overige bestanddelen. In Nederland zijn verschillende bronnen van gras in overvloed aanwezig zoals geteeld gras, berm- en natuurgras. Het uitpersen van gras leidt tot een vezelrijke perskoek en een perssap, rijk aan nutriënten (figuur 10).



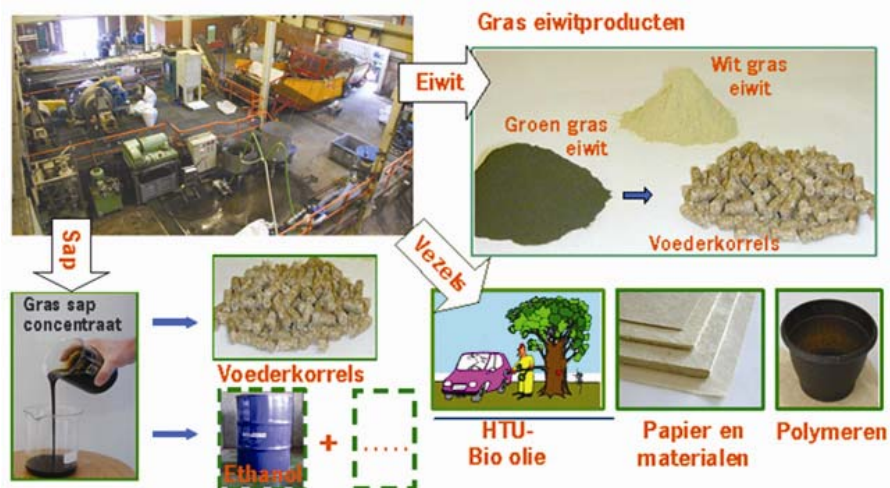
Figuur 10: Grassap en papier op basis van grasvezels (Foto's: Edwin Keijsers).

Het sap bevat suikers en eiwitten die kunnen worden gebruikt als grondstof in andere processen. De perskoek bevat voornamelijk plantenvezels die kunnen worden toegepast als vervanging van houtvezels in de papierindustrie. Ook kunnen de vezels als bron van lignocellulose worden ingezet om producten te maken.

De reststoffen worden via vergisting omgezet in biogas dat gebruikt kan worden voor de productie van elektriciteit en warmte in een warmtekrachtkoppelinginstallatie. De mineralen uit de vergiste reststoffen komen grotendeels terecht in het digestaat en kunnen worden teruggebracht naar het land.

In de periode rond 2000 is grasraffinage onderzocht door het Prograss consortium. Men richtte zich op een relatief grote centrale verwerkingseenheid. Hiervoor is destijds een proeffabriek opgezet in Foxhol (figuur 11) die inmiddels weer is ontmanteld. Als hoofdproducten werden grassap, eiwitten en vezels geproduceerd.

De primaire raffinage­stap bestaat uit een gepatenteerde scheidingstechnologie waarbij een refiner wordt gebruikt om de grascellen te openen. Het grasraffinage­proces blijkt economisch alleen uit te kunnen als voor al de geproduceerde producten een goede markt te vinden is. Dit was destijds nog een probleem, maar inmiddels zijn de economische omstandigheden gunstiger geworden, en zijn nieuwe toepassingen voor de producten gevonden. Zo is de papierindustrie bijvoorbeeld geïnteresseerd geraakt in het produceren van papier op basis van grasvezels ter vervanging van de dure cellulosevezel.



Figuur 11. Pilotfabriek grasraffinage in Foxhol van het Prograss consortium (Sanders, 2005).

Vanaf 2006 is een nieuw initiatief in gang gezet voor kleinschalige grasraffinage met behulp van mobiele eenheden, en dit heeft geleid tot het Grassa!-project (Grassa, 2010). Dit project is opgezet door een consortium van een speler uit de diervoedersector, de papierindustrie en de machinebouw.

Als primaire stap wordt gebruik gemaakt van een schroefpers of een, aan een tractor gekoppelde, refiner. Het voordeel van decentrale units is dat men kan werken met korte logistieke ketens zodat eiwit van hoge kwaliteit gewonnen wordt voordat degradatie door natuurlijke fermentatie optreedt. Verder kunnen lagere transportkosten worden gerealiseerd wat erg belangrijk is bij gras met 80% vocht. Tenslotte wil men mineralen terugwinnen zonder omvangrijke technologie.

Binnen Grassa! wordt graseiwit geproduceerd voor de diervoedersector ter vervanging van het eiwitrijke sojaschroot (of sojameel) en vezels voor de papier- en kartonindustrie. Belangrijke aspecten waarop men antwoord wil geven zijn de technische optimalisatie van het raffinageproces en de verwerking en valorisatie van de productstromen. In 2010 is een vervolg gestart, waarbij de kennis van Prograss en Grassa! wordt gekoppeld. In dit vervolg zal de economische rentabiliteit van de grasraffinage vergroot worden door hoogwaardigere eindproducten te produceren.

6. Lignocellulose bioraffinage

Lignocellulosehoudende biomassa bevat relatief weinig water, kan gemakkelijk worden opgeslagen en bewaard en is het hele jaar door beschikbaar. Er hoeft dus niet in een beperkt tijdvak (campagne) gewerkt te worden. Hierdoor zijn de kapitaallasten veel lager dan bij nattere gewassen die wel in campagne verwerkt moeten worden zoals suikerbieten.

Een voorbeeld van lignocellulose bioraffinage is het verwerken van reststromen van graangewassen. Bij graangewassen is de eerste stap een mechanische scheiding van het graan en het stro. Het aandeel graan is ongeveer 66% en het aandeel stro 34% in geval van wintertarwe op kleigrond in Noord Nederland (KWIN, 2006). Beide stromen worden vervolgens apart behandeld. Het graan kan gebruikt worden voor voeding maar ook voor non-food toepassingen. Daarvoor wordt het graan gemalen en omgezet in zetmeel en suikers. Zo kan zetmeel als grondstof dienen voor de productie van zetmeelplastics (figuur 12) of worden omgezet tot suikers en verder worden omgezet via bestaande fermentatie-technologie in melkzuur, ethanol (1^e generatie bioethanol), butanol (bouwstenen voor de chemie en polymeren) of andere producten.



Figuur 12: Bioplastics op basis van zetmeel (Foto: Bert Annevelink).

Het stro kan worden gebruikt voor de opwekking van elektriciteit en warmte maar kan ook als bron van lignocellulose worden ingezet voor de productie van 2^e generatie bioethanol of andere chemicaliën.

Binnen het door de Europese Unie gesubsidieerde project Biosynergy wordt gekeken naar het gebruik van biomassa voor de productie van transportbrandstoffen, platformchemicaliën en energie met een focus op stro afkomstig van tarwe (Biosynergy, 2010). Daarbij worden zowel de biochemische als thermochemische conversiemethoden onderzocht.

Centraal staat de bioethanol fabriek van Abengoa in Spanje waar ethanol wordt geproduceerd uit tarwe en gerst. De nevenstromen die daarbij vrijkomen zoals stro en DDGS (Dried Distillers Grains with Solubles) kunnen vervolgens als grondstof dienen voor andere processen. Zo kan het eiwitrijke DDGS worden ingezet als veevoer. Voor het verwaarden van stro is door Abengoa naast de bestaande bioethanol fabriek een demonstratiefabriek gebouwd die in 2009 in productie is genomen (figuur 13). Op dit moment wordt in de demonstratiefabriek bioethanol geproduceerd via fermentatie van fermenteerbare suikers uit stro.



Figuur 13. Bioethanol productie van Abengoa in Salamanca, Spanje (Bron Biosynergy, 2010).

Binnen Biosynergy worden naast deze biochemische route ook thermochemische routes onderzocht voor het verder optimaliseren van het proces, en worden de mogelijkheden voor nevenproducten zoals lignine onderzocht (figuur 14). Er is momenteel nog onvoldoende kennis beschikbaar voor het optimaal scheiden van de lignine fractie uit biomassa en de omzetting van deze lignine naar hoogwaardige producten. Deze producten zijn onder andere

aromatische chemicaliën (zoals fenol), lijmverbindingen, bouwstenen voor polymeren en brandstofadditieven ter vervanging van petrochemische producten. Naast Biosynergy wordt ook in de projecten Lignovalue (Lignovalue, 2010) en Biocore (Biocore, 2010) gewerkt aan de productie en toepasbaarheid van lignine.

In Finland begint men naast papier ook steeds meer chemicaliën met een hoge toegevoegde waarde uit hout te produceren. Een groot voordeel is dat men al jarenlang ervaring heeft met het verwerken van grote stromen hout, zodat logistiek en opslag vaak geen probleem vormen. Het is daarom relatief eenvoudig om de keten uit te breiden met andere soorten producten. Men kijkt bijvoorbeeld ook naar producten uit de schors (kurkstof) en uit dennenolie (vetzuren). De productie van vetzuren was in de 80/90-er jaren juist stop gezet maar is inmiddels weer hervat, nu de olieprijs sterk gestegen is. Verder probeert men nieuwe producten uit de pulpvloeistoffen te halen (zoals koolhydraten).

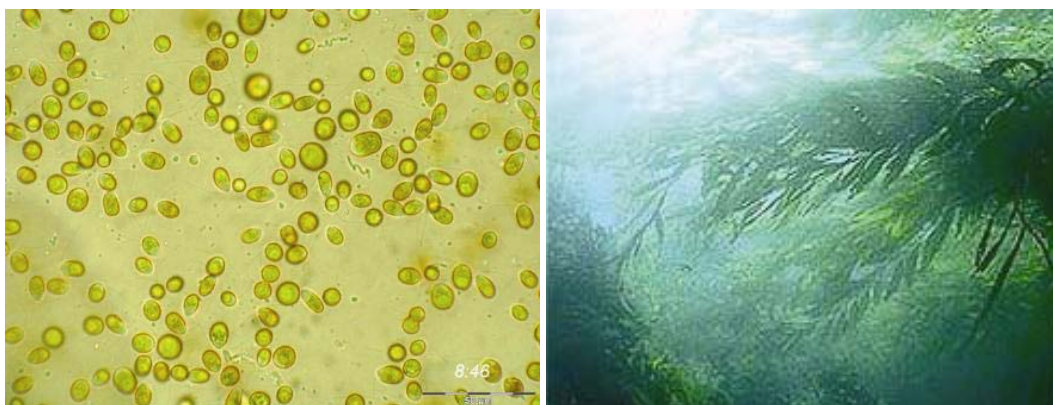


Figuur 14: Isoleren van lignine uit tarwe stro (Foto: Paulien Harmsen).

7. Marine bioraffinage

Aquatische biomassa is een interessante nieuwe grondstof voor bioraffinage en vormt een belangrijke aanvulling op het bestaande biomassa aanbod. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen microalgen en macroalgen (figuur 15). Microalgen zijn zeer kleine plantachtige organismen (1-50 micrometer) zonder wortels of bladeren maar wel in staat tot fotosynthese. Ze gebruiken koolstofdioxide (CO_2) voor de groei en produceren zuurstof (O_2). Macroalgen zijn echte waterplanten zoals zeewier en kelp. Microalgen worden in het vervolg aangeduid met de term 'algen', terwijl de term 'zeewieren' verwijst naar macroalgen.

Algen en zeewieren hebben een unieke samenstelling en bestaan uit een breed scala aan waardevolle componenten zoals oliën, vetzuren, eiwitten en suikers en zijn daardoor uitermate geschikt voor bioraffinage. In tegenstelling tot grondgebonden biomassa is nog veel onbekend van aquatische biomassa, en de benutting van dit potentieel vereist ontwikkelingen op het gebied van productietechnologie, conversietechnologie en logistieke ketens.



Figuur 15: Algen en zeewieren (kelp) (bron Algen, 2010).

De kweek van algen vindt plaats in open bassins (figuur 16) of gesloten bioreactoren. Grootschalige teelt van zeewieren vindt plaats in open zee waardoor concurrentie met land voor voedselteelt wordt voorkomen. De teelt van aquatische biomassa wordt gekenmerkt door een hoge productiviteit per eenheid oppervlak. Schattingen voor maximale theoretische capaciteit in Nederland liggen rond 140 ton/ha.jaar (Algen, 2010). De teelt kan gecombineerd worden met andere functies zoals waterzuivering en CO_2 -vastlegging in het geval van algen, en offshore windparken, vis- en schelpdierenteelt in het geval van zeewieren.



Figuur 16: Teelt van algen in open bassins op het land (bron Algen, 2010).

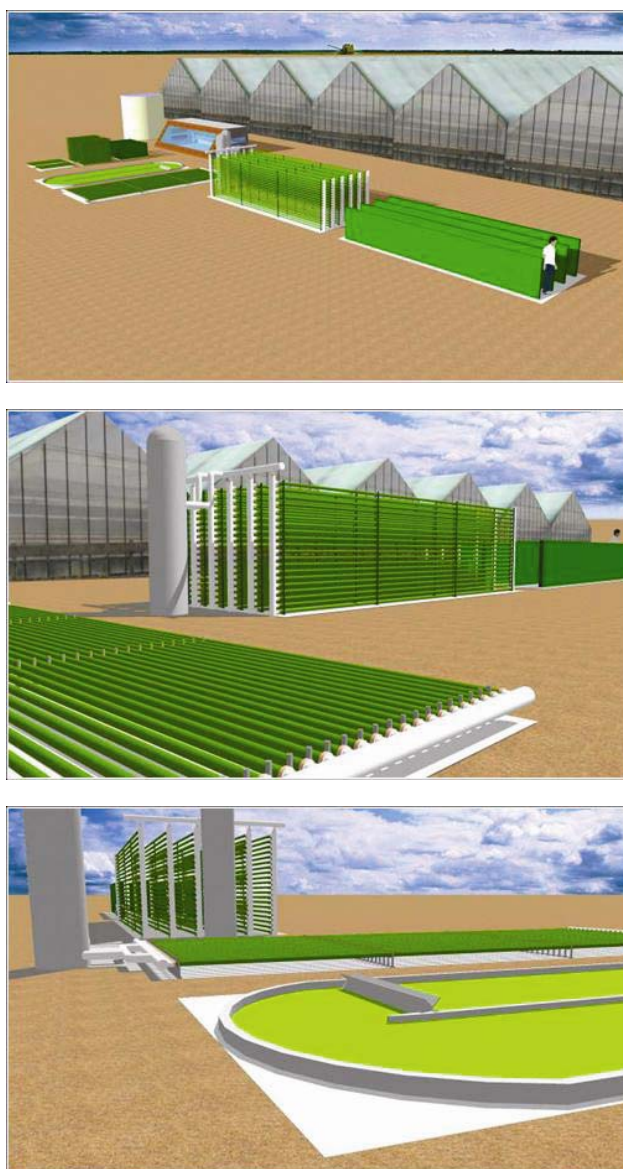
Bioraffinage van aquatische biomassa is met name voor algen substantieel anders. Voor deze eencellige organismen is het efficiënt isoleren van de biomassa uit het productiemedium (waterig milieu) de eerste stap. Algen bevatten geen lignine of hemicellulose maar hebben wel celwanden die eerst kapot gemaakt moeten worden zodat gewenste producten vrij komen. Isolatie en conversie van producten kan in een later stadium van de bioraffinage worden uitgevoerd.

Voor de teelt van zeewieren is de ecologische inpasbaarheid van grootschalige biomassateelt op zee een kritische succesfactor. Tevens is de regelgeving van belang voor de toelating van producten uit aquatische biomassa. Tenslotte zijn voor de ontwikkeling van aquatische biomassa maatschappelijk draagvlak en betrokkenheid van stakeholders cruciaal.

Wereldwijd wordt op dit ogenblik ca. 15.000 ton algen en ca. 2 miljoen ton zeewieren per jaar geogst. Beide vormen van aquatische biomassa worden voornamelijk ingezet voor hoogwaardige toepassingen zoals voedingssupplementen en voer voor aquacultuur (visteelt). Sinds enkele jaren is echter een sterk groeiende activiteit op het gebied van biobrandstofproductie uit algenolie te zien. Pilots en praktijktoepassingen zijn gericht op de ontwikkeling en demonstratie van commerciële concepten voor de productie van:

- Biobrandstoffen en bijproducten
- Voer voor aquacultuur (visteelt), inclusief het recyclen van nutriënten
- Productie van ingrediënten voor voeding

Zo wordt momenteel door Wageningen UR gewerkt aan het opzetten van het AlgaePARC (Algae Production and Research Centre) op de Wageningen Campus (figuur 17). Onderzoek zal worden uitgevoerd in flexibele pilots. Dit zal naast het fundamentele onderzoek, wat nu al plaatsvindt, meer kennis genereren over algenproductie op grotere schaal. Het is de verwachting dat het AlgaePARC begin 2011 gereed zal zijn.



Figuur 17: Schematische weergaven AlgaePARC (bron Algen, 2010).

8. Belangrijke zaken voor de toekomst

Voor bioraffinage in Nederland is een groot aantal technologische en niet-technologische aspecten geïdentificeerd die mogelijk kunnen bijdragen aan de grootschalige implementatie van bioraffinageprocessen in de Biobased Economy (Annevelink et al., 2009). Deze aspecten hebben betrekking op:

- Biomassa: beschikbaarheid en toepasbaarheid
- Biomassa: conversie tot tussenproducten en eindproducten
- Marktontwikkeling van bioraffinage op korte en lange termijn
- Sociale- en milieutechnische aspecten van bioraffinage
- Ketenontwikkeling

Biomassa: beschikbaarheid en toepasbaarheid

De haalbaarheid van een bioraffinageconcept (technisch en economisch) wordt voor een groot deel bepaald door de beschikbaarheid van grondstoffen. Implementatie van bioraffinageketens zal de grondstofmarkt gaan beïnvloeden.

Kwaliteit, homogeniteit en continuïteit van de grondstoffen is essentieel voor een goede werking van een bioraffinageconcept. De productie van landbouwgewassen is seizoensgebonden, en seizoensgebonden verwerking van deze gewassen resulteert in een suboptimale benutting van de aanwezige infrastructuur en een discontinue product levering naar de markt. Daarom zal aandacht moeten worden besteed aan methoden om opslag van grondstoffen, tussenproducten en eindproducten te verbeteren. Daarnaast is het wenselijk als een bioraffinaderij meerdere grondstoffen kan verwerken om jaarrond bedrijf mogelijk te maken.

Biomassa: conversie tot tussenproducten en eindproducten

Conversiemethoden hebben betrekking op mechanische, chemische, biochemische en thermochemische processen. Welke methode wordt toegepast is over het algemeen afhankelijk van de gebruikte grondstof en de gewenste producten. Scheidingstechnologie en katalytische omzettingen zullen essentieel zijn voor alle bioraffinageconcepten en verdienen daarom speciale aandacht.

Voor de ontwikkeling en verdere implementatie van bioraffinage door de industrie is het van essentieel belang dat deze processen, behalve technisch- en economisch haalbaar, ook zeer betrouwbaar zijn waardoor een continue bedrijfsvoering kan worden gegarandeerd.

Aangezien momenteel een grote variëteit aan bioraffinageconcepten wordt ontwikkeld, is er behoefte aan een grote diversiteit aan lab- en pilot-schaal faciliteiten. De realisatie van faciliteiten die de hele keten omvat door één stakeholder uit de industrie of de kennisinfrastructuur is financieel-technisch meestal niet haalbaar, en intensieve (internationale) samenwerking tussen verschillende sectoren is noodzakelijk.

Markontwikkeling van bioraffinage op korte en lange termijn

Bioraffinage zal naar verwachting op de korte termijn (tot 2015) in uiteenlopende markten worden geïntroduceerd door het aanpassen van bestaande industriële infrastructuren. De productkwaliteit en -homogeniteit staan hierbij centraal voor de klanten. Volledig geïntegreerde nieuwe bioraffinageconcepten zullen naar verwachting op de middenlange termijn (2015 – 2030) in de markt worden geplaatst. Voordat deze concepten kunnen worden toegepast moeten eerst relevante deelprocessen van dergelijke concepten verder worden ontwikkeld.

Grootschalige implementatie van bioraffinage resulteert in nieuwe bedrijvigheid. Bestaande bedrijven zullen proberen samen te werken, dan wel met elkaar in concurrentie gaan. Nieuwe samenwerkingsverbanden zullen ontstaan of bestaan al. De ontwikkeling en implementatie van de Biobased Economy is een grote uitdaging, waarbij de directe betrokkenheid van een groot aantal actoren (industrie, overheid, NGO's, instituten, universiteiten) uit diverse sectoren is vereist. Dit vraagt om samenwerking van industriële partijen die traditioneel nog niet aan elkaar gewend zijn zoals de agro-, chemie- en energiesector. Optimale interactie tussen genoemde actoren is essentieel voor de ontwikkeling van bioraffinage van een nichemarkt naar een goed ontwikkelde Biobased Economy. Kennisdisseminatie, samenwerking tussen verschillende nationale en internationale stakeholders, en het opleiden van de nieuwe experts voor de nabije toekomst zijn essentiële aandachtspunten in de transitie naar een Biobased Economy.

Sociale- en milieutechnische aspecten van bioraffinage

Een goede analyse van de duurzaamheid van biobased producten en ketens, en de onderlinge vergelijking met fossiele alternatieven is noodzakelijk om grootschalige implementatie van bioraffinage duurzaam en sociaal acceptabel te laten plaatsvinden. Ook is bestaande regelgeving vaak niet optimaal voor de ontwikkeling van bioraffinage. Een voorbeeld hiervan is

het etiket 'afval' op bepaalde biomassa; dit voorkomt de benutting in een breed scala aan raffinage-toepassingen. Andere voorbeelden zijn lokale milieu- en landschapsvergunningen die de implementatiemogelijkheden kunnen limiteren.

Ketenontwikkeling

Naast technologieontwikkeling zijn proces- en ketenmodellering en het uitdragen van kennis over bioraffinage uitermate belangrijke activiteiten bij de ontwikkeling van nieuwe ketens. Deze ketens bestaan meestal uit nieuwe combinaties van bestaande en nieuwe technologieën, toegepast op veelal bestaande biomassagrondstoffen. De ontwikkeling en implementatie van bioraffinageconcepten moet de hele keten van biomassateelt en -inzameling, biomassaconversie en productie van eindproducten omvatten. Alle technische, economische en ecologische aspecten, inclusief schaal en logistiek, moeten meegenomen worden bij het ontwerpen van nieuwe bioraffinageconcepten.

Dat bioraffinage leeft in Nederland blijkt wel uit het feit dat in juli 2010 de overheid in het kader van de TERM Bioraffinage Regeling (LNV, 2010) bekend heeft gemaakt dat in de komende periode 12 pilot-/demonstratieprojecten gesteund zullen worden met in totaal € 10 miljoen. In ieder van deze innovatieve projecten gaan bedrijven en kennisinstellingen samenwerken aan de realisatie van een pilot- of demo-installatie op het gebied van bioraffinage. Ze richten zich op verschillende van de genoemde bioraffinagevormen, wat ook blijkt uit de projecttitels:

- Groene chemische bouwstenen voor polymeren
- Chemische bouwstenen uit biomassa
- The unbeatable beet: bioraffinage van bieten
- Groene aardolie via pyrolyse
- Productie van melkzuur uit cyanobacteriën
- Terugwinnen van stikstof, fosfor en kalium uit organische reststromen
- Melkzuurproductie uit reststromen van de papierindustrie
- BIOCEL: papier en karton uit grasulp
- Organische zuren uit afvalwater papierindustrie
- Raffinage van op industriële afvalstromen gekweekte algen
- PROEffabriek katalytische biomassa; Omzetting naar furanics (PROOF)
- GRASSA! Hoogwaardige producten uit eiwitrijke gewassen

Terminologie

Alkaan	Eenvoudige koolwaterstof zonder functionele groepen of dubbele bindingen
Aminozuur	Organische verbinding die zowel een zuurgroep (-COOH) als een aminegroep (-NH ₂) bevat
Biodiesel	Uit plantenzieg geïmporteerde biobrandstof
Bioethanol	Uit suikers via fermentatie geïmporteerde ethanol
Biogas	Gas dat ontstaat bij vergisting van biomassa (grotendeels methaan (CH ₄) en CO ₂)
Cellulase	Enzymen die cellulose afbreken tot glucose
Cellulose	Polymeer van glucose
C5-suiker/ pentose	Suiker molecuul met 5 koolstofatomen (C ₅ H ₁₀ O ₅)
C6-suiker / hexose	Suiker molecuul met 6 koolstofatomen (C ₆ H ₁₂ O ₆)
Digestaat	Vergiste mest; het restproduct van biogasproductie
Eiwit	Polymeer opgebouwd uit aminozuren
Enzym	Eiwit met katalytische werking: versnelt, vertraagt, start of stopt een bepaalde reactie
Fermentatie	Omzetting van suikers in chemische verbindingen dmv micro-organismen
FT-diesel	Diesel geïmporteerde uit synthese gas via het Fischer-Tropsch proces
Hemicellulase	Enzymen die hemicellulose afbreken
Hemicellulose	Polymeer van voornamelijk C5-suikers
Hydrolyse	De splitsing van een chemische verbinding onder opnemings van water
Katalysator	Een stof die de snelheid van een bepaalde chemische reactie beïnvloedt zonder zelf verbruikt te worden
Lignine	Polymeer van aromatische verbindingen
Lignocellulose	Complex van cellulose, hemicellulose en lignine, zeer moeilijk afbreekbaar
Polymeer	Molecuul dat bestaat uit meerdere (>100) identieke of soortgelijke gekoppelde delen (monomeren)
Syngas	Gas dat ontstaat bij vergassing van biomassa (CO ₂ , CO, H ₂ en H ₂ O)

Vergassing	Proces dat biomassa bij hoge temperatuur omzet in syngas
Vergisting	Omzetting van biomassa naar biogas (methaan en CO ₂) en digestaat
WKK	Warmtekrachtkoppeling, gecombineerde productie van elektriciteit en warmte in gasmotor of turbine
Zetmeel	Polymeer van glucose

Literatuur referenties

Algen, 2010, www.algae.wur.nl

Annevelink, E., J. Broeze, R. van Ree, J.H. Reith & H. den Uil, 2009. *Opportunities for Dutch Biorefineries*. Wageningen UR & ECN, Report, No 1022, 149 pp.

Biocore, 2010. EU FP7 241566 (2010-2014), www.biocore-europe.org

Biosynergy, 2010. EU FP7 241566 (2010-2014),
www.biosynergy.eu of www.youtube.com/biosynergyproject

Dornburg, V. et al., 2008. *Biomass Assessment; Assessment of global biomass potentials and their links to food, water, biodiversity, energy demand and economy*, 108 pp.

EU, 2007. *The EU climate and energy package*.
ec.europa.eu/environment/climat/climate_action.htm

EZ, 2008. *Innovatieagenda Energie*. Report, 117 pp.

Grassal, 2010. www.grassanederland.nl

IEA Bioenergy Task 42 on Biorefineries, 2009a. *Biorefineries: adding to the sustainable utilisation of biomass*. Feature article, 16 pp, zie ook www.iea-bioenergy.task42-biorefineries.com

IEA Bioenergy Task 42 on Biorefineries, 2009b. Brochure, 26 pp.

Koppejan, J., W. Elbersen, M. Meeusen, P. Bindraban, 2009. *Beschikbaarheid van Nederlandse biomassa voor elektriciteit en warmte in 2020*, rapportage in opdracht van SenterNovem.

KWIN, 2006. Kwantitatieve Informatie Akkerbouw en Vollegrondsgroenteteelt 2006, p 128.

Lignovalue, 2010. EOS-LT05011 (2007-2010) www.lignovalue.nl

LNV, 2007. *Overheidsvisie op de biobased economy in de energietransitie – De keten sluiten*, Nota mede namens EZ en VROM, 36 pp.

LNV, 2010. *Minister Verburg deelt € 10 miljoen uit voor hergebruik plantaardige afvalstoffen*, www.minlnv.nl/portal

Platform Groene Grondstoffen, 2006. *30% vervanging van fossiele brandstoffen in 2030*

Platform Groene Grondstoffen, 2007. *Groenboek energietransitie*, 144 pp.
www.senternovem.nl/mmfiles/GroenBoek

Platform Groene Grondstoffen, 2010. *Speerpunten in 2010*, 20 pp.
www.senternovem.nl/mmfiles/PlatformGroeneGrondstoffen

Ree, R. van & E. Annevelink, 2007. *Status Report Biorefinery 2007*. Agrotechnology & Food Sciences Group, Wageningen UR, Report 847, 110 pp.

Sanders, J., E. Scott & H. Mooibroek, 2005. *Biorefinery, the bridge between agriculture and chemistry*. Presented at the 14th European Biomass Conference in Paris, 223-227.

Colofon

Bioraffinage; Naar een optimale verwaarding van biomassa

Bert Annevelink en Paulien Harmsen

Met dank aan Harriëtte Bos, René van Ree, Koen Meesters, Edwin Keijsers, Richard Gosselink en Brenda Israel

Oktober 2010

© Wageningen UR Food & Biobased Research

ISBN 978-90-8585-761-7

Druk: Propress, Wageningen

Biobased Products

Wageningen UR Food & Biobased Research

Bornse Weilanden 9

Postbus 17

6700 AA Wageningen

Internet: www.fbr.wur.nl

E-mail: info.fbr@wur.nl

Zijn er relaties die u met deze publicatie een plezier kunt doen dan zouden we dat graag van u vernemen.

De publicatie is mogelijk gemaakt door het beleidsondersteunend onderzoeksthema Biobased Economy (BO-12.05-002), gefinancierd door het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw & Innovatie. Het is de tiende in een reeks publicaties over het gebruik van agrogrondstoffen en nevenstromen in veilige en gezonde producten voor consumenten- en industriële markten.