

Microalgen: het groene goud van de toekomst?



Grootschalige duurzame kweek van
microalgen voor de productie van
bulkgrondstoffen

HANS WOLKERS, MARIA BARBOSA, DORINDE KLEINEGRIS,
ROUKE BOSMA, RENÉ WIJFFELS

Uitgegeven in de reeks “Groene Grondstoffen”

1. Technologie voor gezondheid en milieu; agenda voor duurzame en gezonde industriële toepassingen van organische nevenstromen en agro-grondstoffen in 2010, Sietze Vellema en Barbara de Klerk-Engels (2003).
2. Nieuwe composteerbare verpakkingsmaterialen voor voedseltoepassingen, Christiaan Bolck, Michiel van Alst, Karin Molenveld, Gerald Schennink en Maarten van der Zee (2003).
3. Markten voor groene opties: ervaringen in verpakkingen, verven en isolatiematerialen, Sietze Vellema (samenstelling) (2003).
4. Groene grondstoffen in productie; recente ontwikkelingen op de markt, Harriëtte Bos en Bert van Rees (2004).
5. Technologische innovatie in de keten; groene grondstoffen in ontwikkeling, Harriëtte Bos en Marc van den Heuvel (2005).
6. Bioplastics, Christiaan Bolck (2006).
7. Weekmakers; groene grondstoffen bieden nieuwe mogelijkheden, Karin Molenveld (2006).
8. Doorbreken van de innovatieparadox; 9 voorbeelden uit de biobased economy, Christiaan Bolck en Paulien Harmsen (2007).
9. Agrificatie en de Biobased Economy; Een analyse van 25 jaar beleid en innovatie op het gebied van Groene Grondstoffen, Harriëtte Bos (2008).
10. Bioraffinage; Naar een optimale verwaarding van biomassa, Bert Annevelink en Paulien Harmsen (2010).
11. Duurzaamheid van biobased producten; Energiegebruik en broeikasgas-emissie van producten met suikers als grondstof, Harriëtte Bos, Sjaak Conijn, Wim Corré, Koen Meesters, Martin Patel (2011).

Voor meer informatie zie www.groenegrondstoffen.nl

Voorwoord

De kweek van microalgen kan een belangrijke rol spelen in milieuvriendelijke productie van grondstoffen voor biodiesel. Daarnaast leveren algen tal van andere nuttige stoffen voor de levensmiddelen- en chemische industrie. Dit boekje brengt de huidige stand van zaken omtrent algenkweek in kaart. Daarnaast analyseert het de mogelijkheden van economisch rendabele algenkweek op grote schaal voor de winning van waardevolle producten, inclusief grondstof voor biodiesel.

Hoofdstuk 1 illustreert de potentiële rol van microalgen in het verduurzamen van de samenleving.

Hoofdstuk 2 beschrijft enkele belangrijke groepen algen en de mogelijkheden die ze bieden als producenten van nuttige stoffen.

Hoofdstuk 3 behandelt de belangrijkste algen kweeksystemen en de huidige stand van zaken omtrent algenkweek in Nederland.

Hoofdstuk 4 beargumenteert de voordelen van algenkweek ten opzichte van andere landbouw gewassen.

Hoofdstuk 5 analyseert de mogelijkheden om microalgen op grote schaal rendabel te kweken en de belangrijke rol die het Wageningen algencentrum, AlgaePARC, gaat vervullen in onderzoek naar de optimalisatie van algenkweek.

Hoofdstuk 6 is een samenvatting van de conclusies en aanbevelingen voor een rendabele kweek.

Inhoudsopgave

1.	Inleiding.....	7
2.	Microalgen.....	9
3.	Algenkweek	13
4.	Rol van algen in de biobased economy.....	19
5.	AlgaePARC.....	23
6.	Conclusies	29
7.	Referenties	31
	Colofon	34

1. Inleiding

Opkomende economieën en de groeiende wereldbevolking doen een steeds groter beroep op de natuurlijke hulpbronnen van de aarde. In 2050 zal de wereldbevolking een geschatte negen miljard mensen bedragen; anderhalf keer zoveel als het huidige aantal. Hierdoor zal de vraag naar grondstoffen explosief stijgen. Nooit eerder was de noodzaak en de uitdaging om de samenleving te verduurzamen op het gebied van energiewinning, landbouw en economie groter dan in deze eeuw.

Duurzame productiemethoden voor voedsel en energie zijn noodzakelijk als we niet elke vierkante meter natuur in landbouwgrond om willen zetten. Daarnaast moet er een alternatief voorhanden zijn voor de eindige oliereserves. De samenleving richt zich dan ook steeds meer op duurzaamheid en geeft prioriteit aan de recycling van reststromen, ofwel afval, duurzame productie en efficiënt gebruik van energie.

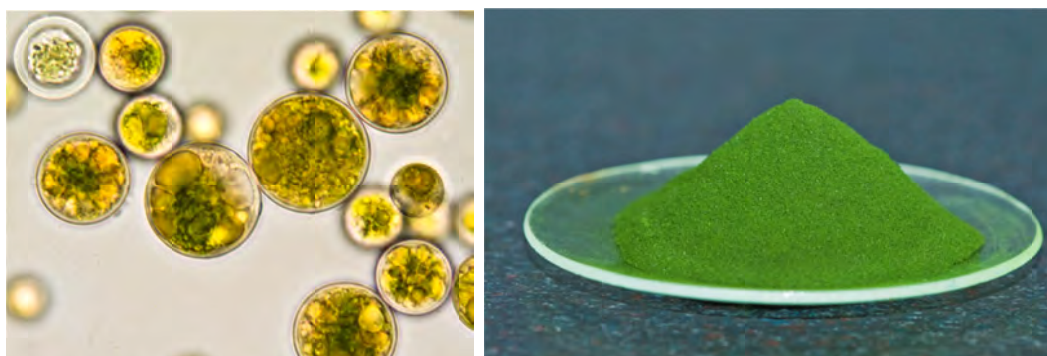


Foto 1: Groene alg met vetdruppels in de cel en algenpoeder (bron Wild Frontiers/Hans Wolkers)

De kweek van microalgen kan een belangrijke bijdrage leveren aan het verduurzamen van de samenleving. Algen zijn niet alleen in te zetten voor de milieuvriendelijke productie van talloze grondstoffen, maar ook als afvalverwerkers. Ze groeien namelijk uitstekend op afvalstromen, zoals bijvoorbeeld kooldioxide uit rookgassen, restwater van agro-industriële bedrijven en zelfs verdunde mest. Hierbij zetten ze afval om in bruikbare

grondstoffen. Algen recyclen zo de voedingsstoffen die anders weg zouden spoelen, en sluiten zo de nutriëntenkringloop met schoner water als bonus. Maar algen zijn niet alleen veelbelovend als zuiveraars en recyclers. De algencel bevat zoveel nuttige stoffen dat ze steeds vaker speciaal voor dat doel gekweekt worden. Zo is het mogelijk via algenkweek stoffen zoals oliën, eiwitten, zetmeel en pigmenten (bijvoorbeeld bètacaroteen) te produceren. Toepassingen van deze stoffen zijn talrijk: van biodiesel en bioplastic tot kleurstoffen en hamburgers.

2. Microalgen

Soorten

Microalgen, door biologen ook wel fytoplankton genoemd, zijn zeer kleine plantachtige organismen tussen de 1-50 micrometer groot, zonder wortels of bladeren. Samen met de macroalgen (zeewier) en 'echte' waterplanten maken microalgen deel uit van de zogenaamde aquatische biomassa.

Microalgen zijn zeer algemeen en komen met honderdduizenden soorten voor in zowel zoet- als zeewater, waar ze aan de basis staan van de meeste voedselketens. Veel soorten bezitten bladgroen en benutten zonlicht als energiebron en zetten zo kooldioxide (CO_2) om in biomassa. Bij dit proces van fotosynthese produceren de algen zuurstof (O_2). Op wereldschaal maken microalgen zo ruim driekwart van de benodigde zuurstof voor dier en mens aan.

Met het blote oog zijn microalgen niet te zien, maar als het water heel voedselrijk is kan er een massale algenbloei optreden, die het water in een groene, bruine, blauwe of oranje soep verandert. Slechts enkele tienduizenden van de in totaal 200.000 tot 800.000 verschillende soorten zijn beschreven door de wetenschap. Met nog zoveel onbekende soorten vormen algen een bijna onuitputtelijke bron van mogelijkheden.

De genetische analyse en ordening van alle soorten microalgen is nog in volle gang, waardoor er nog geen complete en consistente indeling is. Taxonomen onderscheiden op dit moment enkele belangrijke groepen algen:



Foto 2: Experimentele algenweekreactor (bron Wageningen Universiteit)

- Groenwieren of groene algen. Met zo'n 7500 soorten een van de grootste groepen algen. Deze algen bevatten hetzelfde bladgroen als landplanten, bevatten veel eiwit en kunnen onder stress zetmeel en olie in de cel opslaan. Er zijn zowel eencellige als meercellige soorten. *Chlorella* is een bekende eencellige soort, die ook commercieel wordt gekweekt.
- Roodwieren. Zo'n 5000 vooral meercellige mariene soorten, die in de getijdenzone van zee leven.
- Kiezelwieren of diatomeeën. Met meer dan 100.000 soorten produceert deze groep eencellige algen de meeste biomassa op aarde. Ze zijn een onmisbare voedselbron voor het dierlijk plankton in zoet- en zeewater. Deze bruinige algen hebben een bijzonder fraai gevormd skelet van silica dat als twee helften van een doosje op elkaar past. Kiezelwieren produceren vooral olie, die ze in de cel opslaan. Door de hoeveelheid olie te variëren kunnen ze hun drijfvermogen regelen.

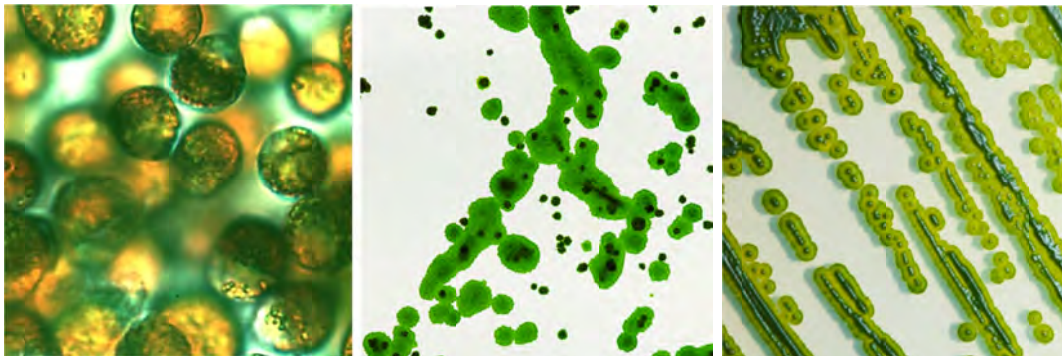


Foto 3: Algencellen die carotenoïden ophopen (links, bron Wageningen Universiteit) en kweken van twee verschillende groenalgen op agar platen (midden en rechts, bron Wild Frontiers/Hans Wolkers)

- Bruinwieren. Vrijwel alle 1500 tot 2000 soorten zijn meercellige algen die bijna allemaal alleen in zee voorkomen. Bruinwieren zoals blaaswier en ook stukken kelp spoelen vaak op het strand aan en zijn daardoor voor veel mensen het klassieke zeewier.
- Goudwieren. Deze groep fraai gekleurde eencellige wieren komt met zo'n 1000 soorten vooral voor in zoet water, hoewel er ook een aantal mariene

soorten zijn. Ze zijn in het bezit van zweefpharen, die ze gebruiken om zich voort te bewegen.

- Geel-groene wieren. Dit zijn nauwe verwanten van de bruinwieren, maar de meeste van de circa 600 soorten zijn eencellig en leven in zoet water. *Nannochloropsis* is een uitzondering: deze snelgroeiende soort komt in zee voor. Omdat deze alg veel olie als voedselreserve in de cel opslaat, vindt er veel onderzoek plaats naar de kweek van deze soort voor de winning van grondstof voor biodiesel.
- Blauwwieren of cyanobacteriën. Een beruchte alg die soms gif produceert en in hoge dichtheden de waterkwaliteit ernstig kan aantasten. Blauwalgen slaan voedsel op als zetmeel terwijl de cel voor meer dan de helft uit eiwit kan bestaan. De soort *Spirulina* wordt wereldwijd gekweekt en vooral toegepast als voedingssupplement.

Grondstoffen uit algen

Veel algensoorten kunnen een fors percentage hoogwaardige oliën bevatten, deels bestaand uit omega-3 en omega-6 vetzuren, die als grondstof voor voedingssupplementen kunnen dienen. De beroemde omega-3 vetzuren in vis komen oorspronkelijk uit microalgen.

Nu zijn er talloze landbouwgewassen die olie of zetmeelachtige stoffen bevatten waaruit onder andere brandstof kan worden gemaakt. Wat algen bijzonder maakt is dat ze naast grondstof voor energie een grote verscheidenheid aan andere nuttige componenten bevatten. De laatste jaren zijn er meer dan 15.000 nieuwe chemische verbindingen in algen ontdekt. Naast vetzuren kunnen de algencellen ook carotenen (pigmenten variërend van geel tot rood) en andere kleurstoffen, antioxidanten, eiwitten en zetmeel bevatten. Deze componenten zijn door de chemische- en levensmiddelenindustrie als grondstof te gebruiken voor tal van producten. De lijst met uit algen gemaakte producten groeit dan ook gestaag.

Naast hoogwaardige algenproducten voor nichemarkten, zoals algenpoeder voor de voedingssupplementenindustrie en algenextracten voor de bestrijding van schimmel in golfvelden, komt er ook steeds meer belangstelling voor bulkproducten, zoals grondstoffen voor bioplastics, biobrandstoffen, maar ook algeneiwit voor voedseltoepassingen.

Productie van nuttige stoffen door algen kan gestuurd worden door de kweekcondities te manipuleren. Juist als de omstandigheden niet optimaal zijn en de cellen gestrest raken, blijken ze nuttige stoffen te gaan aanmaken zoals pigmenten, zetmeel en oliën. Zo stimuleert teveel licht de productie van carotenen in de algencel. Die pigmenten zijn tegelijkertijd antioxidanten en beschermen de cel tegen schadelijke vrije radicalen die ontstaan door de overdosis licht. Wel neemt de groei dan af en kleuren de algen van groen naar oranje.

Als er te weinig voeding in de vorm van stikstof beschikbaar is gaan algen vooral olie produceren. Algenkwekers maken hiervan gebruik door algen een verplicht dieet te laten volgen, waarbij onvoldoende voedingsstoffen in de kweekvloeistof zitten. Dit remt de groei en de alg stopt met de aanmaak van eiwitten en gaat in plaats daarvan juist meer oliën produceren, die als kleine bolletjes in de cel worden opgeslagen.

3. Algenkweek

Kweeksystemen

Microalgen worden al decennialang op kleine schaal vooral in Azië en Noord-Amerika gekweekt, meestal voor toepassingen in de (dier)voeding. Het gaat hier echter om een klein aantal soorten. *Spirulina* en *Chlorella* zijn hiervan bekende voorbeelden. Kwekers produceren deze soorten speciaal voor de voedingssupplementenindustrie. Op dit moment wordt wereldwijd maar zo'n 5000 ton gedroogde algen per jaar geproduceerd.

Er zijn een viertal verschillende productiesystemen in gebruik bij algenkwekers.

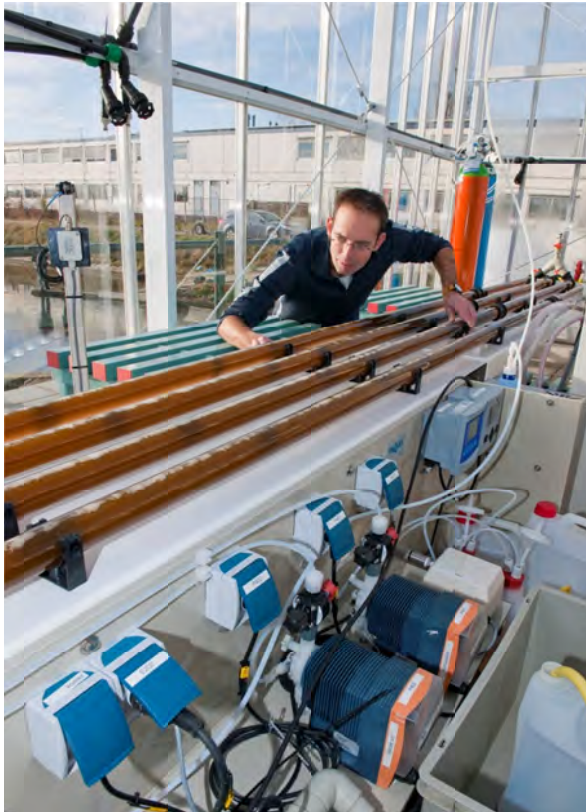
1. Open vijvers of raceways

Ondiepe ringvormige kanalen waarin menging plaatsvindt met behulp van schoepenwielen. Wereldwijd zijn dit de meest toegepaste kweeksystemen. Een belangrijk voordeel van dit eenvoudige ontwerp is de relatief lage investeringskosten. Daar staat tegenover dat zo'n open, grote vijver minder goed te controleren is dan een gesloten kweekstelsel. Er verdampt water en ook is dit systeem gevoelig voor infecties, waardoor de keuze van de te kweken algensoort zich beperkt tot resistente, snelgroeiende soorten.



Foto 4: Raceway vijver bij Ingrepo (bron Wild Frontiers/Hans Wolkers)

Algenvijvers zijn echter niet het meest effectieve kweekstelsel. Theoretisch kan door middel van fotosynthese maximaal 10 procent van de energie in zonlicht omgezet worden in chemische energie (biomassa). De rest van de lichtenergie gaat verloren als warmte. In de praktijk ligt het percentage benutte zonne-energie echter veel lager. Voor een algenvijver is dit circa 1,5 procent. De hoeveelheid licht aan het oppervlak is hoog. Bij een hoge lichtintensiteit gaat relatief meer licht verloren als warmte dan bij een lage lichtintensiteit. Bovendien dringt zonlicht slechts enkele centimeters door in de troebele vijver. Hierdoor ontvangen alleen de algencellen aan het oppervlak veel licht.



Algenkweek in zonniger streken is potentieel veel productiever, mits de benutting van zonne-energie efficiënter wordt. Dat kan onder andere door de alg minder licht te laten absorberen, bijvoorbeeld door de antennegrootte van algen met behulp van genetische modificatie te verkleinen. Door die verminderde lichtabsorptie zal licht ook dieper in de vijver doordringen, waardoor meer algen zonlicht voor fotosynthese ontvangen. Een mogelijk nadeel van deze methode is dat de genetisch veranderde algen de concurrentie met wildtype algen verliezen.

Foto 5: Algenkweek in horizontale buisreactor bij Hogeschool Zeeland in samenwerking met Wageningen Universiteit in het Zeeuwse Tong project (bron Wild Frontiers/Hans Wolkers)

2. Enkel-laags of horizontale buisreactoren

Dit is een gesloten kweekstelsel, opgebouwd uit een enkele laag horizontale buizen. Zo'n buisreactor laat meer controle toe en is per vierkante meter productiever. Daarnaast is dit stelsel makkelijk op te schalen: je verlengt simpelweg de buis. Een belangrijk nadeel van dit ontwerp is dat evenals bij de vijver de lichtintensiteit die op de met algen gevulde buis valt erg hoog is. Een nadeel van alle buisreactoren is de hoge energiekosten van het rondpompen van de algensoep. Ook de gasuitwisseling is bij deze systemen niet optimaal; O_2 bouwt zich op en dit is bij hoge concentraties giftig voor algen. Daarnaast liggen de constructiekosten mogelijk hoger.

3. Driedimensionale buisreactoren

Dit stelsel is opgebouwd uit meerdere lagen buizen die verticaal op elkaar



geplaatst zijn en zo een soort verticale panelen, opgebouwd uit buizen, vormen. Dit type reactor heeft deels dezelfde voor- en nadelen als de enkele laag buisreactor. Een belangrijk verschil is dat het probleem van een te hoge lichtintensiteit hier veel minder speelt. Dit komt doordat de verticaal gestapelde buizen als het ware in elkaars schaduw staan, waardoor de lichtintensiteit op het buisoppervlak lager is. Ook de productiviteit is hoger dan van de enkele laag buisreactor, doordat er meer buizen op hetzelfde oppervlak passen, waardoor de opbrengst per vierkante meter toeneemt.

Foto 6: Driedimensionale buisreactor in AlgaePARC (bron Wild Frontiers/Hans Wolkers)

4. Vlakke plaat reactoren

Dit zijn gesloten reactoren opgebouwd uit series vlakke, parallelle platen. Die systemen zijn in theorie het meest productief. Er is geen ophoping van het giftige O_2 en ook is de lichtintensiteit niet te hoog. Nadeel van dit systeem is dat er relatief veel elektriciteit nodig is voor het mengen van nutriënten en om de algen in suspensie te houden. Hierdoor is het energieverbruik hoog. Daarnaast is het toevoegen van extra CO_2 wat moeilijker en ook is dit systeem wat lastiger op te schalen.

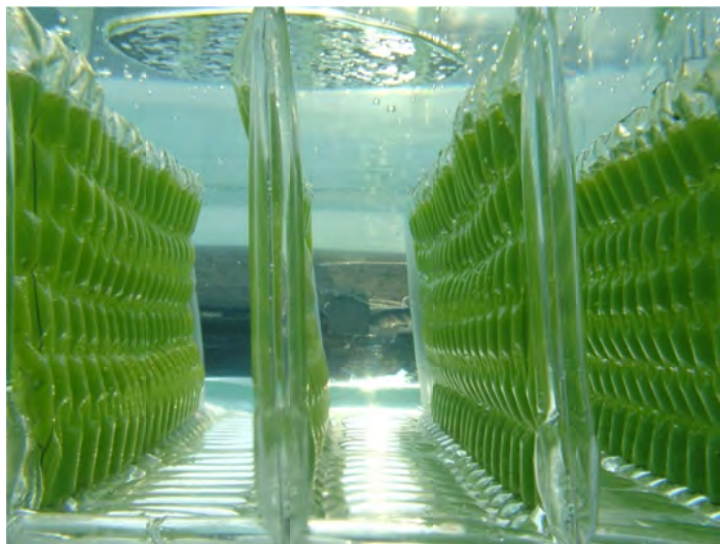


Foto 7: Variatie op vlakke plaat reactor van Proviron (bron Proviron)

Algenkweek in Nederland

In Nederland is algenkweek een relatief nieuwe activiteit. Tal van experimenten komen langzaam maar zeker van de grond om de toepassing van microalgen te onderzoeken. Zo test de Stichting Zeeuwse Tong de mogelijkheden van binnendijkse viskweek in een gesloten kringloop: het afvalwater van de tongkweek dient als voedingsbron voor de kweek van kiezelalgen, ook wel diatomeeën genoemd. De gekweekte diatomeeën vormen op hun beurt weer voedsel voor schelpdieren. De eerste resultaten zijn veelbelovend. De diatomeeëncel is weliswaar kwetsbaar, maar de kiezelwieren zijn desondanks goed te kweken in de nieuw ontworpen kweekreactor van transparante, plexiglas buizen.

Een handjevol Nederlandse bedrijven (AF&F, Algaelink, Aquaphyto, Ingrepro, Lgem, Maris, Phycor) kweekt sinds een aantal jaren algen op kleine schaal. Zij richten zich vooral op nichemarkten. Zo kweekt algenkweekbedrijf Ingrepro in het Gelderse Borculo algen in een tweetal open vijvers, in totaal een kleine 4000 m². Grote schoepen houden de stroming op gang en de dagelijkse oogst gebeurt volledig automatisch. Na het aftappen van de algensoep wordt die ingedikt en vervolgens tot flinterdunne vellen gedroogd. De gedroogde algen, al of niet tot kleine pellets samengeperst, vormen de basisgrondstof voor de talloze algenproducten die het bedrijf voor een breed scala aan klanten produceert.



Foto 8: Ingedikte algensoep, drogen tot flinterdunne vellen en geperste pellets bij Ingrepro (bron Wild Frontiers/Hans Wolkers)

Ook kweekbedrijf LGem bedient een nichemarkt. Dit bedrijf produceert zeer hoogwaardige algenproducten in drie gesloten kweeksystemen van flexibele buizen, in totaal zo'n 300 m² per systeem. Als de algendichtheid hoog genoeg is, tappen medewerkers de donkergroene algensoep af. Een krachtige centrifuge scheidt vervolgens de algen van het water en transformeert zo de algensoep in een kleverige, groene pasta.

Kosten van open en gesloten kweeksystemen

De kosten van algen biomassa productie zouden in open systemen altijd lager zijn dan in gesloten systemen. De vergelijking gaat echter maar ten dele op omdat gesloten fotobioreactoren alleen toegepast zijn voor de productie van algen met zeer hoge marktwaarden (voor niche markten). Hierdoor zijn ontwerpen nooit aangepast voor grootschalige productie van bulk producten. Een uitgebreide berekening van de productiekosten van open vijvers en gesloten fotobioreactoren liet echter zien dat beide systemen elkaar in dat opzicht niet veel ontliepen. Wel kunnen de kosten van gesloten systemen door verbeteringen in het ontwerp veel meer gereduceerd worden dan van open systemen. Er zijn hierbij nog vele onzekere factoren en er zijn vele uitdagingen die opgelost moeten worden. Het is nog te vroeg om te concluderen dat bepaalde systemen beter zijn dan de andere. Het is noodzakelijk innovaties door te voeren om kosten te reduceren en de duurzaamheid van de technologie te verbeteren voordat commerciële productie van algenbiomassa voor bulkproducten echt mogelijk is.

Van de relatief langzaam groeiende soort *Nannochloropsis* produceert één kweekstelsel per dag gemiddeld zo'n tien kilo algenpasta, circa 1 kilo droge alg. Na vriesdrogen en vermalen tot een diepgroen algenpoeder is het eindproduct klaar voor de verkoop. LGem levert zijn algenproducten vooral aan de voedingssupplementenindustrie, maar ook aan viskwekers die vislarven opkweken met behulp van algen. De productiekosten voor de pasta liggen op deze relatief kleine productieschaal ruim boven de € 40 per kilo droge stof. Daarbovenop komen nog het vriesdrogen en verpakken. Daar staat tegenover dat de marktprijzen voor gevriesdroogd poeder rond de € 400 tot 500 per kilo liggen.

4. Rol van algen in de biobased economy

Kostenreductie

De hoge marktprijs voor de kleinschalige productie van kwalitatief hoogwaardige algenproducten voor nichemarkten maakt kostenreductie, door bijvoorbeeld schaalvergroting, geen topprioriteit. Grootschalige productie heeft voor deze nichemarkten ook weinig zin door de kleine vraag naar deze producten. Bij de veel grotere markt voor bulkproducten van wat lagere kwaliteit, zoals grondstoffen voor biodiesel, is beperking van de kosten veel meer van belang. Die producten moeten immers economisch kunnen concurreren met reeds bestaande grondstoffen. Zo zal algenolie qua prijs het niveau van aardolie en ook palmolie moeten benaderen wil er überhaupt een kans zijn dat algen grootschalig kunnen worden ingezet bij de productie van biodiesel.

Waarde van de algenbiomassa

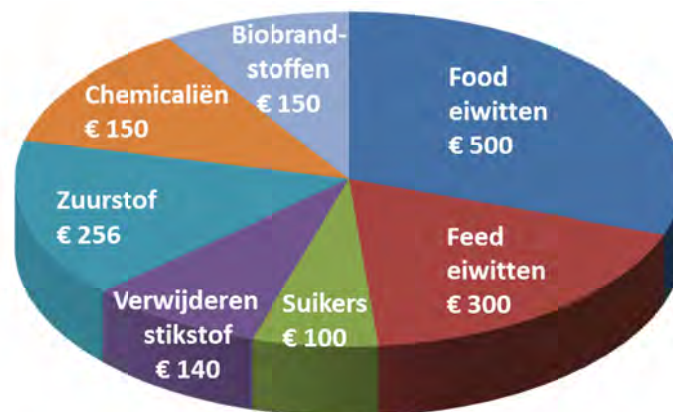
Op dit moment kost de productie van een liter palmolie circa 0.50 €/kg. Als de productie van een kilo algenbiomassa hetzelfde kost, is het noodzakelijk ook alle andere componenten uit de biomassa te benutten om economisch rendabel te kunnen produceren. Door de algenbiomassa op te delen in verschillende componenten, ieder met een bepaalde waarde, is zo een



berekening van de totale waarde van 1 kg algen te maken. Als voorbeeld gaan we uit van een algenbiomassa die voor 40 % uit olie, 50 % uit eiwit en 10 % uit suikers bestaat (figuur 1). In dit voorbeeld wordt een deel van de olie gebruikt om biobrandstoffen te maken en een deel dient als grondstof voor de chemische industrie.

Foto 9: Algenolie (bron Wild Frontiers/Hans Wolkers)

Water-oplosbare eiwitten kunnen deels gebruikt worden in levensmiddelen in plaats van soja-eiwit en deels in veevoer. Ook de suikers hebben tal van toepassingen. Daarnaast levert ook het door algen geproduceerde O_2 en de verwijdering van nutriënten uit reststromen inkomsten op. In totaal is de algenbiomassa zo 1.65 €/kg waard, bij een kostprijs van € 0.50. Dat betekent dat het in principe de moeite waard is om algen te produceren voor een combinatie van producten waarvan een van de producten biobrandstof is. Hier zijn echter nog niet de kosten voor bioraffinage in verrekend.



Figuur 1: Waarde van ingrediënten in algenbiomassa

Food, fuel en biodiversiteit

Biobrandstoffen zoals palmolie en koolzaadolie staan sterk ter discussie wat betreft duurzaamheid, de negatieve impact op de biodiversiteit en de competitie met voedselgewassen. Op dit moment komt een groot deel van de olie nodig voor biodiesel uit oliepalmen en koolzaad. Palmolieplantages gaan echter ten koste van grote stukken regenwoud. Ook de koolzaadteelt heeft nadelen omdat dit landbouwgrond inneemt, waardoor op plaatsen waar dit gewas groeit geen voedsel verbouwd kan worden. De huidige biobrandstofproductie concurreert zo in veel gevallen met oerbos en voedselproductie. Algenkweek heeft die nadelen veel minder en dat maakt deze vorm van landbouw een aantrekkelijke optie. Microalgen zijn zeer intensief te kweken in gesloten systemen op plekken waar geen andere

landbouw mogelijk is, en waar de natuur geen schade ondervindt. Sommige woestijnachtige gebieden in Afrika of Australië, drijvende systemen op zee, wegbermen, platte daken of vervuilde grond komen hiervoor in aanmerking. Bij de introductie van een nieuw gewas zijn er ook risico's. Producten bestemd voor de voedselketen moeten veilig zijn voor consument en omgeving. Grootschalige kweek mag niet leiden tot overwoekering van natuurlijke populaties. De meeste algen bevatten geen giftige componenten en worden onder speciale omstandigheden gekweekt (hoge zoutconcentraties, hoge pH) en hebben geen concurrentievoordeel ten opzichte van natuurlijke populaties. Bij de ontwikkeling van de technologie dient er zorgvuldig omgegaan te worden met deze potentiële gevaren. Daarom is inperking van risico's een onderdeel van het onderzoek.

Water en nutriënten behoefte

Algenkweek is ook aantrekkelijk als duurzaam alternatief omdat ze op zeewater, CO₂ en overtollige nutriënten in afvalstromen kunnen groeien. Voor de productie van 1 liter biobrandstof met behulp van olie houdende gewassen is zo'n 5000 liter zoet water nodig. Algenkweek in zout water kost volgens berekeningen slechts 1.5 liter zoet water per liter geproduceerde olie.

Als brandstof op basis van algenolie alle transportbrandstoffen in Europa (400 miljard liter/jaar) gaat vervangen en we hierbij uitgaan van een opbrengst van ongeveer 40,000 liter olie/ha/jaar is daarvoor een oppervlakte nodig van 10 miljoen hectare. Dit is ongeveer de grootte van een land als Portugal. Dat is weliswaar een groot oppervlak, maar het past ruim binnen Europa. Het grote voordeel is dat Europa dan voor transportbrandstof zelfvoorzienend is. Als bijproduct wordt dan 0.3 miljard ton eiwit geproduceerd. Dit is 40 maal de hoeveelheid die Europa als soja-eiwit momenteel invoert. Met andere woorden: algen kunnen zowel brandstoffen als voedsel produceren.

Naast voldoende brandstof voor het Europese transport heeft grootschalige algenteelt positieve gevolgen voor zowel de CO₂ balans als het overschot aan nutriënten in afvalwater en mest. Voor de groei van die hoeveelheid algen is 1.3 miljard ton CO₂ nodig (Europa produceert jaarlijks 3.9 miljard ton CO₂) en 25 miljoen ton stikstof (Europa produceert jaarlijks 8 miljoen ton stikstof in afvalwater en mest).

Bovenstaande getallen laten zien dat het kweken van algen niet ten koste hoeft te gaan van de biodiversiteit en de voedselproductie en substantieel bij kan dragen aan de verduurzaming van onze economie.

Stand-alone systemen: de toekomst

Er zijn grootschalige algenkweeksystemen nodig voor de productie van voldoende biodiesel voor de vervanging van fossiele brandstof. Ideaal gesproken zouden de algen hiervoor gekweekt moeten worden in streken met heel veel zonneschijn en oppervlak dat momenteel niet gebruikt wordt voor landbouw: woestijnen. De beschikbaarheid en toevoer van water, meststoffen, zoals fosfaat en stikstof, en aanlevering van CO₂ naar dit soort afgelegen gebieden zal echter bij een toepassing op dergelijke grote schaal problematisch zijn. Het uiteindelijke doel is dan ook een kweekstelsel te ontwerpen dat onafhankelijk is van de aanvoer van die stoffen en algen produceert met gebruik van alleen zout water, CO₂ uit de lucht en zonder toevoer van stikstof en fosfaat: een *stand-alone* systeem.

In woestijnen is zoet water schaars, maar meestal is er zout grondwater beschikbaar. Dit biedt de mogelijkheid hier algen te kweken zonder gebruik te maken van zoet water. Ook de aanvoer van CO₂ is in de toekomst mogelijk overbodig. Op dit moment krijgen kweekalgen CO₂ rijk gas toegediend. Onderzoek naar de verbetering van de CO₂ overdracht in kweeksystemen kan in de toekomst leiden tot een efficiënte kweek op CO₂ uit de lucht, wat alom aanwezig is. Tot slot is de grote uitdaging van dit *stand-alone* systeem algenolie te produceren zonder gebruik te maken van stikstof en fosfaat. Die mogelijkheid lijkt reëel, omdat algen weliswaar stikstof en fosfaat bevatten, maar de olie niet. Als er een methode komt die olie kan winnen uit de cellen terwijl deze blijven leven, algen worden dan gemolken, zou de productie van algenolie met alleen zonlicht, CO₂ en zout water theoretisch mogelijk zijn. Momenteel is zo'n *stand-alone* systeem nog niet mogelijk, maar de doelstelling van het onderzoek is zo'n systeem te ontwikkelen.

5. AlgaePARC

Achtergrond

Wageningen UR houdt zich al ruim tien jaar bezig met onderzoek naar de kweek van microalgen en heeft in die periode een stevig kennisfundament gelegd. In het onderzoek is er met name aandacht besteed aan het zo efficiënt mogelijk omzetten van lichtenergie in algenbiomassa in fotobioreactoren. Dit zijn gesloten systemen waarin algen met een hoge mate van controle en optimalisatie gekweekt kunnen worden met (zon)licht als energiebron.

De belangstelling van de industrie voor microalgen was sinds de laatste olie crisis in de jaren 70 beperkt. In 2005 werd aan René Wijffels, hoogleraar bioprocestechnologie, een VICI beurs toegekend door Technologiestichting

STW. Met behulp van deze beurs werd het project 'Photosynthetic Cell Factories' opgezet. Binnen dit project onderzochten Wijffels en zijn team hoe je algenbiomassa zo efficiënt mogelijk kunt produceren. Verder richtte het onderzoek zich op methoden om de kweekomstandigheden zodanig te manipuleren dat de alg commerciële producten, zoals oliën, in overmaat ging aanmaken. Ook richtten onderzoekers zich op bioraffinage methoden om commerciële producten met behoudt van kwaliteit uit de alg te winnen.



Foto 10: Horizontale buisreactor in bedrijf in AlgaePARC (bron Willd Frontiers/Hans Wolkers)

Toen biodiesel enkele jaren geleden steeds meer aandacht kreeg werd de belangstelling vanuit het bedrijfsleven erg groot. Het besef dat de kweek van microalgen niet alleen grote mogelijkheden biedt voor de duurzame productie van biobrandstof, maar ook voor een heel scala van andere nuttige grondstoffen dringt steeds meer door.

De kweek van microalgen is momenteel nog relatief kleinschalig en inefficiënt en er is weinig ervaring met grootschalige, rendabele productie. Daarom gaat Wageningen UR, samen met het (internationale) bedrijfsleven, onderzoek doen naar de optimalisatie van de algenkweek. Hiervoor is een nieuwe testfaciliteit in Wageningen gebouwd, het *Algae Production And Research Centre*, kortweg AlgaePARC.

De faciliteit AlgaePARC is gefinancierd door het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie, de provincie Gelderland en Wageningen UR. Het onderzoek in AlgaePARC is de eerste 5 jaar onderdeel van het programma Biosolar Cells. AlgaePARC is een van de onderdelen van Biosolar Cells met deelname van 18 bedrijven. Hier zullen teams van onderzoekers diverse aspecten van de algenkweek gaan testen, want om algen daadwerkelijk concurrerend te maken voor bulk productie moet er een forse economische en technologische slag gemaakt worden.

Onderzoek in AlgaePARC

De productiekosten van de kweek moeten drastisch omlaag, naar een tiende van het huidige niveau. Het vergroten van de fotosynthese efficiëntie is hiervoor een van de meest belangrijke voorwaarden. Dit is haalbaar door het toepassen van verbeterde reactor ontwerpen en efficiëntere algen. Daarnaast is er een forse besparing op voedingsstoffen mogelijk door gebruik te maken van afval- en reststromen en het recyclen van die nutriënten. Verder kan er fors bespaard worden op energieverbruik door de algensoep minder te mixen en gebruik te maken van energiezuinige pompen. Ook betere oogst- en opwerkingsmethoden (bioraffinage) kunnen fors bijdragen aan het reduceren van kosten, maar ook aan het verbeteren van het eindproduct. Conventionele methoden om bijvoorbeeld olie uit een algencel te winnen zijn namelijk nogal heftig: hoge druk en temperatuur maken de celwand stuk, waardoor de olie binnen handbereik komt. Maar ook de eiwitten gaan zo kapot en daardoor is

rest van de algenbiomassa minder waard. Daarom zijn milde bioraffinage technieken om de algenproducten te winnen noodzakelijk. Tot slot kan ook het verplaatsen van de kweek naar zonniger locaties bijdragen aan een hogere efficiëntie en substantiële kostenverlaging.

AlgaePARC moet een brug slaan tussen kleinschalig laboratoriumonderzoek en grootschalige productie. Wageningen UR doet al jaren laboratorium experimenten met algen. Zo testten onderzoekers bijvoorbeeld de efficiëntie van fotosynthese bij verschillende lichtregimes in verschillende algensoorten. Ook keken ze naar methoden om het vetpercentage van de microalgen te verhogen. Het onderzoeksteam zal resultaten van deze kleinschalige experimenten op grotere schaal in AlgaePARC gaan uittesten. Daarnaast zal het team de vier belangrijkste algenkweeksystemen gaan vergelijken met betrekking tot kosten, kweekefficiëntie en duurzaamheid.



Foto 11: Overzicht AlgaePARC met op de voorgrond de operationele horizontale buisreactor (bron Wild Frontiers/Hans Wolkers)

Een open kweekvijver zal als controle dienen, omdat dit wereldwijd het meest gebruikte productiesysteem is. De onderzoekers gaan gedurende het hele jaar de prestatie van open en gesloten systemen met elkaar vergelijken: bijvoorbeeld enkele lagen horizontaal of verticaal geplaatste transparante

buizen, vlakke platen en een raceway pond. Elk kweekstelsel heeft specifieke voor- en nadelen, maar uiteindelijk gaat het om de maximale productie van hoogwaardige algen tegen een zo laag mogelijke prijs gedurende het hele jaar.

Naast het gebruikte type kweekstelsel is het ook van belang de condities van het kweekproces zodanig te manipuleren dat productie van het gewenste algenproduct, bijvoorbeeld oliën, zo optimaal mogelijk verloopt. Traditioneel laten kwekers de algen groeien tot er voldoende algenbiomassa is verkregen. Vervolgens wordt de hoeveelheid voedingsstoffen verminderd, waardoor de alg stopt met groeien en meer olie gaat produceren. Meestal zijn dit twee processen die kwekers achter elkaar uitvoeren: eerst neemt de biomassa snel toe, daarna hoopt zich in die biomassa heel langzaam vet op. In AlgaePARC is het doel een proces te ontwerpen dat gericht is op de optimale (rendabel en duurzame) productie van bepaalde metabolieten (bijvoorbeeld vet of zetmeel) en niet van biomassa. Om de productiekosten zo laag mogelijk te houden zal hierbij zoveel mogelijk gebruik gemaakt worden van nutriënten verkregen uit reststromen.



Foto 12: Driedimensionale buisreactor bij AlgaePARC (bron Wild Frontiers/Hans Wolkers)

Omdat productie omstandigheden gedurende de dag en het jaar continu veranderen zullen onderzoekers productiestrategieën ontwerpen waarmee door middel van meet- en regeltechniek een constante kwaliteit aan eindproduct verkregen wordt.

De testfaciliteit is slechts een begin van wat op termijn moet uitgroeien tot hét algentestcentrum van Europa. Met name onderzoek en ontwikkeling van methoden die gericht zijn op het maken van specifieke eindproducten zullen de komende jaren verder uitgebreid worden. Niet alleen de ontwikkeling van betere reactoren zal hierbij aandacht krijgen, maar ook het vinden van nieuwe kweekbare algensoorten en het genetisch verbeteren van bestaande algenstammen. Daarnaast zal er ook volop aandacht zijn voor verbeterde bioraffinage methoden en de duurzaamheid van de hele productieketen. Wageningen UR wil in samenwerking met andere kennisinstellingen en de industrie in binnen- en buitenland vernieuwend onderzoek doen aan algenproductietechnologie. Dit kan zowel fundamenteel als toegepast onderzoek zijn. Het is daarnaast belangrijk dat het onderzoek rond algen een inspirerende leeromgeving vormt voor studenten.



Foto 13: Kweken van diverse soorten algen (bron Wild Frontiers/Hans Wolkers)

AlgaePARC is een succes als wij na 5 jaar:

- Een goede vergelijking kunnen maken van verschillende productiesystemen op de volgende parameters: fotosynthetische

efficiëntie, volumetrische productiviteit, energiegebruik, gebruik van nutriënten en water, robuustheid en opschaalbaarheid

- Een fotosynthetische efficiëntie op zonlicht van 5 % bereikt hebben en kunnen handhaven gedurende het gehele jaar op zonlicht in de buitenlucht
- Een verbeterd reactorconcept of/en proces strategie ontwikkeld is waarin de productiekosten en het de energiebehoefte lager zijn dan in de oorspronkelijke systemen
- Voldoende basisinformatie is verkregen om een grootschalige productiefaciliteit te kunnen ontwerpen

Wereldwijd is onderzoek aan algen in opkomst. Bedrijven en overheden investeren veel in algen onderzoeksprogramma's. In de Verenigde Staten zijn er grote projecten op het gebied van genetische modificatie van microalgen, China doet veel onderzoek naar bioinformatica van algen en in Europa worden binnen enkele jaren de eerste demonstratiefaciliteiten gerealiseerd.



Foto 14: Demonstratieplant (6 m³) van Wageningen Universiteit en Neste Oil bij de Universiteit van Huelva in Matalascañas (bron Wageningen Universiteit)

Wageningen UR onderscheidt zich van deze activiteiten door multidisciplinair op een geïntegreerde manier aan de ontwikkeling van deze technologie te werken: verbetering van stammen, ontwikkeling van efficiënte productiemethoden, bioraffinage, ontwikkeling van productieketens en duurzaamheidsaspecten.

6. Conclusies

Algenkweek kan een belangrijke rol vervullen in het verduurzamen van de samenleving. Algen zijn efficiënt te kweken op plaatsen die ongeschikt zijn voor landbouw en waar natuur geen schade ondervindt. Duurzame productie van biodiesel, maar ook van talloze andere producten zoals eiwitten, visvoer, kleurstoffen en bioplastics ligt binnen handbereik. Om algen rendabel te kweken moet de productie-efficiëntie met een factor drie omhoog en de kosten met een factor tien omlaag. Daarnaast moeten naast olie voor biobrandstof ook andere nuttige stoffen, zoals eiwitten, uit de algen worden gewonnen. AlgaePARC gaat een sleutelrol vervullen in de optimalisatie van de algenkweek. Onderzoekers gaan diverse kweeksystemen uittesten en met elkaar vergelijken. Op basis van die resultaten en gegevens uit het laboratorium zal het onderzoeksteam een nieuwe productieketen gaan ontwikkelen voor toepassing op commerciële schaal.

7. Referenties

- Barbosa M.J., Janssen M., Richmond A., Wijffels R.H. (2003) High-cell density cultures: design and operational characteristics of photobioreactors *Recent Research Developments Appl. Microbiol. Biotechnol* 1: 177-195
- Barclay B. (2009) Algae oil production. Keynote lecture at the Algal Biomass Organization 2009 summit, San Diego; October 7-9
- Bosma R., Vermuë M.H., Tramper J., Wijffels R.H. (2010) Towards increased microalgal productivity in photobioreactors. *Int. Sugar J.* 112: 74-85
- Cuaresma M., Janssen M., Vilchez C., Wijffels R.H. (2009) Productivity of *Chlorella sorokiniana* in a Short Light-Path (SLP) Panel Photobioreactor Under High Irradiance. *Biotechnol. Bioeng.* 104: 352-359
- Cuaresma M., Janssen M., Vilchez C., Wijffels R.H. (2011) Horizontal or vertical photobioreactors? How to improve photosynthetic efficiency. *Bioresource Technology* 102: 5129-5137
- Hejazi M.A., Wijffels R.H. (2004) Milking of microalgae. *Trends Biotechnol.* 24: 189-194
- Hu Q., Richmond A. (1996) Productivity and photosynthetic efficiency of *Spirulina platensis* as affected by light intensity, algal density and rate of mixing in a flat plate photobioreactor. *J Appl Phycol* 8:139–145
- Hu, Q., Sommerfeld, M., Jarvis, E., Ghirardi, M., Posewitz, M., Seibert, M. and Darzins, A. 2008, Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances *The Plant Journal* 54, 621–639
- Janssen M., Tramper J., Mur L.R., Wijffels R.H. (2003) Enclosed photobioreactors: light regime, photosynthetic efficiency, scale-up and future prospects. *Biotechnol. Bioeng.* 81: 193 – 210
- Kliphuis A.M.J., Klok A., J., Lamers P.P., Martens D.E., Janssen M., Wijffels R.H. (2011) Metabolic modeling of *Chlamydomonas reinhardtii*: energy requirements for photoautotrophic growth and maintenance. *J. Appl. Phycol.* DOI 10.1007/s10811-011-9674-3

- Lardon L., Hélias A., Sialve B., Steyer J.P., Bernard O. (2009) Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae. *Env. Science & Technol.* 43: 6475-6481
- Lee S.K., Chou H., Ham T.S., Lee T.S., Keasling J.D. (2008) Metabolic engineering of microorganisms for biofuel production: from bugs to synthetic biology to fuels. *Current Opinion Biotechnol.* 19: 556-563
- Melis A. (2009) Solar energy conversion efficiencies in photosynthesis: minimizing the chlorophyll antennae to maximize efficiency. *Plant Science* 177: 272-280
- Norsker N.H., Barbosa M.J., Vermuë M.H., Wijffels R.H. (2011) Microalgal production – a close look at the economics. *Biotechnol. Adv.* 29: 24-27
- Oswald W.J., Golueke C. (1960) The conversion of solar energy with microalgae. *Adv, Appl. Microbiol.* 2: 223-262
- Pulz O., Gross W. (2004) Valuable products from biotechnology of microalgae. *Appl Microb Biotechnol.* 65: 635-648
- Reijnders L. (2007) Do biofuels from microalgae beat biofuels from terrestrial plants? *Trends in Biotechnol.* 26: 349-350
- Schenk, P.M., et al., (2008) Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production. *Bioenergy Research* 1(1): 20-43
- Sheehan J., Dunahay T., Benemann J., Roesler P. (1998) A look back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program – Biodiesel from Algae. Department of Energy
- Tredici M. (2010) Photobiology of microalgae mass cultures: understanding the tools for the next green revolution. *Biofuels* 1: 143-162
- Wijffels, RH and Barbosa MJ. 2010. An Outlook on Microalgal Biofuels. *Science* 13: 796-799
- Wijffels R.H., Janssen M., Barbosa M.J. (2011) Stand-alone biofuel production from algae – Crystal ball 2011. *Microbial Biotechnol.* 4: 132-134
- Wijffels R.H., Barbosa M.J., Eppink M.H.M. (2010) Microalgae for production of bulk chemicals and biofuels. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 4: 287-296

- Zijffers J.W.F., Janssen M., Tramper J., Wijffels R.H. (2008) Design process of an energy efficient photobioreactor. *Marine Biotechnol.* 10: 404-415
- Zijffers J.W.F., Schippers K.J., Zheng K., Janssen M., Wijffels .H. (2010) Maximum photosynthetic yield of green microalgae in photobioreactors. *Mar. Biotechnol.* 12: 708-718

Colofon

Microalgen: het groene goud van de toekomst?

Grootschalige duurzame kweek van microalgen voor de productie van bulkgrondstoffen

Auteurs: Hans Wolkers, Maria Barbosa, Dorinde M.M. Kleinegris, Rouke Bosma, René H. Wijffels

Editor: Paulien Harmsen

Juni 2011

© Wageningen UR Food & Biobased Research

ISBN 978-94-6173-061-9

Druk: Propress, Wageningen

Wageningen UR

Postbus 9101

6700 HB Wageningen

Internet: www.algae.wur.nl; www.AlgaePARC.com

E-mail: info.algae@wur.nl

Zijn er relaties die u met dit boek 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 twaalfde in een reeks publicaties over het gebruik van agrogrondstoffen en nevenstromen in veilige en gezonde producten voor consumenten- en industriële markten.