

Bioplasticproductie uit zuiveringslib vereist marktgedreven procesoptimalisatie voor economisch rendement

Erwin Bluemink, Arjen van Nieuwenhuijzen (Witteveen+Bos), Etteke Wypkema (waterschap Brabantse Delta), Yede van der Kooij (wetterskip Fryslân)

Grondstoffenproductie uit afvalwater- en slibstromen staat bij de Nederlandse waterschappen volop in de belangstelling. Vanuit de Routekaart Afvalwaterketen en de initiatieven van de Grondstoffenfabriek lijkt de productie van bioplastics uit reststromen van het zuiveringsproces een interessante mogelijkheid. Witteveen+Bos onderzocht, in opdracht van de STOWA, de technische en economische haalbaarheid van PHA-productie (polyhydroxyalkanoaat, grondstof voor bioplastic) uit zuiveringslib. Hieruit blijkt dat productie van bioplastic uit slib technologisch en technisch haalbaar is, maar economisch nog niet rendabel blijkt. Kostenreductiemogelijkheden liggen in de procesoptimalisatie van verschillende deelprocessen.

Polyhydroxyalkanoaat is een biologisch afbreekbaar polymeer (lineaire polyester) en wordt door micro-organismen geproduceerd met een koolstofbron als substraat. Tijdens de PHA-productie wordt de koolstofbron (bijvoorbeeld vluchtige vetzuren; VFA's) onder de juiste condities en door middel van verschillende tussenstappen aan elkaar gekoppeld tot een biopolymeer. Deze PHA's worden vervolgens opgeslagen in intracellulaire compartimenten. Het type koolstofbron dat wordt gebruikt voor de PHA-productie heeft invloed op het type biopolymeer dat uiteindelijk gevormd wordt.

Het biopolymeer PHA is een grondstof voor bioplastic, waarbij dit plastic zowel *biobased* als biologisch afbreekbaar is. *Biobased* wil zeggen dat het product vervaardigd wordt uit hernieuwbare bronnen. De biologische afbreekbaarheid van PHA is ook van toepassing onder mildere, niet-composteringsomstandigheden, zoals in thuis-compostering, in de bodem en in water.

De Europese bioplasticmarkt groeit met ongeveer 20 % per jaar [1]. De drijfveren voor deze groei zijn onder andere: kostenreductie, duurzaamheid en innovatie. Met andere woorden, de gunstige kostenontwikkeling, de groeiende vraag naar duurzame oplossingen en de ontwikkeling van steeds weer nieuwe materialen is een stimulans voor de gehele bioplasticmarkt. Voor PHA wordt ook een forse toename in de wereldproductie verwacht. De toepassingsmogelijkheden van PHA als bioplastic bevinden zich in onder andere de volgende marktsegmenten:

- consumentenproducten (van toetsenbord tot dashboard);
- farmaceutische & medische producten (van medicijncapsule tot handschoen);
- land- en tuinbouw (van plantenpot tot bevestigingsclips voor tomaten);
- catering (van bestek tot bekers);
- verpakkingsmaterialen (van bakjes tot folies).

PHA-productieprocessen

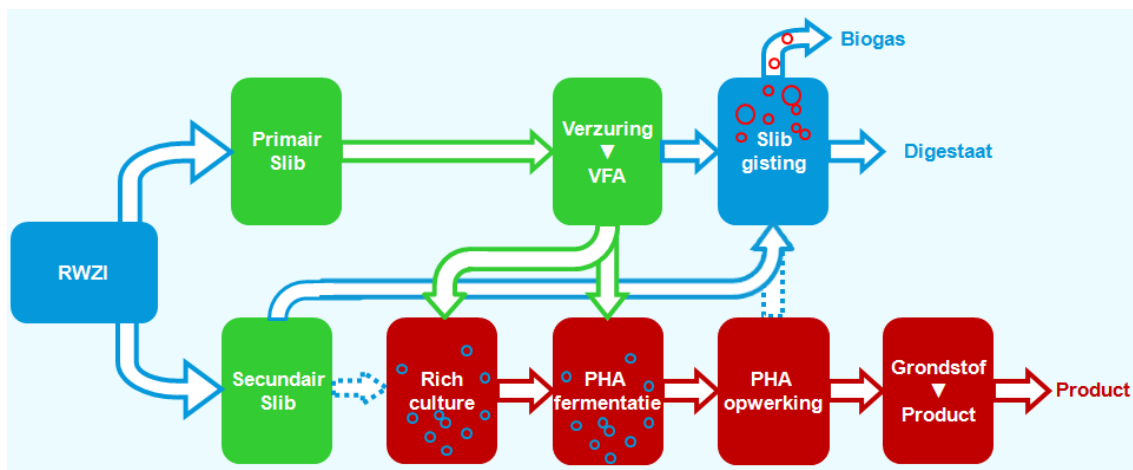
Op dit moment wordt PHA geproduceerd onder steriele omstandigheden met een specifieke bacteriecultuur. De koolstofbronnen die hierbij worden ingezet zijn voedselgerelateerde substraten, zoals glucose, zetmeel of plantaardige olie afkomstig van mais, aardappelen, tarwe, etc. PHA-productie uit organische reststromen zoals zuiveringsslib vormt het cradle2cradle-alternatief voor de conventionele PHA-productieroute. Het alternatief vervangt de voedselgerelateerde koolstofbron door een restproduct, behoeft geen steriele procesvoering en is om deze redenen duurzamer en mogelijk goedkoper na doorgevoerde procesoptimalisatie. Reden genoeg voor een verkennende studie naar twee alternatieve productieroutes, met zuiveringsslib als grondstof. Het betreft de volgende routes:

- de 'rich culture' route; met deze naam wordt de route aangeduid waarbij een verrijkte bacteriecultuur wordt ingezet waarvan nagenoeg alle organismen in staat zijn om PHA op te slaan. De biomassa bestaat uit meerdere bacteriesoorten, anders dan bij het conventionele PHA-productieproces waar slechts één geselecteerde bacteriesoort wordt gebruikt. De *rich culture* wordt verkregen en in stand gehouden door continue selectie (de wisseling van aan- en afwezigheid van een koolstofbron). De continue selectiedruk zorgt ervoor dat de overlevingskans van PHA-accumulerende micro-organismen groter is in vergelijking met niet-PHA-accumulerende micro-organismen. Door de continue selectiedruk is geen steriele procesvoering noodzakelijk, maar blijft de cultuur toch bestaan uit voornamelijk PHA-accumulerende micro-organismen. Zie voor een schematisch overzicht afbeelding 1;
- de 'mixed culture' route; met deze naam wordt de route aangeduid waarbij een bacteriecultuur wordt ingezet waarvan een deel van de micro-organismen in staat is om PHA op te slaan. Secundair zuiveringsslib, afkomstig van een communale rioolwaterzuiveringsinstallatie (rwzi), is een voorbeeld van een *mixed culture* (het is locatieafhankelijk of het slib geschikt is om direct ingezet te worden voor PHA-productie). Zie afbeelding 2 voor een schematisch overzicht.

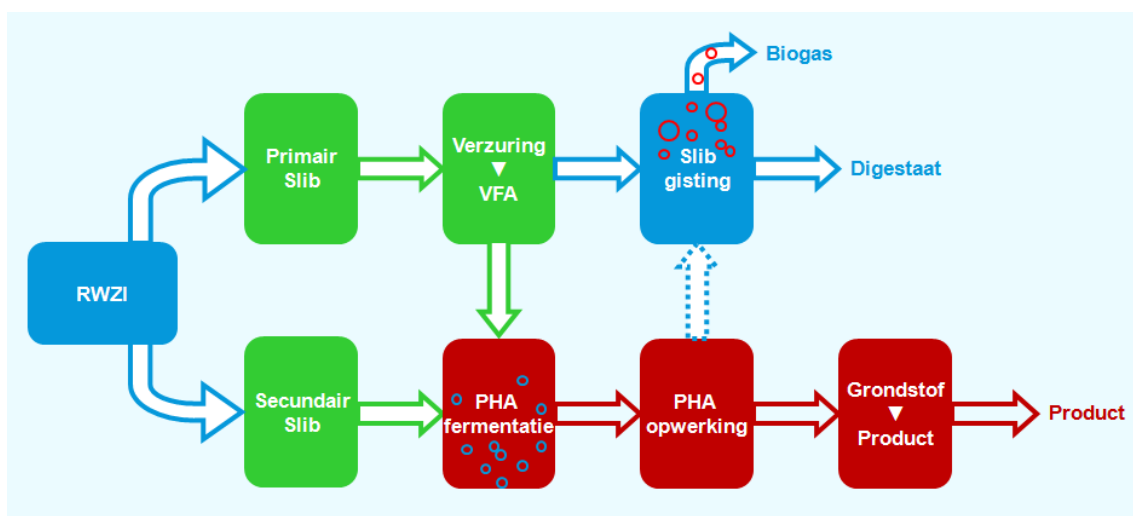
Het volledige PHA-productieproces uit zuiveringsslib bestaat uit de volgende stappen:

1. VFA-productie: primair slib, afkomstig van de rwzi, wordt voor een deel omgezet in VFA's via een verzuringstap (vier dagen, anaerobe condities, $\pm 25^{\circ}\text{C}$);
2. Biomassa:
 - *rich culture* route: secundair slib wordt éénmalig ingezet als startcultuur, waarna biomassa wordt geproduceerd onder continue selectiedruk met een deel van de verkregen VFA's als koolstofbron (0,5 dagen, aerobe condities, $\pm 30^{\circ}\text{C}$). Verder wordt het secundaire slib vergist;
 - *mixed culture* route: secundair slib wordt deels en batchgewijs verpompt in een PHA-fermentatietank, het overige deel van het secundaire slib wordt vergist;
3. Fasescheiding en dosering VFA's: na de omzetting tot VFA's vindt fasescheiding plaats (dikdunscheiding door middel van een decanter) en wordt de met VFA's verrijkte dunne fractie toegediend als koolstofbron aan de in stap 2 verkregen biomassa.

4. PHA-fermentatie: de aan de biomassa toegediende koolstofbron wordt binnen maximaal 24 uur opgeslagen als PHA (één dag, aerob, ± 30°C);
5. Vergisting residustromen: de vaste fractie uit de VFA-productie wordt naar de vergisting verpompt voor verdere verwerking tot digestaat en biogas;
6. Scheiding en indikking PHA-biomassa: biomassa rijk aan PHA wordt gescheiden van de waterfractie door middel van een decanter;
7. Opwerking van PHA: de cellen, rijk aan PHA, worden verder behandeld. Op hoofdlijnen zijn er twee behandelingsstrategieën namelijk, het oplosbaar maken van PHA uit de granulen (solvent extractie) of het oplosbaar maken van cel materiaal (celdisruptie). In de verkennende studie is uitgegaan van een celdisruptietechniek, waarbij zout, natronloog en ethanol ingezet worden als hulpstoffen;
8. Productie bioplastic: PHA wordt als grondstof voor bioplastic verwerkt tot eindproduct door spuitgieten of een andere vormgevingstechniek.



Afbeelding 1. Schematische weergaven van rich culture route



Afbeelding 2. Schematische weergaven van mixed culture route

Pilot-onderzoek

Waterschap Brabantse Delta heeft in een praktijkonderzoek in samenwerking met verschillende onderzoeksinstituten aan kunnen tonen dat in ieder geval één van de rwzi's geschikt is voor PHA-productie via de *mixed culture* route. De ambitie van waterschap Brabantse Delta is het opzetten van een pilot-onderzoek waarbij verschillende partijen vanuit de hele keten betrokken worden om de marktpotentie verder te ontwikkelen. Wetterskip Fryslân heeft onlangs faciliteiten en onderzoeksgeld beschikbaar gesteld bij de rwzi Leeuwarden voor een pilot-installatie die bioplastic uit afvalwater produceert; de technologieleverancier is hier het Zweedse bedrijf Anoxkaldnes. Bij Mars in Veghel wordt ook onderzoek verricht naar PHA-productie uit afvalwater; hier levert Pacques de technologie. Kortom, technologisch en technisch is de productie van PHA uit zuiverings-slib haalbaar.

Uitkomst van de verkennende studie

In de STOWA-verkenning [2] is een ontwerp en een businesscase uitgewerkt voor de *rich culture* en de *mixed culture* route. Dit is gedaan voor een referentiesituatie, een groeneweide-situatie op een rwzi-terrein en voor de situatie met bestaande slibverwerkingsroute met slibgisting.

- **De referentievariant:** Als referentie is de nieuwbouw van een slibverwerkingsroute met slibvergisting gehanteerd, die de volledige slibstroom omzet in biogas en ontwaterd slib.
- **De groene-weidevariant:** hierbij is uitgegaan van volledige nieuwbouw van de PHA-productiefaciliteit en nieuwbouw van de bijbehorende sliblijn die het resterende organisch materiaal omzet tot biogas en ontwaterd slib. Het verschil in jaarlijkse kosten tussen het PHA-productieproces en het referentieproces is gedeeld door het aantal geproduceerde kilogrammen PHA. Dit levert de indicatieve kostendekkende verkoopprijs van PHA op in EUR/kg PHA;
- **De combinatie-variant:** hierbij is uitgegaan van volledige nieuwbouw van de PHA-productiefaciliteit waarbij de bestaande slibverwerking met gisting intact wordt gelaten. Omdat minder slib naar de bestaande slibvergisting wordt gevoerd in het geval van PHA-productie op de rwzi, kan overcapaciteit van de bestaande slibvergisting ontstaan.

Door beide PHA-varianten te vergelijken met de referentiesituatie, is de indicatieve kostendekkende kostprijs berekend per kilogram PHA. Hierbij is onderscheid gemaakt in ruw product (PHA-verrijkte biomassa zonder nabehandeling) en puur PHA-product (PHA is uit de cellen geïsoleerd en klaar voor verwerking tot bioplastic).

De PHA-opwerkingsstap (het verkrijgen van puur PHA) zoals hierboven is omschreven, is één van de mogelijkheden. Op dit moment worden de PHA-opwerkingstechnieken geoptimaliseerd; de kostenraming voor deze processtap is hierdoor relatief onzeker. Om die reden is ook de

indicatieve kostendeekkende PHA-verkoop prijs zonder PHA-opwerking weergegeven. Dit is dus de indicatieve kostendeekkende verkoopprijs voor het ruwe materiaal (PHA in de cellen).

De uitkomsten van de businesscase zijn weergegeven in tabel 1. Uit deze tabel is op te maken dat de indicatieve kostendeekkende verkoopprijs voor PHA uit zuiveringsslib ligt tussen de EUR 1,25 en 16,50 per kilogram PHA. Om een vergelijking te maken met de huidige marktprijs van PHA (gebaseerd op PHA geproduceerd met een monocultuur, onder steriele omstandigheden), van EUR 4,-- tot 5,-- per kilogram PHA, moet gekeken worden naar de indicatieve kostendeekkende verkoopprijs van het pure product (inclusief PHA-opwerking). De indicatieve kostendeekkende verkoopprijs van het pure product ligt voor deze case tussen de EUR 4,-- en 16,50. Daarnaast moet vermeld worden dat, op basis van marktverkenningen vanuit bioplastische producenten, blijkt dat de gewenste marktprijs circa EUR 3,-- per kg PHA bedraagt.

Tabel 1 *Indicatieve kostendeekkende verkoopprijs PHA*

Huidige marktprijs PHA	EUR/kg	4,-- tot 5,--
Gewenste marktprijs PHA	EUR/kg	3,--
Indicatieve kostendeekkende verkoopprijs zonder PHA-opwerking (ruw product):		
	Rich culture (EUR/kg)	Mixed culture (EUR/kg)
Groene weide	3,-- tot 9,--	1,25 tot 3,75
Combinatie met bestaande slibverwerking	4,5 tot 13,5	2,7 tot 8,1
Indicatieve kostendeekkende verkoopprijs met PHA-opwerking (puur product):		
	Rich culture (EUR/kg)	Mixed culture (EUR/kg)
Groene weide	4,-- tot 12,--	3,-- tot 9,--
Combinatie met bestaande slibverwerking	5,5 tot 16,5	4,25 tot 12,75

De groeneweidevariant is goedkoper dan de variant met de bestaande slibgisting. Dit is te verklaren doordat de slibverwerking in de groeneweidevariant kleiner gedimensioneerd is in vergelijking met het referentieproces, omdat een deel van het slib ingezet wordt voor PHA-productie. De bestaande slibgisting heeft na de invoering van PHA-productie overcapaciteit, dit brengt meer kapitaallasten en daarmee meer kosten met zich mee in vergelijking met de groeneweidevariant en ten opzichte van het referentieproces. In de praktijk zal gekeken moeten worden naar de lokale situatie en de bijbehorende afschrijving van de installatie. Dit kan een positiever beeld geven. Ook is de overcapaciteit van de slibgisting in deze studie niet gewaardeerd. Door lucratieve co-vergisting van slib en reststromen toe te passen kan financiële optimalisatie plaatsvinden.

Optimalisatiekansen

De kansen voor procesoptimalisatie van PHA-productie uit zuiveringsslib ter reductie van de berekende indicatieve kostendeekkende verkoopprijs zijn hieronder puntsgewijs toegelicht:

- Specifieke opbrengst verhogen van de VFA-productie (kg VFA/kg VSS)
 - Hierdoor wordt extra koolstofbron verkregen, waardoor kapitaallasten zullen dalen en er meer product wordt geproduceerd. Deze baten moeten opwegen tegen de extra kosten van de benodigde methode om de VFA-opbrengst te verhogen. Eén van de mogelijkheden is pH-regulering.
- Inkopen van geconcentreerde koolstofbron
 - Door samenwerking met andere ketenpartners kunnen geconcentreerde vetzuurstromen worden geleverd tegen lagere kosten dan de VFA-productiekosten uit primair slib.
- Specifieke PHA-opslagcapaciteit verhogen (kg PHA/kg droge stof (DS))
 - Hierdoor wordt extra PHA verkregen zonder dat het reactorvolume vergroot hoeft te worden. De mogelijkheden van procesoptimalisatie liggen in het toepassen van nutriëntenlimitatie (fosfaatlimitatie door stuvietvorming is hier een voorbeeld van). Ook hiervoor geldt dat de baten moeten opwegen tegen de extra kosten van de benodigde techniek.
- Biomassa-/slibconcentratie verhogen
 - De VFA-productie vindt plaats bij 4% DS, omdat gekozen is voor een gravitaire indikstap. Wanneer een mechanische indikstap wordt toegepast, kunnen hogere DS-gehalten (4-10% DS) gehaald worden en ontstaat er tevens een hoger geconcentreerde VFA-stroom. Dit betekent dat er minder reactorvolume gebouwd hoeft te worden, wat resulteert in lagere kapitaallasten en daarmee in een goedkoper product. De kanttekening hierbij is dat bij een gelijke ontwateringsprestatie, er evenveel water dat rijk is aan VFA met het slib wordt afgevoerd. Een hogere concentratie VFA's resulteert hierdoor in een groter VFA-verlies.
 - Ook de biomassaconcentratie in de slibcultuurtanks (*rich culture* route) en/of in de PHA-productietank (*rich* en *mixed culture* route) kunnen mogelijk worden verhoogd ter verlaging van de kapitaallasten. Hierbij dient wel rekening gehouden te worden met voldoende zuurstofoverdracht. Met andere woorden, de zuurstofoverdracht bepaalt de maximale biomassaconcentratie.
- Bioraffinage
 - Hierbij wordt niet alleen PHA uit de cellen geëxtraheerd maar ook overige nuttige producten zoals lipiden, nutriënten en energie. De opbrengsten van deze producten kunnen kostprijsverlagend werken voor PHA. Hierbij is de keuze van PHA-opwerkingstechniek cruciaal.

Visie op vervolgonderzoek

De verkennende studie naar bioplasticproductie uit zuiverings-slib is het resultaat van een technologiegedreven aanpak. Dat wil zeggen: er is in kaart gebracht welke technieken potentieel interessant zijn en vervolgens is de economische haalbaarheid berekend. De indicatieve kostendekkende verkoopprijs is vergeleken met de gewenste marktprijs. Hierbij is bijvoorbeeld

de relatie tussen kwaliteit, functionaliteit en de reële marktprijs buiten beschouwing gelaten. Dit aspect vergt nadere verdieping buiten de scope van deze verkenning.

In de toekomst is meer onderzoek nodig, idealiter met het concept '*backward integration*' als uitgangspunt, waarbij het productieproces wordt gedefinieerd door de eisen van de eindgebruiker (de bioplasticproducent en uiteindelijk de consument). Op deze manier is het mogelijk een eindproduct te produceren van de juiste kwaliteit voor de beoogde toepassing en de daarbij behorende grondstofprijs (verkoopprijs voor PHA). Deze optimale situatie kan worden bereikt wanneer de hele keten betrokken is, van eindgebruiker tot grondstofleverancier. Daarnaast kan het PHA-productieproces worden geoptimaliseerd, waarbij het maximaliseren van de VFA-productie, intracellulaire PHA-opslag en het selecteren van een geschikte PHA-opwerkingsmethode het meest noodzakelijk worden geacht.

Nader onderzoek is dus gewenst en kan qua tijdsplanning globaal gekoppeld worden aan de perioden zoals die zijn gepresenteerd in het visiedocument Routekaart Afvalwaterketen tot 2030 [3], namelijk:

- De periode van 2012 tot 2015 wordt gekenmerkt door onderzoek en kennisopbouw over bioplastics. Het gaat hierbij om inzichten in sterke en zwakke punten met betrekking tot inputstromen, technieken en output stromen.
- In de periode van 2015 tot 2020 staat het experimenteren met bioplastic-productie tot aan het opstarten van een demonstratie-installatie centraal.
- Het inrichten van een full-scale productie zou plaats kunnen vinden in de periode van 2020 tot 2030 indien uit het onderzoek met de demonstratie-installatie blijkt dat economisch rendabele en/of duurzame bioplasticproductie mogelijk is.

Het is hierbij wenselijk om ook marktgedreven onderzoek uit te voeren, waarbij:

- de wensen van eindgebruikers in kaart worden gebracht, specifiek voor bepaalde toepassingen;
- het PHA-productieproces via *backward integration* wordt opgezet en geoptimaliseerd, gelet op de gewenste kwaliteit van het product.

Dit laatste betekent dat de processen PHA-opwerking, PHA-productie (micro-organismen/procesvoering) en de afval(water)stroom achtereenvolgens moeten worden geselecteerd aan de hand van vooraf opgestelde (kwaliteits)eisen. Aanbevolen wordt om een duurzaamheidsanalyse (LCA, LevensCyclus Analyse) uit te voeren, waarbij het PHA-productieproces op duurzaamheidsaspecten wordt vergeleken met het slibgistingproces.

Conclusie

In het rapport "*Bioplastic uit slib, verkenning naar PHA-productie uitzuiveringsslib*" wordt geconcludeerd dat PHA-productie uit zuiveringsslib technologisch en technisch haalbaar is. Dit wordt bevestigd door pilot-studies die zijn uitgevoerd. Echter de economische haalbaarheid van de in dit rapport behandelde productieprocessen is nog kritisch. Procesoptimalisaties zijn mogelijk om de kostprijs te verlagen. Daarvoor is nader (demonstratie)onderzoek nodig. Samenwerking tussen ketenpartners (bijvoorbeeld waterschappen en de industrie) verhoogt

hierbij de slagingskans. Tijdens vervolgonderzoek wordt bij voorkeur rekening gehouden met de producteisen van de eindgebruiker als uitgangspunt. Op deze wijze kan de relatie tussen kwaliteit, functionaliteit en de reële marktprijs beter worden beschouwd.

Literatuur

1. European Bioplastics; Institute for Bioplastics and Biocomposites, Juni 2013, verkregen via: <http://en.european-bioplastics.org/market/market-development/market-drivers/>, geopend in 2013.
2. STOWA-rapport Bioplastic uit slib, verkenning naar PHA-productie uitzuiveringsslib, 2014-10, ISBN: 978.90.5773.649.0.
3. 'Visiebrochure: Afvalwaterketen tot 2030', Routekaart Afvalwaterketen, 2012.