

Financieel-economische aspecten van Biobrandstofproductie

Deskstopstudie naar de invloed van co-productie van bio-based producten op de financiële haalbaarheid van biobrandstoffen

R.Bakker, H. den Uil (Energieonderzoeks Centrum Nederland), R. v Ree, et al.

Studie uitgevoerd onder begeleiding van: C.Mijnders (LNV), H.Wardenaar (Verkeer en Waterstaat), M.Botman (Economische Zaken), D. Peters (VROM), en G.J. Boerhave (Agentschap NL).

Rapport nr.1175

Colofon

Titel	Financieel-economische aspecten van biobrandstofproductie
Auteur(s)	R.Bakker, H. den Uil, R.v. Ree, et al.
Nummer	Food & Biobased Research 1175
ISBN-nummer	ISBN nummer
Publicatiedatum	1.10.2010
Vertrouwelijk	Ja, tot 1.01.2011

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

© Wageningen UR Food & Biobased Research, instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, hetzij mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. De uitgever aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele fouten of onvolkomenheden.

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

Samenvatting

De productiekosten van conventionele en geavanceerde biotransportbrandstoffen zijn te hoog om zonder overheidsstimulering een eigen plaats in de markt te verwerven. Een potentiële oplossing is om via een zogenaamde “Energy-driven Biorefinery” aanpak, co-productie van biobrandstoffen tezamen met “value-added” Bio-based Producten (chemicaliën, materialen) te bewerkstelligen. Door uitvoering van een deskstop studie heeft WUR, in samenwerking met ECN, onderzocht of co-productie van biobrandstoffen en Bio-based Producten leidt tot meer marktcompetitieve biobrandstofproductie. De centrale vraagstelling van de studie was of aangetoond kan worden dat “co-productie” resulteert in realisatie van meer marktcompetitieve waardeketens voor grootschalige en duurzame inzet van biomassa in de Biobased Economy. De studie naar de financiële haalbaarheid van een twaalftal biobrandstofketens laten zien dat co-productie van biobrandstoffen tezamen met Bio-based Producten een goede methode is om additionele waarde toe te kennen aan de totale biomassa-product-keten. De productiekosten van biobrandstoffen kunnen gemiddeld met 30% verlaagd worden ten opzichte van het scenario waarin geen co-productie van hoogwaardige producten plaatsvindt. Co-productie van hoogwaardige Bio-based Producten resulteert dus in lagere productiekosten en creëert derhalve een verbeterde marktpositie en een zo mogelijk versnelde marktimplementatie voor de geavanceerde biotransportbrandstoffen. De co-producten die tezamen met biobrandstoffen geproduceerd kunnen worden zijn zeer divers en lopen uiteen van was, BTX en ethyleen uit thermo-chemische biobrandstofketens, tot fenolvervangers, platformchemicaliën en hoogwaardige eiwitten uit bio-chemische biobrandstofproductieketen. In het algemeen bestaat er voor deze co-producten een omvangrijke afzetmarkt, en gaat het om producten die op dit moment grotendeels uit aardolie vervaardigd worden. Technologieën voor productie en toepassing van hoogwaardige co-producten die naast biobrandstoffen uit biomassa geproduceerd kunnen worden bevinden zich in verschillende stadia van ontwikkeling. Voor een aantal van de co-producten is de technologie voor handen, of kan die naar verwachting relatief snel op grote schaal geïmplementeerd worden. Voor andere co-producten is de technologie voor productie en gebruik nog in ontwikkeling. De marktperspectieven zijn echter voor de meeste co-producten zeer goed te noemen. Gezien het positieve effect dat productie van hoogwaardige co-producten kan hebben op de marktcompetitiviteit van geavanceerde biobrandstoffen, verdient de aanbeveling om bij invoer van nieuwe stimuleringsmaatregelen op de korte termijn ook aandacht te besteden aan het opwaarderen van procesresiduen. Op de langere termijn zou een stimuleringskader gerealiseerd moeten worden waarbij de inzet van biomassa voor de productie van Bio-based Producten gelijkwaardig is aan die voor Bioenergie (inclusief transportbrandstoffen) om zodoende een “level playing field” te creëren voor implementatie van biomassa in de diverse marktsectoren van de toekomstige Biobased Economy.

Inhoudsopgave

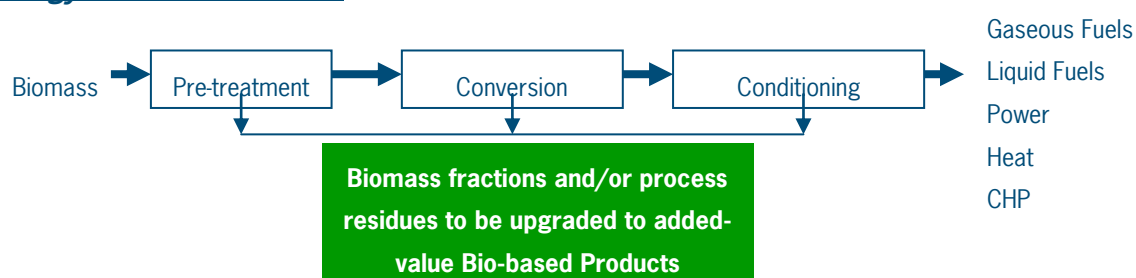
Samenvatting	3
1 Inleiding	5
2 Methoden	6
2.1 Referentiekader	6
2.2 Geavanceerde biobrandstofketens	6
3 Resultaten	10
3.1 Kosten van fossiele transportbrandstoffen	10
3.2 Kosten van 1 ^e generatie biotransportbrandstoffen (grondstoffen in competitie met voedselproductie)	10
3.3 Beschrijving van geavanceerde biobrandstofproductieketens, en vergelijking van productiekosten met marktprijzen van fossiele transportbrandstoffen	12
3.3.1 Fischer-Tropsch diesel uit lignocellulose biomassa	12
3.3.2 Mixed alcohol uit lignocellulose biomassa	13
3.3.3 Methanol uit lignocellulose biomassa	15
3.3.4 Synthetic natural gas (SNG) uit lignocellulose biomassa	16
3.3.5 Bioethanol uit lignocellulose biomassa	18
3.3.6 Biobutanol uit lignocellulose biomassa	19
3.3.7 Bioethanol uit agro-reststromen	21
3.3.8 Biowaterstof uit agro-reststromen	23
3.3.9 Biodiesel uit afvalvetten en –oliën	25
3.3.10 Biodiesel uit ruwe plantaardige oliën	27
3.3.11 Biodiesel uit micro-algen	28
3.3.12 Bioethanol uit macro-algen/zeewier	30
3.4 Vergelijking geavanceerde biobrandstoffen met eerste generatie biobrandstoffen	32
4 Conclusies en Aanbevelingen	35
Bronnen	39
Bijlage(n)	40

1 Inleiding

De productiekosten van conventionele en geavanceerde biotransportbrandstoffen zijn te hoog om zonder overheidsstimulering een eigen plaats in de markt te verwerven. Een potentiële oplossing is om via een zogenaamde “Energy-driven Biorefinery” aanpak, co-productie van biobrandstoffen tezamen met “value-added” Bio-based Producten (chemicaliën, materialen) te bewerkstelligen (zie Figuur 1). Dit kan enerzijds door opwaardering van huidige biotransportbrandstof productieketens middels valorisatie van procesresiduen op korte- en middellange termijn, anderzijds door ontwikkeling van volledig nieuwe biomassa waarde-ketens voor implementatie op de langere termijn.

Door uitvoering van een deskstop studie heeft WUR, in samenwerking met ECN, onderzocht of co-productie van biobrandstoffen en Bio-based Producten leidt tot meer marktcompetitieve biobrandstofproductie. De centrale vraagstelling van deze studie was of aangetoond kan worden dat “co-productie” resulteert in realisatie van meer marktcompetitieve waardeketens voor grootschalige en duurzame inzet van biomassa in de Biobased Economy. Hiertoe is in de studie de financieel-economische haalbaarheid van een aantal geavanceerde biobrandstofketens onderzocht. In elke biobrandstofketen is geanalyseerd welk effect het produceren van hoogwaardige co-producten heeft op de brutokosten (zonder b.t.w., accijns of andere heffingen) van de geproduceerde biobrandstoffen. Tevens zijn, ter kaderstelling, de kosten van fossiele diesel en benzine in kaart gebracht en is er berekend bij welke ruwe olieprijs de geproduceerde biobrandstoffen met fossiele brandstoffen kunnen concurreren. Ook zijn de kosten van geavanceerde biobrandstofproductie vergeleken met productiekosten van huidige, 1^e generatie biobrandstoffen (1^e generatie: grondstoffen die ook worden ingezet in voedselproductie).

Energy-driven Biorefineries



Figuur 1. De Energy-driven Biorefinery: biomassa fracties en/of procesresiduen worden opgewaardeerd naar value-added Bio-based Producten

2 Methoden

2.1 Referentiekader

Als referentiekader voor het vergelijken van productiekosten van geavanceerde biobrandstoffen zijn enerzijds de uit ruwe olie geproduceerde transportbrandstoffen benzine en diesel genomen, anderzijds de conventionele biobrandstoffen bioethanol uit suikerriet en biodiesel uit koolzaad. Aangezien de kosten transportbrandstoffen zeer afhankelijk zijn van de kosten van de daarvoor ingezette grondstoffen (ruwe olie bij fossiele brandstoffen, of biomassa bij biobrandstoffen), zijn de kosten voor brandstoffen bepaald als functie van de grondstofprijs. Om vergelijkingen tussen verschillende typen brandstoffen op prijs mogelijk te maken, zijn alle marktprijzen omgerekend in € per GJ energie, op basis van de energieinhoud van de verschillende brandstoffen.

Voor de kostenberekening van benzine en diesel zijn marktprijzen van benzine en diesel in Nederland^a zonder heffingen of belastingen genomen, zoals deze gepubliceerd zijn door Eurostat in de periode 2002 – 2008. Deze “kale” marktprijzen zijn afgezet tegen de ruwe olieprijs zoals deze gepubliceerd is door de OPEC^b in diezelfde periode. Voor de marktprijs van conventionele, 1^e generatie biotransportbrandstoffen biomassa grondstoffen zijn marktprijzen van bioethanol uit Brazilië, en biodiesel. Hiervoor zijn respectievelijk de prijzen van gedehydrateerde ethanol in Sao Paulo “ex-distillery”, en “Biodiesel Producer Price” in Duitsland, in de periode 2006 – 2009 genoteerd uit het World Ethanol & Biofuels Report dat wordt gepubliceerd door F.O. Licht in het World Ethanol and Biofuels Newsletter.

2.2 Geavanceerde biobrandstofketens

De productiekosten van geavanceerde biobrandstoffen zijn geschat voor een twaalfstal biomassawaardeketens, op basis van bestaande business cases, studies en eigen inzichten. Bij de berekeningen is uitgegaan van technologie die volledig gecommmercialiseerd is. Tevens is aangenomen dat productie van biobrandstoffen zonder subsidiëring of andere financiële ondersteuning plaats vindt.

Bij de berekeningen is de volgende methodologie gevolgd:

- Voor elke biomassawaardeketen (Tabel 1) is eerst een analyse gemaakt welke hoogwaardige co-producten geproduceerd kunnen worden. In verreweg de meeste gevallen gaat het hier om producten die op dit moment uit aardolie vervaardigd worden. Tevens is weergegeven

^a http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/data/main_tables

^b <http://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=WTOTOPEC&f=W>

waarvoor het hoogwaardige product kan worden ingezet, en wat de huidige marktomvang van het desbetreffende product voor zover gegevens daarover bekend zijn

- Vervolgens zijn voor elke keten twee eenvoudige processchema's opgesteld. In het eerste schema, m.a.w. de "base case", worden alleen biobrandstoffen geproduceerd uit biomassa en worden procesresiduen in andere energiedragers (bijv. electriciteit, warmte) omgezet. In het tweede processchema, de "biorefinery case" worden naast biobrandstoffen ook hoogwaardige producten geproduceerd uit de biomassa grondstof.
- Op basis van de processchema's zijn de vaste en operationele kosten berekend voor elke biobrandstofketen, en de kosten en opbrengsten van de geproduceerde hoogwaardige producten geschat. Vervolgens zijn per keten de netto productiekosten van de geavanceerde biobrandstof berekend, voor zowel de "base case" (alleen biobrandstof) als de "biorefinery case" (co-productie biobrandstof en producten). De netto productiekosten staan gelijk aan de bruto productiekosten van de biobrandstof minus de nette opbrengst van de hoogwaardige producten.
- De geschatte netto productiekosten van de biobrandstofketens zijn grafisch weergegeven, als functie van de grondstofprijs (biomassa). Om een vergelijking met de marktprijzen van fossiele transportbrandstoffen (zie ook par. 2.1) te maken, zijn ook de marktkosten van benzine of diesel, als functie van de ruwe olieprijs, in de grafiek weergegeven. Op basis van deze grafiek kan bepaald worden voor zowel de "base case" als "biorefinery case" bij welke olieprijs de desbetreffende biobrandstof keten kan concurreren met ruwe aardolie.

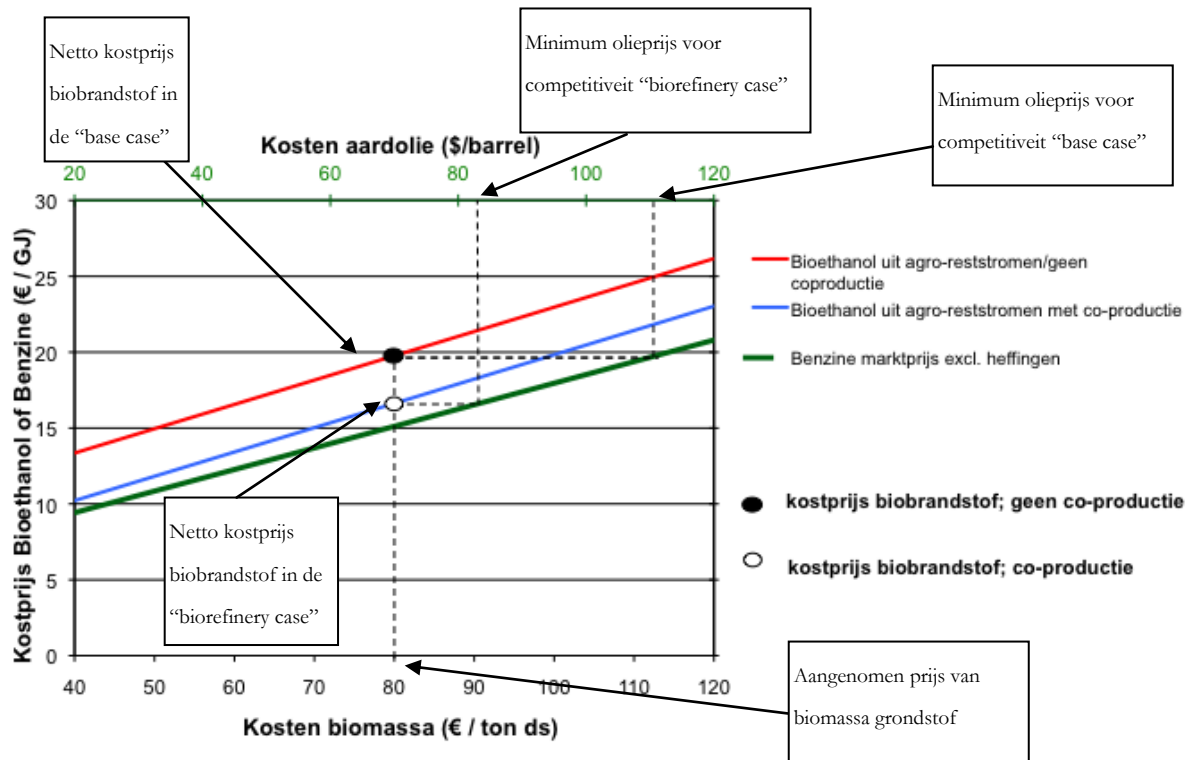
Een voorbeeld van een dergelijke grafiek is weergegeven in Figuur 2. In de grafiek is te zien dat bij een aangenomen biomassa prijs van 80 €/ton (weergegeven op de onderste x-as), de kostprijs van bioethanol in de "base case" (rode lijn) geschat wordt op 20 €/GJ. Bij de "biorefinery case" (blauwe lijn) worden de productiekosten na invoering van co-productie (blauwe lijn) verlaagd naar 16 €/GJ bij eenzelfde biomassa prijs, m.a.w. een verlaging van 20%. Hiermee komt de prijs dicht in de buurt van de kale marktprijs van benzine (groene lijn). De grafiek geeft tevens weer dat bij een ruwe olieprijs van ca. 110 \$/vat of hoger (weergegeven op de bovenste x-as), bioethanol zou moeten kunnen concurreren met benzine. In de "biorefinery" case kan bioethanol al bij een lagere ruwe olieprijs (vanaf ca. 83 \$/vat) concurreren. De grafiek geeft daarmee aan dat geavanceerde biobrandstofproductie eerder (m.a.w. bij een lagere olieprijs) met benzine kan concurreren, indien biobrandstofproductie gecombineerd wordt met productie van hoogwaardige materialen of producten.

Tabel 1. Overzicht van geanalyseerde biobrandstof-coproductie ketens, met toepassingsmogelijkheden voor het co-product

Biomassa waardeketen	Toepassingen co-product
<i>Thermochemische productieketens</i>	
Fischer-Tropsch diesel + was	Smeermiddelen, coatings
Mixed Alcohol + alcoholen	Oplosmiddel, basis chemical
Methanol + BTX, ethyleen	Polymeren, basis chemical
Synthetic Natural Gas + CO ₂	Industrieel gebruik CO ₂
<i>Biochemische productie ketens</i>	
Bioethanol + lignine chemicalien	Phenolharsen, lijmen, polymeren
Biobutanol + butanol, lignine chemicaliën	Phenolharsen, lijmen, polymeren, gebruik CO ₂
Bioethanol + eiwitten (agroreststromen)	Hoogwaardige eiwitten (food, feed), gebruik CO ₂
Biowaterstof + waterstof, veevoer	Industrieel gebruik H ₂ , CO ₂
<i>Andere ketens</i>	
Afvalvetten: biodiesel + chemicaliën*	Epoxyharsen, textiel, papier
Ruwe koolzaadolie: biodiesel + chemicalien*	Epoxyharsen, textiel, papier
Microalgen: biodiesel + chemicaliën**, eiwitten	Coatings, hoogwaardige eiwitten
Zeewier: ethanol + alginaten	Dehydratatie, farmacieg, gels, etc.

* epichloorhydrine (EPI) uit glycerine

** op lipiden gebaseerde chemicaliën

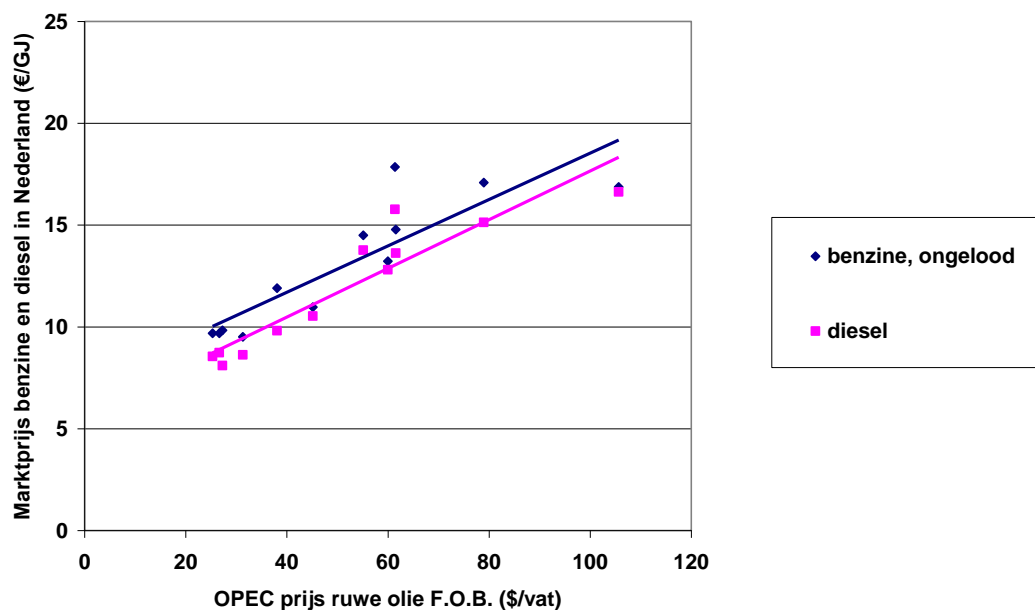


Figuur 2. Voorbeeld van kostprijsverlaging van bioethanol uit agro-reststromen (voorbeeld: wheat bran) bij invoering van co-productie volgens het “Energy-driven Biorefinery” principe. N.B. “base case” = bioethanol productie zonder co-productie van hoogwaardige producten; “biorefinery case” = bioethanol productie met co-productie van hoogwaardige producten

3 Resultaten

3.1 Kosten van fossiele transportbrandstoffen

In Figuur 3 zijn de kale marktprijzen weergegeven voor ongelode benzine en diesel in Nederland, als functie van de ruwe olieprijs. De gegevens laten een duidelijk verband zien tussen de kosten van benzine en diesel. Bij de huidige olieprijs (ca. 75 - 80 \$/vat) is de kale marktprijs voor benzine ca. 15 tot 16 €/GJ. Als aangenomen wordt dat de olieprijs varieert tussen de 60 en 90 \$/vat, zal de benzineprijs variëren van 13 tot 17.5 €/GJ. De marktprijs voor diesel laat een zelfde verloop zien als bij benzine, echter diesel is in Nederland iets goedkoper dan benzine (ongeveer 1 €/GJ).

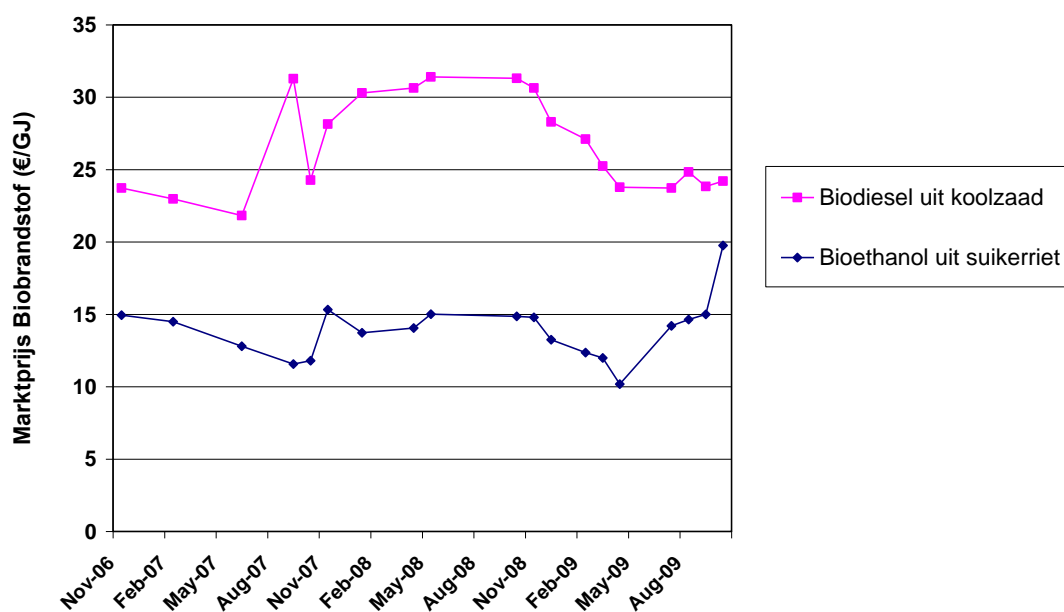


Figuur 3. Kale marktprijzen (zonder heffingen en b.d.) van benzine en diesel in Nederland in de periode 2002 – 2008, als functie van de ruwe olieprijs in deze periode.

3.2 Kosten van 1^e generatie biotransportbrandstoffen (grondstoffen in competitie met voedselproductie)

In Figuur 4 worden het prijsverloop van de kosten van de Braziliaanse ethanol uit rietsuiker, en biodiesel uit koolzaad uit Duitsland, weergegeven. De kosten van ethanol zijn exclusief de

bestaande EU importheffing van ca. 9 €/GJ heffing, en exclusief transportkosten van de brandstoffen van Brazilië naar Rotterdam. De kale marktprijzen van bioethanol liggen rond de 15 €/GJ, echter wat opvallend is dat Braziliaanse ethanol in de laatste maanden behoorlijk is gestegen. Dit houdt vooral verband met de stijging van de suikerprijs op de wereldmarkt in deze periode. De biodiesel prijs ligt een stuk hoger in vergelijking met bioethanol. Ook de biodieselprijs fluctueert, vooral als gevolg van fluctuaties in de prijs van de grondstof, ruwe koolzaadolie.



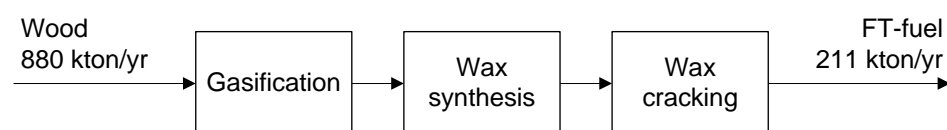
Figuur 4. Marktprijzen van bioethanol uit suikerriet (Brazilië) en biodiesel uit koolzaad (Duitsland) in de periode 2006 tot 2010. Prijzen exclusief b.t.w. en accijns.(bron: F.O. Licht)

3.3 Beschrijving van geavanceerde biobrandstofproductieketens, en vergelijking van productiekosten met marktprijzen van fossiele transportbrandstoffen

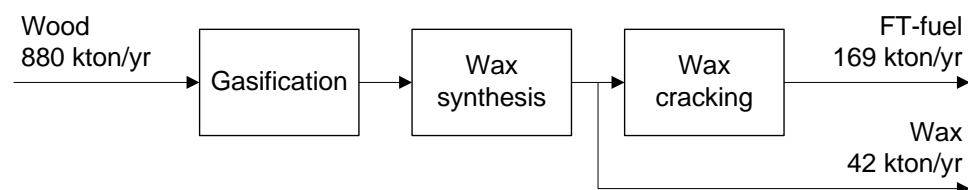
3.3.1 Fischer-Tropsch diesel uit lignocellulose biomassa

Fischer-Tropsch (FT) diesel wordt uit hout gemaakt middels een thermochemische conversie route die op vergassing van biomassa gebaseerd is. In de base case wordt alleen FT diesel geproduceerd die voor vervanging van fossiele diesel wordt gebruikt. In de biorefinery case wordt een vijfde van het halffabrikaat niet omgezet naar FT diesel, maar ingezet voor de productie van smeermiddelen, coatings, of was. Hiermee kunnen huidige producten uit de petrochemie vervangen worden, maar ook was die momenteel uit suikerriet geproduceerd wordt. De geschatte totale marktomvang van deze producten bedraagt ruim 3 M ton per jaar. De productie van FT diesel in zowel de base case als de biorefinery case is weergegeven in het volgende schema:

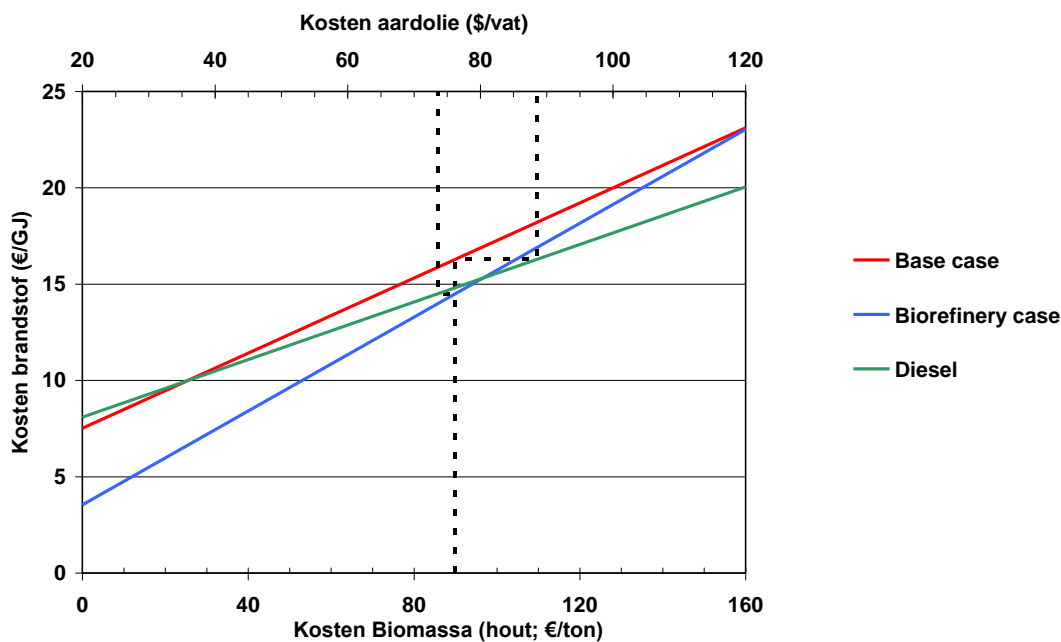
Base case



Biorefinery case



Uit de financieel-economische berekeningen (Figuur 5; zie bijlage voor financiële gegevens) blijkt dat bij een biomassa grondstof prijs van 90 €/ton, FT diesel zonder co-productie (i.e. de base case) competitief is met fossiele transportbrandstof die geproduceerd wordt bij een ruwe olieprijs van ca. 90 \$/vat. In het geval van co-productie (de biorefinery case) is biobrandstofproductie echter al competitief bij een olieprijs van ca. 75 \$/vat. Door co-productie zijn de netto productiekosten van de biobrandstof verlaagd met 11%.

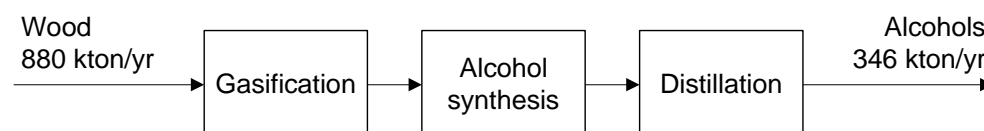


Figuur 5. Kostprijs van FT diesel uit lignocellulose met en zonder co-productie.

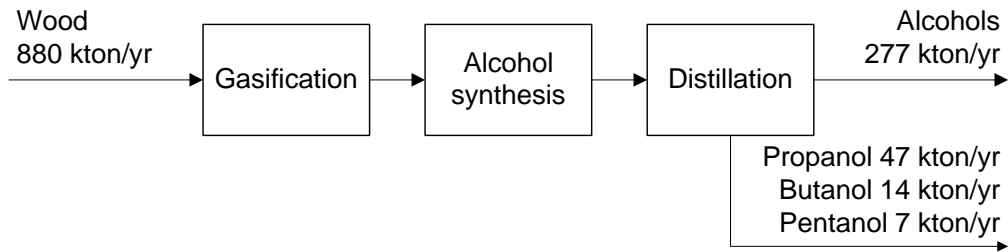
3.3.2 Mixed alcohol uit lignocellulose biomassa

Mixed Alcohols (propanol, butanol, pentanol) worden uit lignocellulose gemaakt middels thermochemische conversie technologie die op vergassing van biomassa gebaseerd is. In de base case worden alleen alcoholen geproduceerd die voor vervanging van fossiele brandstoffen worden ingezet. In de biorefinery case wordt een kwart van de geproduceerde alcoholen ingezet als platformchemical, voor de productie van oplosmiddelen en chemicaliën. Hiermee wordt het gebruik van op ruwe aardolie geproduceerde halffabrikaten vervangen. Vooral de huidige marktomvang van butanol voor deze toepassing is omvangrijk, ca. 1.8 M ton per jaar. De productie van Mixed Alcohols in zowel de base case als de biorefinery case is weergegeven in het volgende schema:

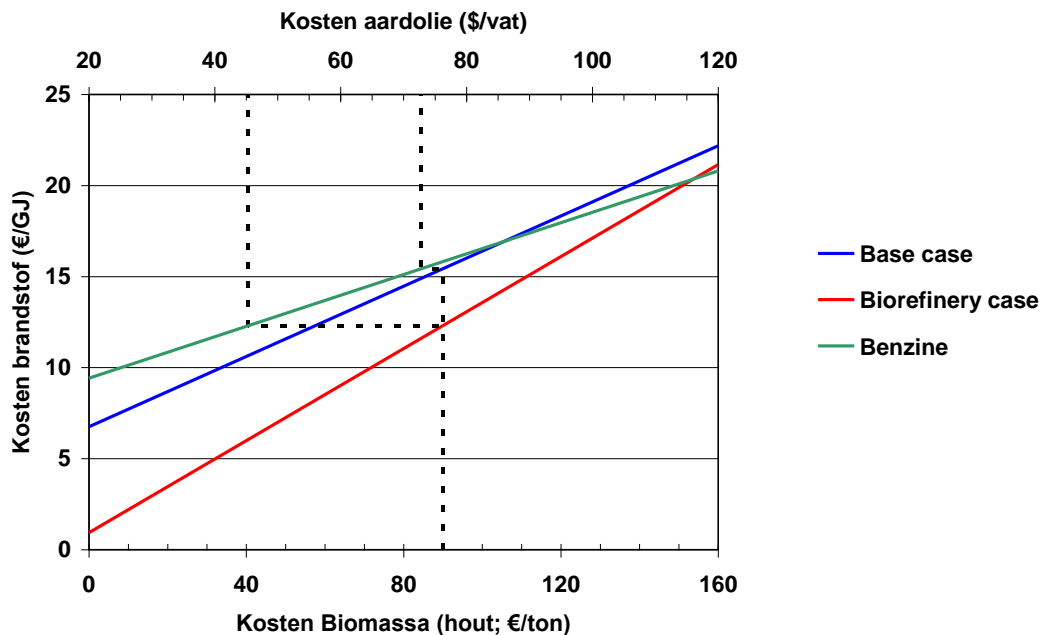
Base case



Biorefinery case



Uit de financieel-economische berekeningen (Figuur 6) blijkt dat bij een biomassa grondstof prijs van 90 €/ton, Mixed Alcohol productie zonder co-productie (i.e. de base case) competitief is met fossiele transportbrandstof bij een ruwe olieprijs van ca. 75 \$/vat. In het geval van co-productie (de biorefinery case) is biobrandstofproductie echter al competitief bij een olieprijs van ca. 45 \$/vat. Door co-productie zijn de netto productiekosten van de biobrandstof verlaagd met 20%.

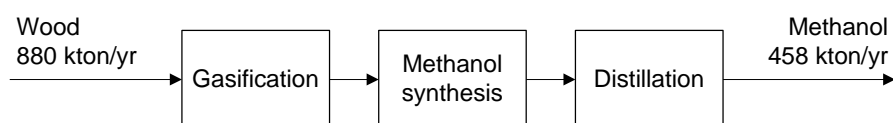


Figuur 6. Kostprijs van Mixed Alcohols uit lignocellulose met en zonder co-productie.

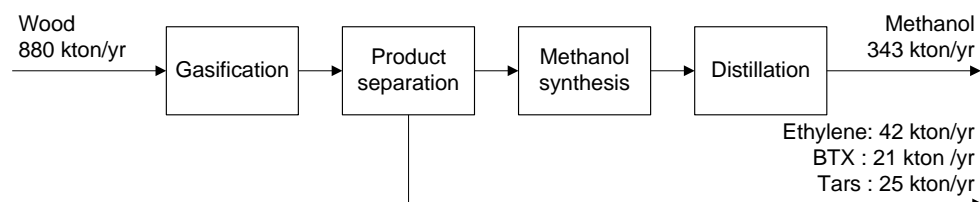
3.3.3 Methanol uit lignocellulose biomassa

Net zoals bij de twee voorgaande routes (FT diesel, Mixed Alcohols) is ook de productie van methanol uit lignocellulose gebaseerd op thermochemische conversie middels vergassing van biomassa. In de base case wordt alleen methanol geproduceerd die ingezet wordt voor vervanging van fossiele transportbrandstoffen. In de biorefinery case wordt voor de synthese van methanol een gedeelte van de vergassingsproducten verwijderd, en deze worden vervolgens ingezet voor de productie van ethyleen, BTX (buteen, toluen, xyleen), en teer. Ethyleen en BTX zijn petrochemische halffabrikaten die ingezet worden voor de productie van polymeren en chemicaliën. Met respectievelijk ruim 100 M ton/jr en 40 M ton/jr, is de huidige marktomvang van ethyleen en BTX zeer omvangrijk. Teer geproduceerd uit biomassa zou uit steenkool geproduceerde teer kunnen vervangen, afhankelijk van de eigenschappen van de biomassa teer. De marktomvang van teer uit steenkool is ruim 30 M ton/jr. De productie van methanol in zowel de base case als de biorefinery case is weergegeven in het volgende schema:

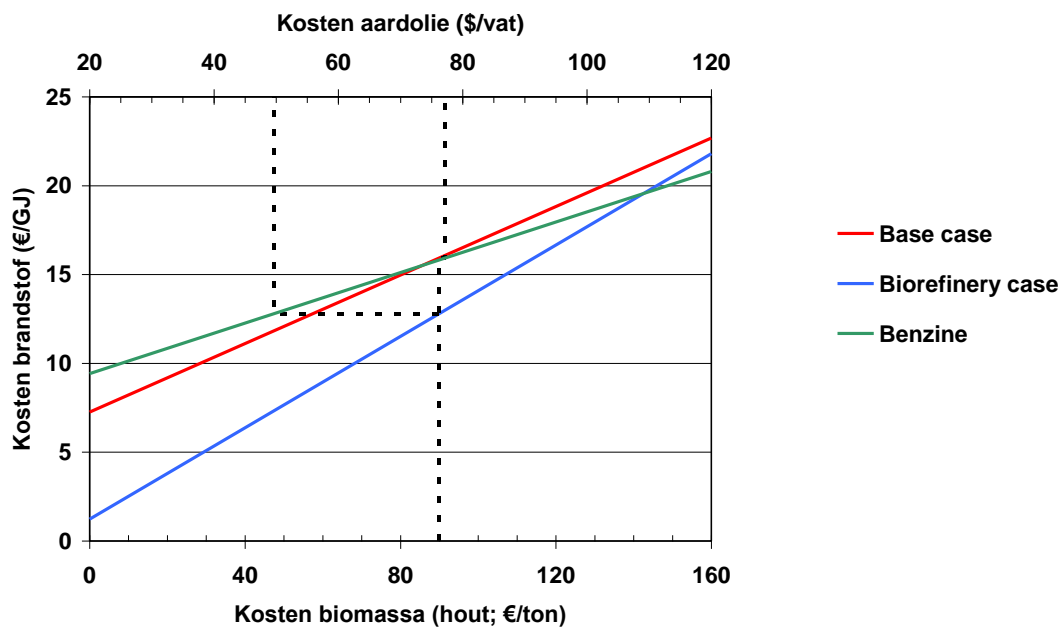
Base case



Biorefinery case



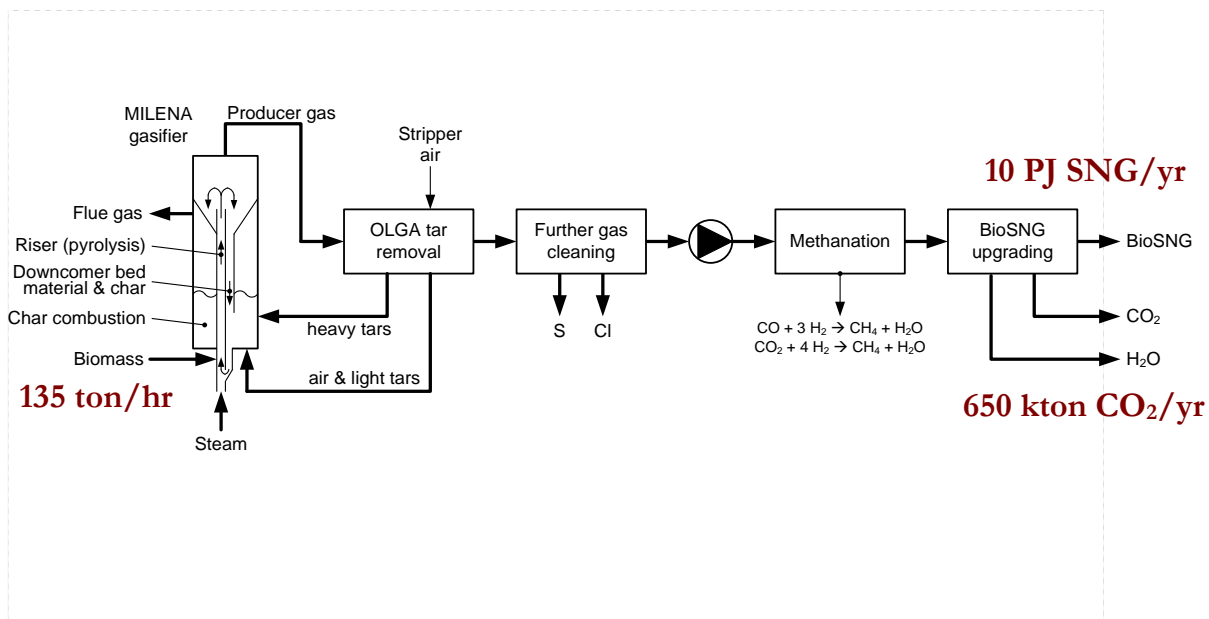
Uit de financieel-economische berekeningen (Figuur 7) blijkt dat bij een biomassa grondstof prijs van 90 €/ton, Methanol productie zonder co-productie (i.e. de base case) competitief is met fossiele transportbrandstof bij een ruwe olieprijs van ca. 78 €/vat. In het geval van co-productie (de biorefinery case) is biobrandstofproductie echter al competitief bij een olieprijs van ca. 50 \$/vat. Door co-productie zijn de netto productiekosten van de biobrandstof verlaagd met 19 %.



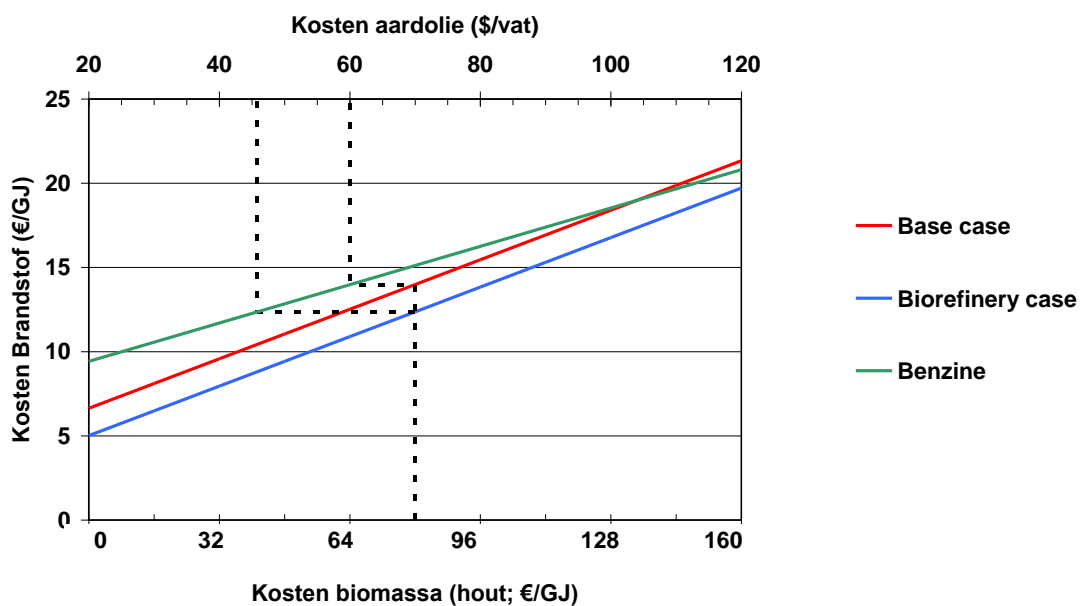
Figuur 7. Kostprijs van Methanol uit lignocellulose met en zonder co-productie.

3.3.4 Synthetic natural gas (SNG) uit lignocellulose biomassa

Bij de productie van Synthetic Natural Gas (SNG) uit lignocellulose, dat middels een vergassingsroute wordt geproduceerd, wordt tevens CO₂ geproduceerd. In de biorefinery case wordt CO₂ vermarkt voor industriële toepassingen. De productie van SNG in zowel de base case als de biorefinery case is weergegeven in het volgende schema:



Uit de financieel-economische berekeningen (Figuur 8) blijkt dat bij een biomassa grondstof prijs van 90 €/ton, SNG productie zonder co-productie (i.e. de base case) competitief is met fossiele transportbrandstof bij een ruwe olieprijs van ca. 60 \$/vat. In het geval van co-productie (de biorefinery case) is biobrandstofproductie echter al competitief bij een olieprijs van ca. 45 \$/vat. Door co-productie zijn de netto productiekosten van de biobrandstof verlaagd met 11 %.

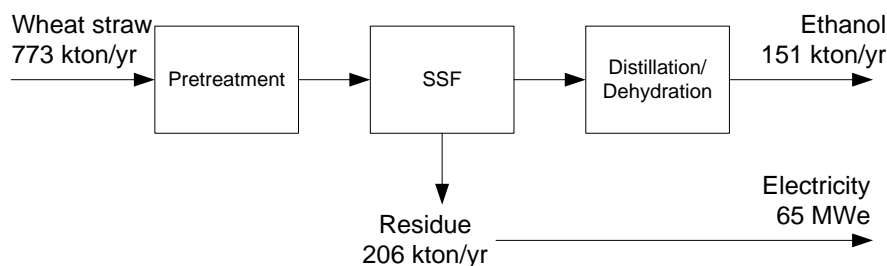


Figuur 8. Kostprijs van Synthetic Natural Gas uit lignocellulose met en zonder co-productie.

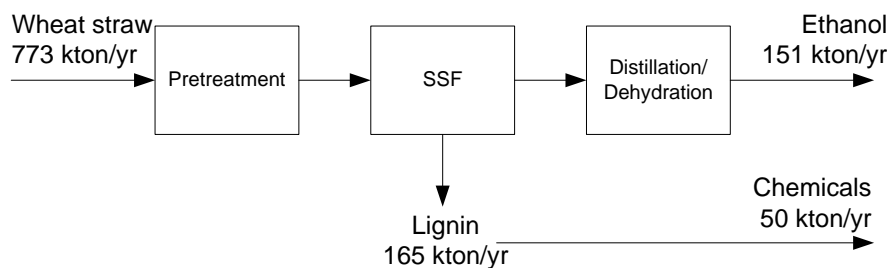
3.3.5 Bioethanol uit lignocellulose biomassa

Tarwestro wordt ingezet voor de productie van bioethanol door middel biochemische conversie, inclusief voorbehandeling, enzymatische hydrolyse, en fermentatie. In de base case worden procesresiduen, die voornamelijk lignine bevatten, gebruikt voor gecombineerde productie van electriciteit en warmte. De ethanol uit de fermentatie wordt gedestilleerd en gedehydrateerd. In de biorefinery case wordt de lignine uit het residu verder opgewerkt tot phenolen, die ingezet worden bij de productie van harsen, lijmen, en polymeren. De uit lignine geproduceerde phenolen vervangen phenolen die uit de petrochemie geproduceerd worden. De huidige marktomvang van phenolen in de wereld is naar schatting meer dan 4 M ton. De productie van bioethanol uit lignocellulose in zowel de base case als de biorefinery case is weergegeven in het volgende schema:

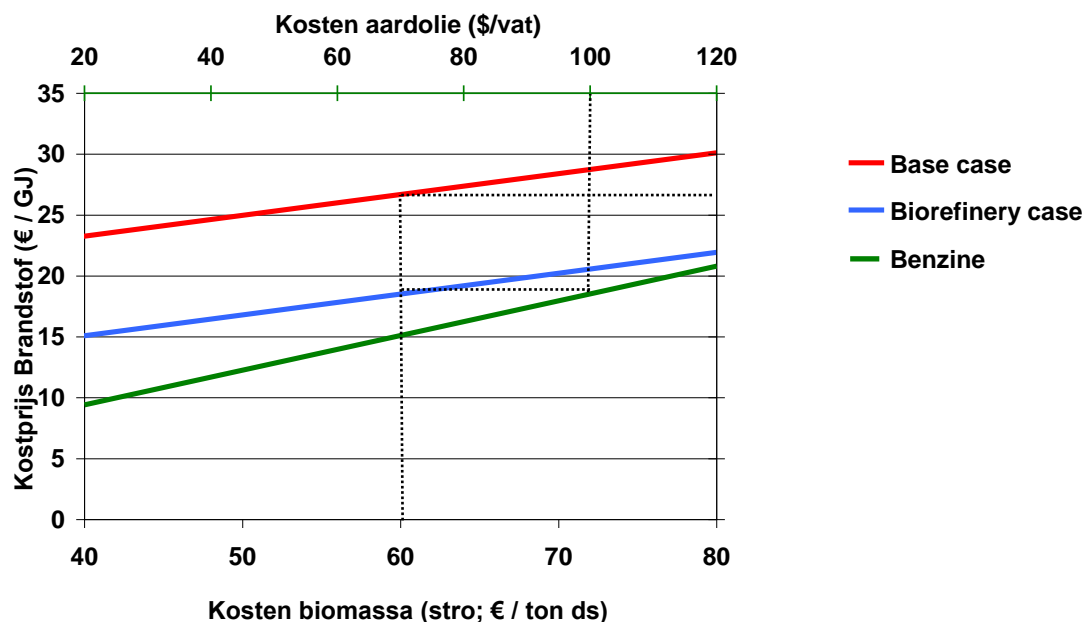
Base case



Biorefinery case



Uit de financieel-economische berekeningen (Figuur 9) blijkt dat bij een biomassa grondstofprijs van 60 €/ton, bioethanol productie uit stro zonder co-productie (i.e. de base case) competitief is met fossiele transportbrandstof bij een ruwe olieprijs die hoger ligt dan 150 \$/vat. In het geval van co-productie (de biorefinery case) echter wordt biobrandstofproductie competitief bij een olieprijs van ca. 100 \$/vat. Door co-productie zijn de netto productiekosten van de biobrandstof verlaagd met 35 %.



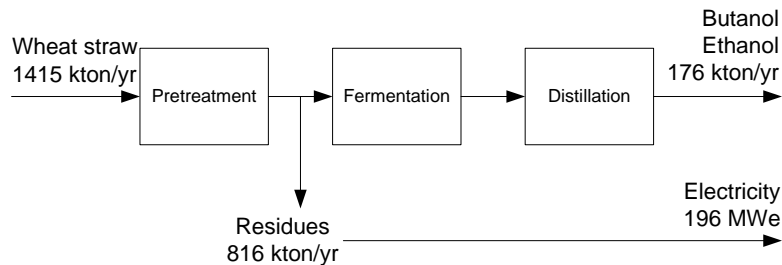
Figuur 9. Kostprijs van Bioethanol uit lignocellulose met en zonder co-productie.

3.3.6 Biobutanol uit lignocellulose biomassa

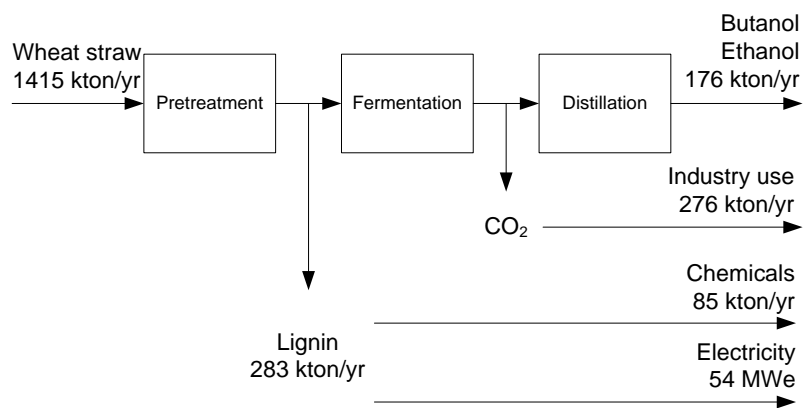
Tarwestro wordt ingezet voor de gecombineerde productie van aceton, butanol en ethanol (ABE), via een biochemisch conversie proces, inclusief voorbehandeling, enzymatische hydrolyse, en fermentatie. De geproduceerde producten worden door middel van destillatie gescheiden, en de geproduceerde butanol en ethanol worden ingezet als vervangers voor benzine. In de base case worden procesresiduen, die voornamelijk lignine bevatten, gebruikt voor gecombineerde productie van electriciteit en warmte. In de biorefinery case wordt een kwart van de geproduceerde butanol ingezet als platformchemical, hetgeen een hogere waarde heeft in vergelijking met biobrandstof. Butanol uit lignocellulose kan zo worden ingezet bij de productie van coatings, oplosmiddelen, en polymeren, en vervangt daarmee butanol geproduceerd uit aardolie. De huidige marktomvang van butanol in de wereld is naar schatting meer dan 5 M ton. Tevens wordt in de biorefinery case de lignine uit het residuen verder opgewerkt tot phenolen, die ingezet kunnen worden bij de productie van phenolharsen, lijmen, en polymeren. De uit lignine geproduceerde phenolen vervangen phenolen die uit de petrochemie geproduceerd worden. De huidige marktomvang van phenolen in de wereld is, zoals eerder vermeld, naar schatting meer dan 4 M ton. Tot slot wordt CO₂, gevormd als bijproduct tijdens de fermentatie, ingezet voor industriële toepassingen, zoals productie van bicarbonaten of andere chemicaliën.

De productie van biobutanol uit lignocellulose in zowel de base case als de biorefinery case is weergegeven in het volgende schema:

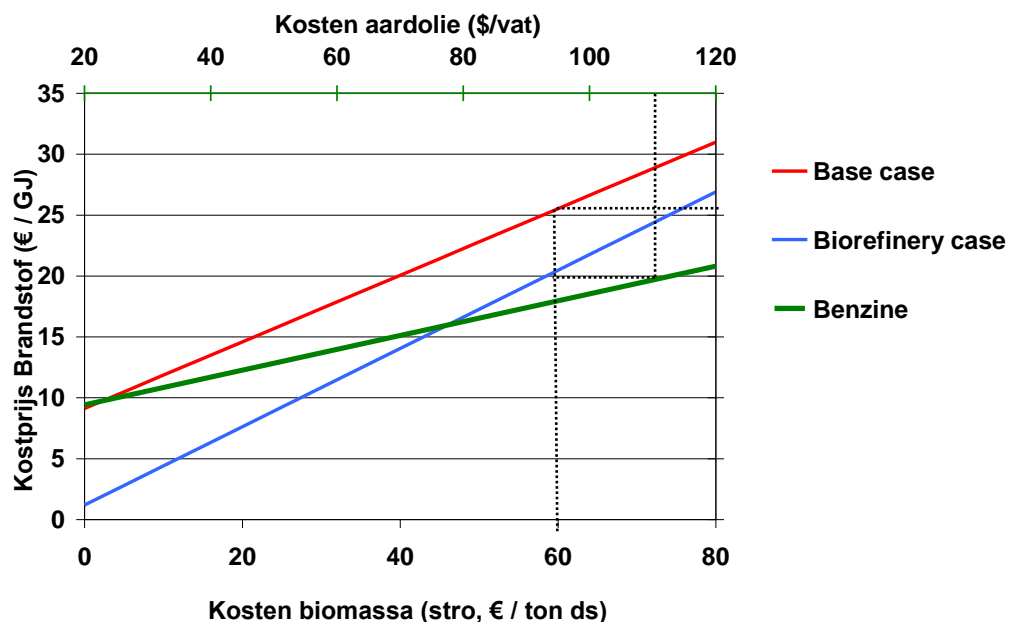
Base case



Biorefinery case



Uit de financieel-economische berekeningen (Figuur 10) blijkt dat bij een biomassa grondstof prijs van 60 €/ton, bioethanol productie uit stro zonder co-productie (i.e. de base case) competitief is met fossiele transportbrandstof geproduceerd bij een ruwe olieprijs die hoger ligt dan 150 \$/vat. In het geval van co-productie (de biorefinery case) echter wordt biobrandstofproductie competitief bij een olieprijs van ca. 110 \$/vat. Door co-productie zijn de netto productiekosten van de biobrandstof verlaagd met 30 %.



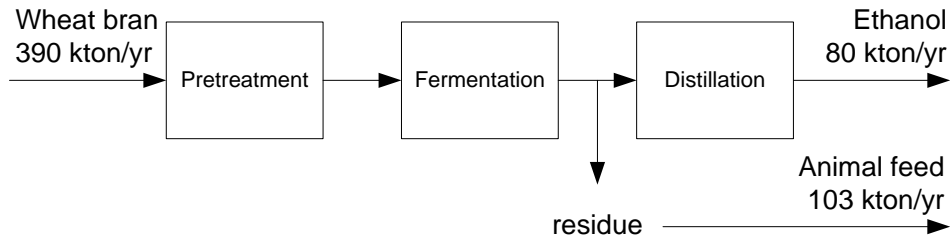
Figuur 10. Kostprijs van Biobutanol uit lignocellulose met en zonder co-productie.

3.3.7 Bioethanol uit agro-reststromen

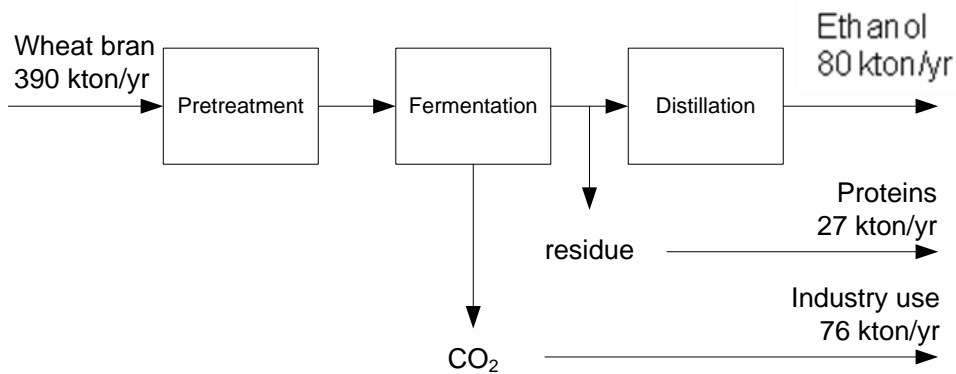
Wheat bran, een droog bijproduct dat vrijkomt bij de industriële verwerking van graan tot meel, wordt ingezet als grondstof voor de productie van bioethanol. Het betreft hier een biochemisch conversieproces dat bestaat uit enzymatische hydrolyse, fermentatie, en destillatie. Zowel C6 suikers (glucose) als C5 suikers (arabinose, xylose) worden tijdens de fermentatie omgezet in ethanol. In de base case worden procesresiduen, die vooral eiwitten en vezels bevatten, ingezet als laagwaardige veevoergrondstof. In de biorefinery case worden uit het procesresidu eiwitten geïsoleerd, deze eiwitten worden verder opgewerkt voor toepassingen in hoogwaardig veevoer. De totale huidige marktomvang voor deze eiwitten in Nederland is groot, ter vergelijking wordt per jaar meer dan 1 M ton sojaschroot (dat ca. 40% eiwitten bevat) in Nederland afgezet als veevoer. De uit het procesresidu geproduceerde eiwitten vervangen vooral eiwitten uit voor veevoer geproduceerde gewassen, zoals graan en soja. Tevens wordt in de biorefinery case CO₂ gevormd als bijproduct tijdens de fermentatie, ingezet voor industriële toepassingen zoals productie van bicarbonaten of andere chemicaliën.

De productie van bioethanol uit agro-reststromen in zowel de base case als de biorefinery case is weergegeven in het volgende schema:

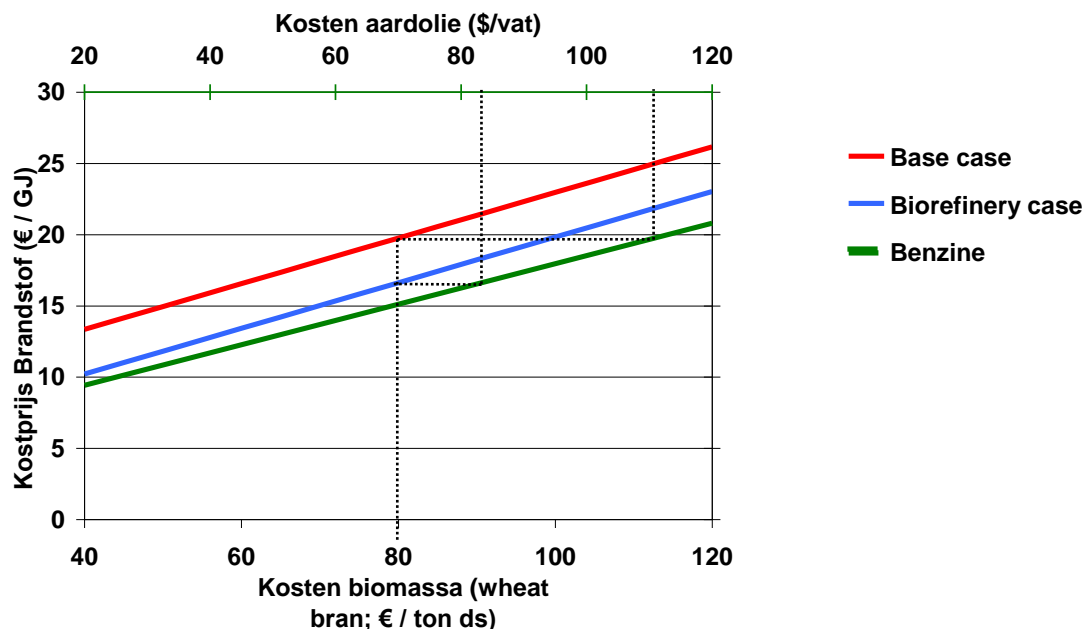
Base case



Biorefinery case



Uit de financieel-economische berekeningen (Figuur 11) blijkt dat bij een biomassa grondstof prijs van 80 €/ton, bioethanol uit agro-reststromen zonder co-productie (i.e. de base case) competitief is met fossiele transportbrandstof geproduceerd bij een ruwe olieprijs van ca. 110 \$/vat. In het geval van co-productie (de biorefinery case) is biobrandstofproductie echter al competitief bij een olieprijs van ca. 80 \$/vat. Door co-productie zijn de netto productiekosten van de biobrandstof verlaagd met 16 %.



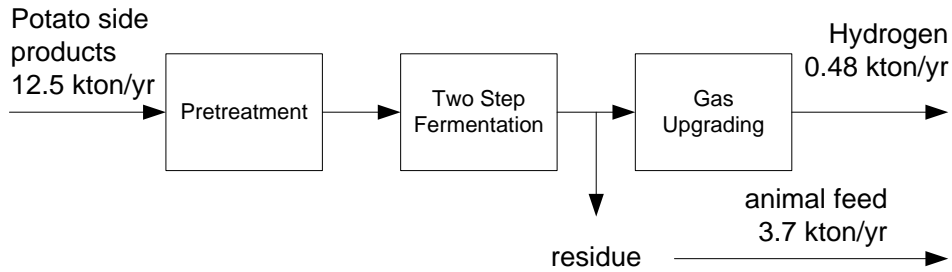
Figuur 11. Kostprijs van Bioethanol uit agro-reststromen (wheat bran) met en zonder co-productie.

3.3.8 Biowaterstof uit agro-reststromen

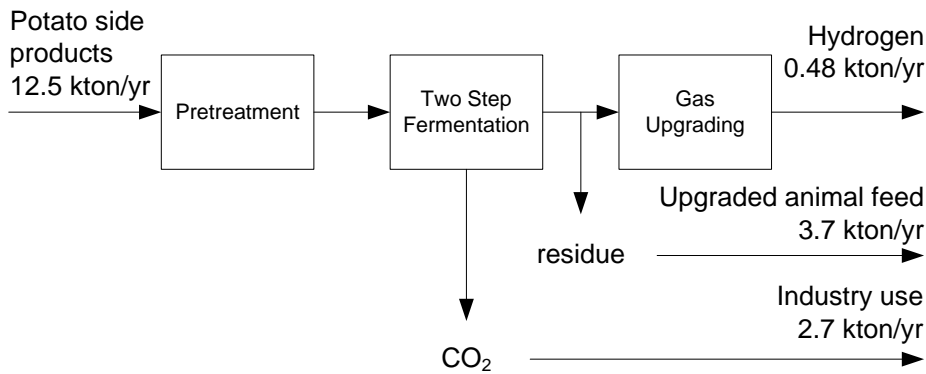
Aardappelstoomschillen, een nat bijproduct uit de productie van frieten uit de aardappel, worden ingezet als grondstof voor decentrale productie van bio-waterstof via een biochemisch conversie proces. Het proces omvat o.a. enzymatische hydrolyse van polymere koolhydraten tot fermenteerbare suikers, een twee-staps fermentatie, en het geproduceerde waterstofgas wordt opgewerkt voor gebruik in brandstofcellen. Zowel C6 suikers (glucose) als C5 suikers (arabinose, xylose) worden tijdens de fermentatie omgezet. In de base case wordt het procesresidu, dat voornamelijk eiwitten en vezels bevat, ingezet als nat veevoerproduct. In de biorefinery case wordt dit residu verder opgewerkt, hetgeen een hogere waarde opbrengt. Tevens wordt een kwart van de geproduceerde waterstof ingezet voor industriële toepassingen, en wordt een gedeelte van het CO₂, gevormd als bijproduct tijdens de fermentatie, ingezet voor decentrale, industriële toepassingen. De waterstof vervangt daarmee waterstof geproduceerd uit de petrochemie.

De productie van biowaterstof uit agro-reststromen in zowel de base case als de biorefinery case is weergegeven in het volgende schema:

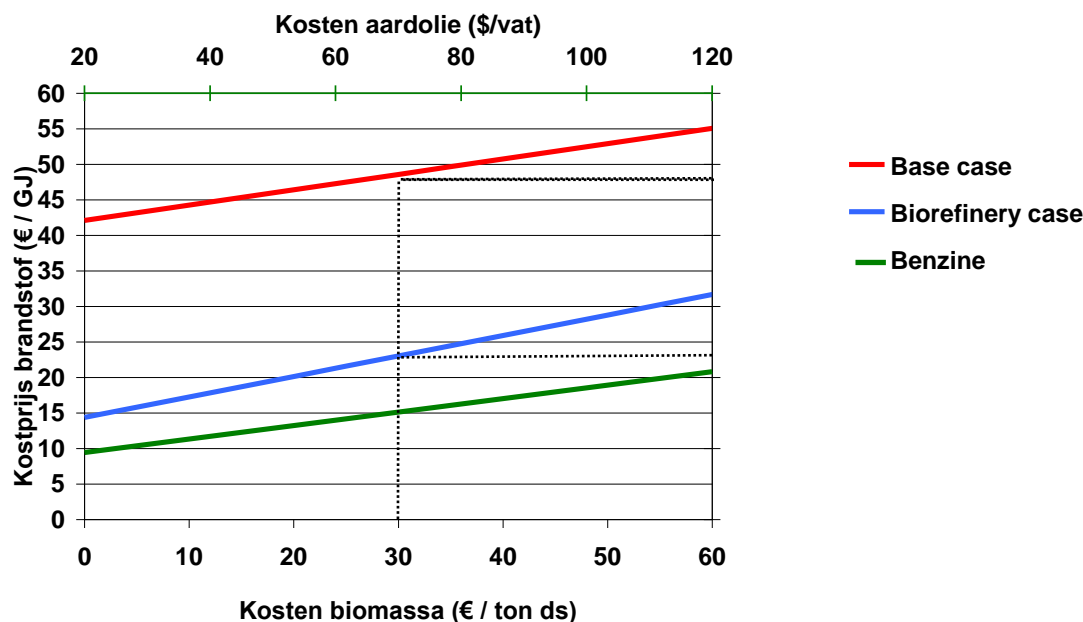
Base case



Biorefinery case



Uit de financieel-economische berekeningen (Figuur 12) blijkt dat bij een biomassa (aardappelreststromen) grondstof prijs van 30 €/ton, biowaterstof productie zonder co-productie (i.e. de base case) competitief is met fossiele transportbrandstof geproduceerd bij een olieprijs van ca. 200 \$/vat. Echter, in het geval van co-productie (de biorefinery case) is biowaterstofproductie uit reststromen competitief bij een olieprijs van ca. 135 \$/vat. Door co-productie zijn de netto productiekosten van de biobrandstof verlaagd met 53%.



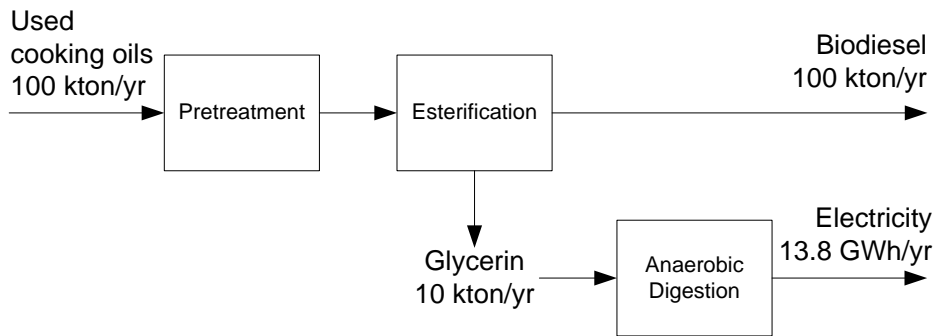
Figuur 12. Kostprijs van Biowaterstof uit agro-reststromen (aardappelreststromen) met en zonder co-productie.

3.3.9 Biodiesel uit afvalvetten en -oliën

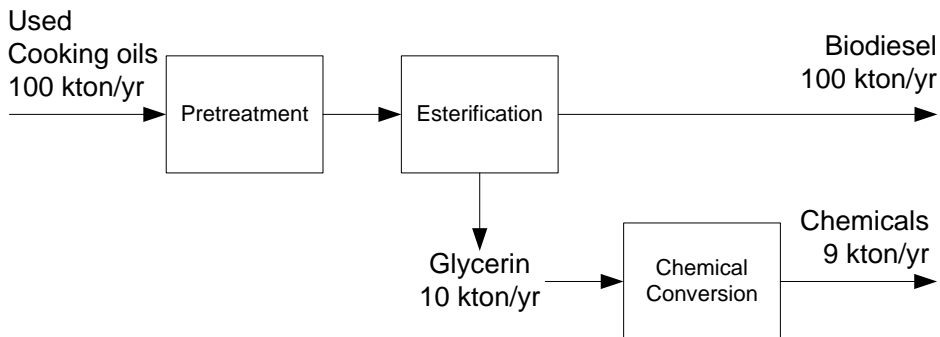
Afvalvetten en oliën, zoals gebruikte frituurvetten, worden ingezet voor de productie van biodiesel door middel van het transesterificatie proces. Hierbij wordt ruwe glycerine gevormd. In de base case wordt ruwe glycerine ingezet voor anaerobe vergisting naar biogas, dat ingezet wordt voor elektriteitsproductie. In de biorefinery case wordt glycerine opgewerkt en ingezet voor productie van chemicaliën. Als voorbeeld is de productie van epichloorhydrine (EPI) uit glycerine genomen. EPI wordt gebruikt bij de productie van epoxyharsen, textiel, papier, en andere industriële toepassingen, en heeft een geschatte marktomvang in de wereld van ca. 1 M ton per jaar. EPI wordt nu voornamelijk in de petrochemie geproduceerd, echter de industriële productie van EPI uit glycerine is groeiende.

De productie van biodiesel uit afvalvetten en oliën in zowel de base case als de biorefinery case is weergegeven in het volgende schema:

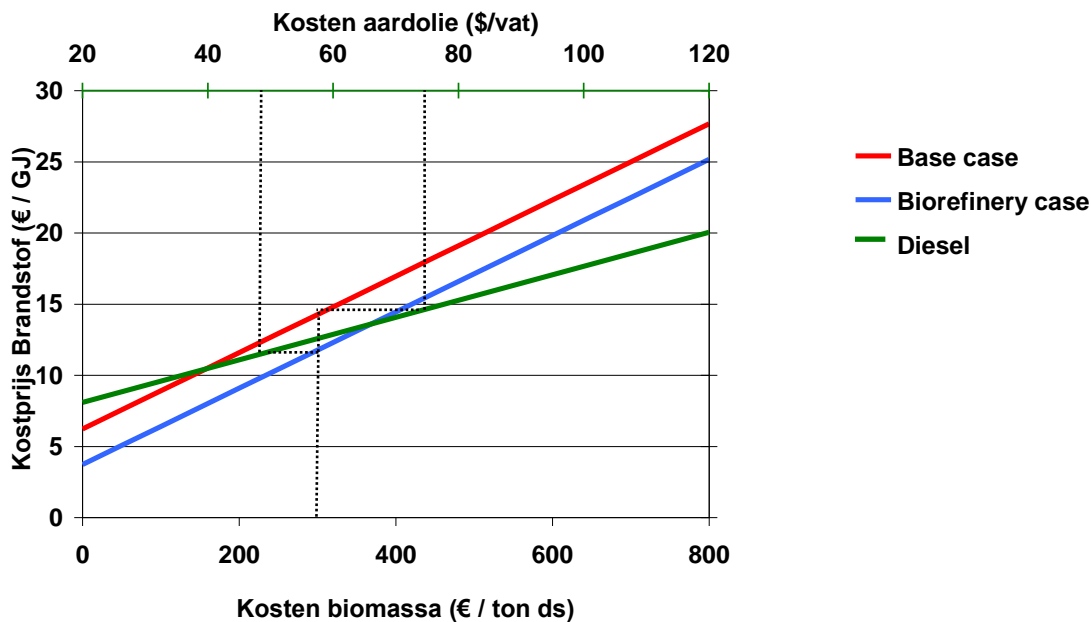
Base case



Biorefinery case



Uit de financieel-economische berekeningen (Figuur 13) blijkt dat bij een biomassa (afvalvetten) grondstof prijs van 300 €/ton, biodiesel productie zonder co-productie (i.e. de base case) competitief is met fossiele transportbrandstof geproduceerd bij een olieprijs van ca. 75 \$/vat. Echter, in het geval van co-productie (de biorefinery case) is biodieselproductie uit afvalvetten echter al competitief bij een olieprijs van ca. 48 \$/vat. Door co-productie zijn de netto productiekosten van de biobrandstof verlaagd met 18%.

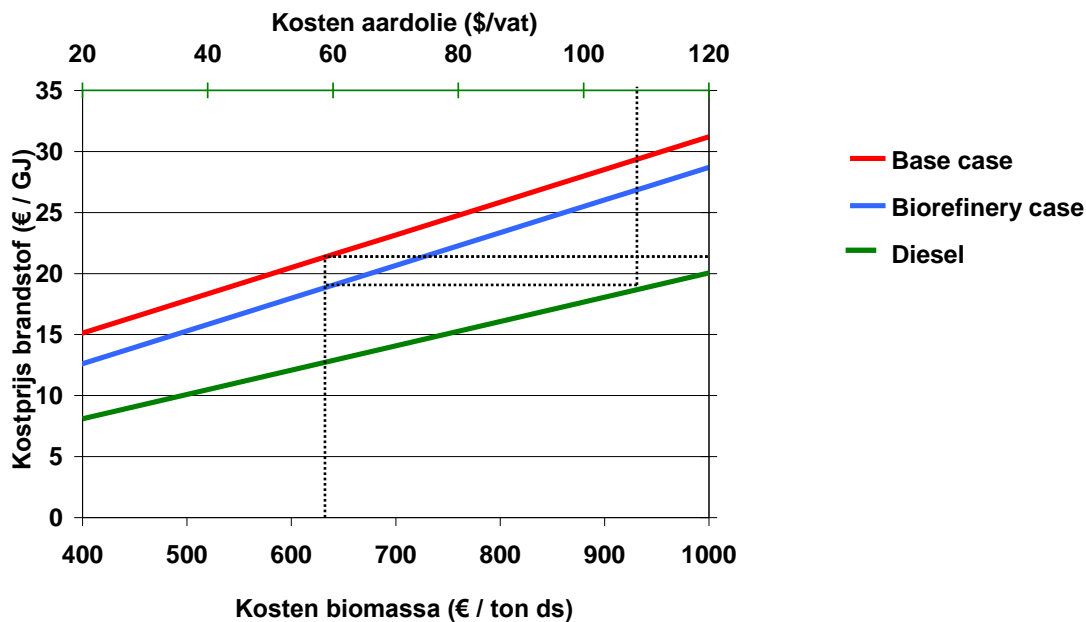


Figuur 13. Kostprijs van Biodiesel uit afvalvetten en -oliën met en zonder co-productie.

3.3.10 Biodiesel uit ruwe plantaardige oliën

De productie van biodiesel uit ruwe plantaardige olie, zoals bijvoorbeeld uit zaden van de *Jatropha* plant, vertoont veel gelijkenis met de voorgaande case: biodiesel uit afvalvetten. In de base case wordt ruwe glycerine ingezet voor anaerobe vergisting naar biogas, dat ingezet wordt voor elektriteitsproductie. In de biorefinery case wordt glycerine opgewerkt en ingezet voor productie van chemicaliën. Als voorbeeld is de productie van epichloorhydrine (EPI) uit glycerine genomen. EPI wordt gebruikt bij de productie van epoxyharsen, textiel, papier, en andere industriële toepassingen, en heeft een geschatte marktomvang in de wereld van ca 1 M ton per jaar. EPI wordt nu voornamelijk in de petrochemie geproduceerd, echter de industriële productie van EPI uit glycerine is groeiende.

Uit de financieel-economische berekeningen (Figuur 14) blijkt dat bij een biomassa (ruwe plantaardige olie) grondstof prijs van 640 €/ton, biodiesel productie zonder co-productie (i.e. de base case) competitief is met fossiele transportbrandstof geproduceerd bij een olieprijs van ca. 135 \$/vat. Echter, in het geval van co-productie (de biorefinery case) is biodieselproductie uit plantaardige oliën echter competitief bij een olieprijs van ca. 105 \$/vat. Door co-productie zijn de netto productiekosten van de biobrandstof verlaagd met 12%.



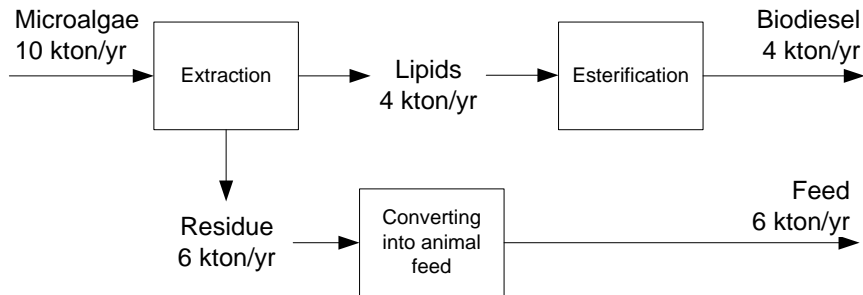
Figuur 14. Kostprijs van Biodiesel uit ruwe plantaardige oliën met en zonder co-productie.

3.3.11 Biodiesel uit micro-algen

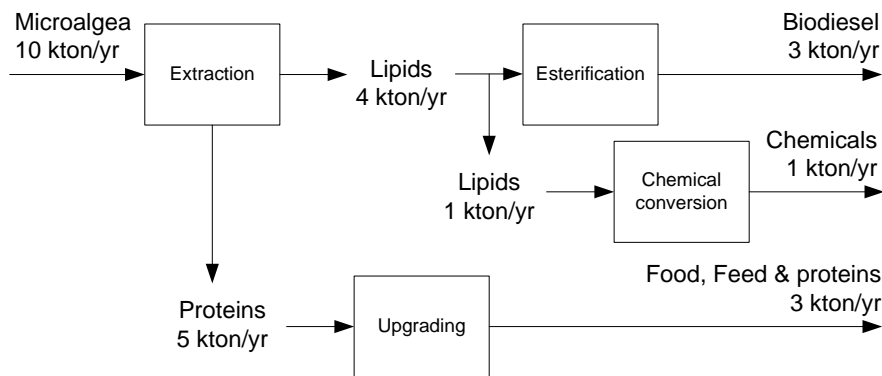
Microalgen worden ingezet voor de productie van biodiesel, door de in microalgen voorkomende lipiden te extraheren. In de base case wordt een residu gevormd, dat voornamelijk eiwitten bevat en afgezet wordt als veevoer. In de biorefinery case wordt 25% van de geëxtraheerde lipiden ingezet voor productie van chemicaliën, en wordt de eiwitfractie opgewerkt en ingezet als grondstof voor hoogwaardig veevoer (ca. 80% van de eiwitten), en humane voeding (ca. 20%). In de berekeningen wordt aangenomen dat microalgen 40% lipiden bevatten. De uit lipiden geproduceerde chemicaliën kunnen worden ingezet voor de productie van acrylaatverven, deze chemicaliën hebben een huidige marktomvang in de wereld van meer dan 3 M ton. Deze chemicaliën worden nu vooral uit aardolie geproduceerd. De huidige marktomvang van eiwitten voor veevoertoepassingen in Nederland is zeer groot, ter vergelijking wordt per jaar meer dan 1 M ton sojaschroot (dat ca 40% eiwitten bevat) in Nederland afgezet als veevoer. De uit algen geproduceerde eiwitten vervangen vooral eiwitten uit voor veevoer geproduceerde gewassen, zoals graan en soja.

De productie van biodiesel uit micro-algen in zowel de base case als de biorefinery case is weergegeven in het volgende schema:

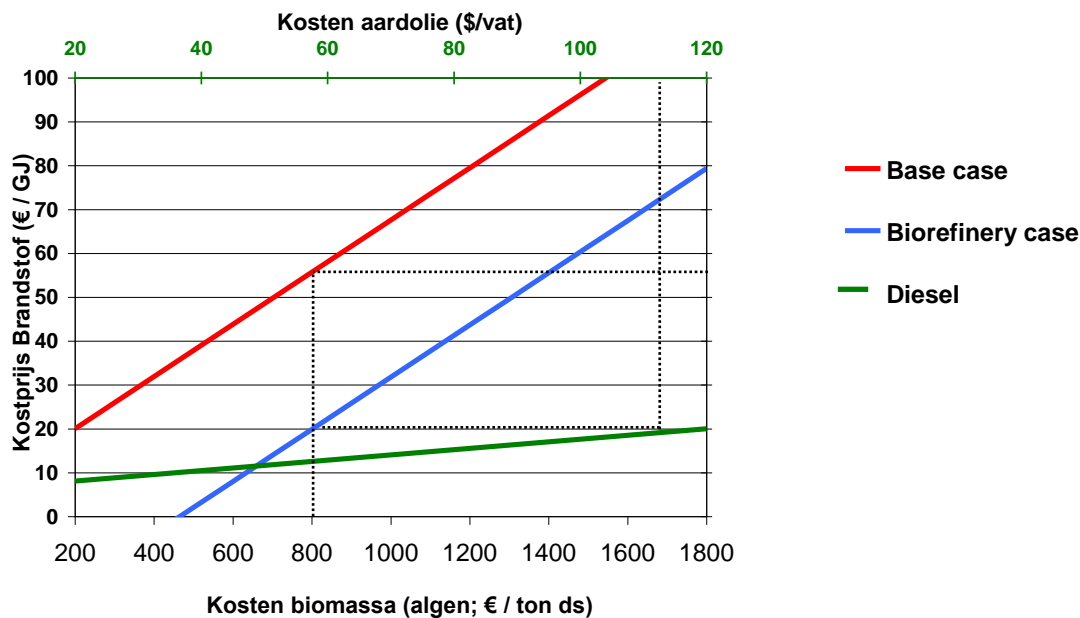
Base case



Biorefinery case



Uit de financieel-economische berekeningen (Figuur 15) blijkt dat bij een biomassa grondstof prijs van 800 €/ton (0.8 €/kg droge stof), bioethanol productie zonder co-productie (i.e. de base case) alleen competitief is met fossiele transportbrandstof bij een zeer hoge olieprijs (> 200 \$/vat). Echter, in het geval van co-productie (de biorefinery case) is biobrandstofproductie uit micro-algen competitief bij een olieprijs van ca. 115 \$/vat. Door co-productie zijn de netto productiekosten van de biobrandstof verlaagd met 56 %.



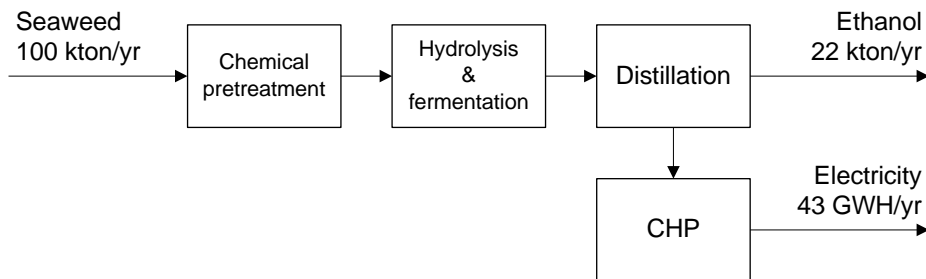
Figuur 15. Kostprijs van Biodiesel uit micro-algen met en zonder co-productie.

3.3.12 Bioethanol uit macro-algen/zeewier

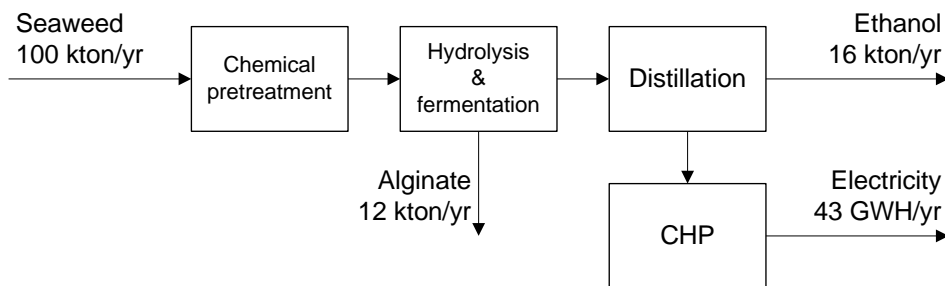
Zeewier biomassa kan off-shore in de Noordzee geproduceerd worden, bijvoorbeeld in dezelfde gebieden als windturbine parken. Zeewier wordt geoogst en aan land gebracht, en ingezet voor de productie van bioethanol volgens een biochemische conversie project (voorbehandeling, hydrolyse, en fermentatie). In de base case worden niet-fermenteerbare delen uit het zeewier ontwaterd en gedroogd, en ingezet voor gecombineerde productie van electriciteit en warmte. In de biorefinery case, wordt tijdens de voorbehandelings/hydrolyse stap alginaten geëxtraheerd. Alginaten kunnen ingezet worden in coatings, vulmaterialen voor papier, textiel en plastics, maar ook voor humane voeding en personal care. Hierdoor kan alginaten productie gedeeltelijk producten van petrochemische oorsprong vervangen. Verder zouden alginaten verder omgezet kunnen worden naar furanen, voor productie van bio-polymeren. Ook zouden alginaten ingezet kunnen worden voor productie van melkzuur of succinaat, platformchemicals voor productie van oplosmiddelen en bioplastics. De potentiële marktomsang van uit biomassa geproduceerde alginaten is derhalve zeer groot.

De productie van bioethanol uit zeewier in zowel de base case als de biorefinery case is weergegeven in het volgende schema:

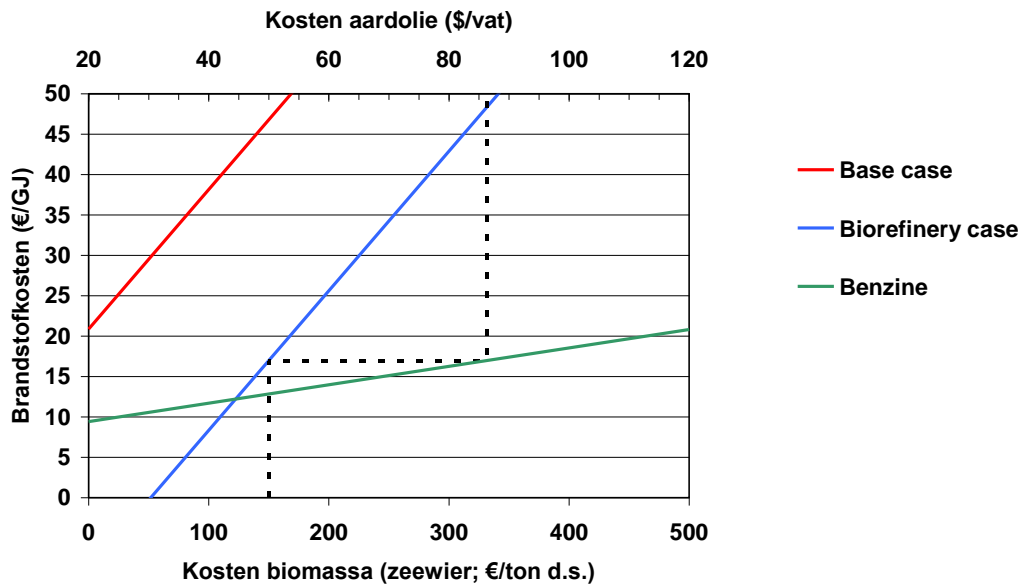
Base case



Biorefinery case



Uit de financieel-economische berekeningen (Figuur 16) blijkt dat bij een biomassa (zeewier) grondstof prijs van 150 €/ton, bioethanol productie zonder co-productie (i.e. de base case) alleen competitief is met fossiele transportbrandstof geproduceerd bij een zeer hoge olieprijs (> 200 \$/vat). Echter, in het geval van co-productie (de biorefinery case) is biobrandstofproductie uit zeewier echter competitief bij een olieprijs van ca. 85 \$/vat. Door co-productie zijn de netto productiekosten van de biobrandstof verlaagd met 64 %.



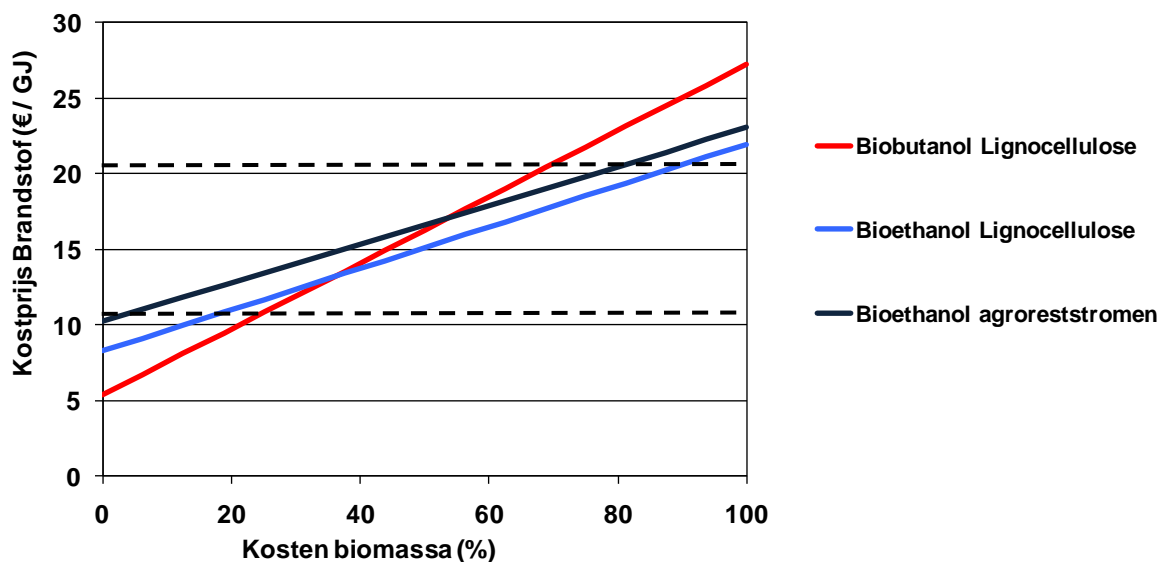
Figuur 16. Kostprijs van Bioethanol uit zeewier met en zonder co-productie.

3.4 Vergelijking geavanceerde biobrandstoffen met eerste generatie biobrandstoffen

Om een vergelijking van geavanceerde biobrandstoffen met conventionele, eerste generatie biobrandstoffen mogelijk te maken, zijn de kosten van een zestal biobrandstofketens waarbij co-productie plaats vindt, vergeleken met de marktprijzen van bioethanol uit suikerriet (Brazilië) en biodiesel uit koolzaad (Duitsland).

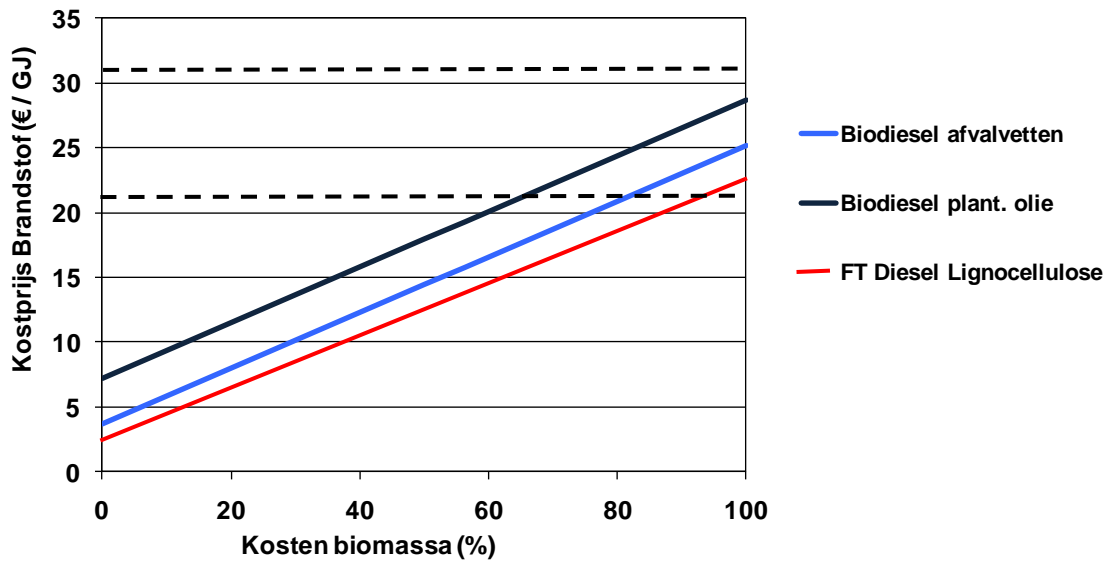
In Figuur 17 worden de kosten van drie biobrandstofproductieketens die gericht zijn op vervanging van benzine (bioethanol uit lignocellulose, biobutanol uit lignocellulose, en bioethanol uit agro-reststromen) weergegeven, volgens de berekeningen uit de eerdere paragrafen in dit hoofdstuk. Om de vergelijking van ketens met verschillende grondstoffen mogelijk te maken, zijn de kosten voor de biomassa grondstoffen genormaliseerd. In alle drie gevallen is uitgegaan van de biorefinery case, m.a.w. naast biobrandstof worden er hoogwaardige producten uit de procesresiduen geproduceerd. Het verloop van de curve laat zien dat de biobrandstofkosten variëren van 5 á 10 €/GJ tot 22 á 27 €/GJ, afhankelijk van grondstofkosten en type biobrandstof. Tevens is in de grafiek d.m.v. arcering aangegeven wat de bandbreedte is van de marktkosten van bioethanol uit suikerriet, die varieerde van ca. 10 tot 21 €/GJ in de afgelopen drie jaar (zie ook Figuur 4). Uit de vergelijking van kosten blijkt dat de geavanceerde biobrandstoffen in de meeste gevallen zullen kunnen concurreren met de eerste generatie bioethanol uit Brazilië. Bij de huidige bioethanolmarktprijs uit Brazilië, die rond de 20 €/GJ ligt, zijn de kosten van geavanceerde

biobrandstofkosten lager, tenzij er een relatief hoge prijs voor de biomassa grondstof betaald moet worden. In de vergelijking tussen eerste generatie en meer geavanceerde biobrandstoffen moet echter wel opgemerkt worden dat er transitiekosten zijn om over te stappen naar geavanceerde, tweede generatie, biobrandstoffen. Deze zijn in de analyse niet meegenomen. Alhoewel goedkopere biomassa, in combinatie met co-productie leidt tot een gunstige marktpositie van geavanceerde biobrandstoffen ten op zicht van eerste generatie biobrandstoffen, zal dus niet automatisch leiden tot marktinvloering van die geavanceerde biobrandstoffen.



Figuur 17. Vergelijking van kosten van drie bioethanol productieketens, met marktprijzen van bioethanol uit suikerriet (Brazilië; prijzen exclusief kosten voor transport, distributie en import- of accijnsheffingen). Arcering geeft boven- en ondergrens aan van marktprijzen van bioethanol uit suikerriet in de periode 2006 - 2009

In Figuur 18 wordt eenzelfde analyse gedaan voor drie geavanceerde biodieselketens (biorefinery case), die vergeleken worden met de marktprijzen van biodiesel uit koolzaad van de afgelopen drie jaar (zie ook Figuur 4). Uit het verloop van de curve kan geconcludeerd worden dat in verreweg de meeste gevallen, productiekosten van geavanceerde biobrandstoffen lager komen te liggen als de marktkosten van biodiesel uit koolzaad.



Figuur 18. Vergelijking van kosten van drie biodiesel productieketens, met marktprijzen van biodiesel uit koolzaad (Duitsland; prijzen exclusief kosten voor transport, distributie en heffingen). Arcering geeft boven- en ondergrens aan van marktprijzen van biodiesel uit koolzaad in de periode 2006 - 2009

4 Conclusies en Aanbevelingen

Voor een twaalfstal geavanceerde biobrandstofketens is een analyse gemaakt welke hoogwaardige co-producten geproduceerd kunnen worden uit procesresiduen die vrij komen bij de productie van biobrandstoffen. Deze co-producten zijn zeer divers en lopen uiteen van was, BTX (buteen, toluen en xyleen) en ethyleen uit thermo-chemische biobrandstofproductieketens tot fenolvervangers, platformchemicaliën en hoogwaardige eiwitten uit bio-chemische biobrandstofproductieketens. In verreweg de meeste gevallen gaat het hier om producten die op dit moment uit aardolie vervaardigd worden. Een uitzondering zijn hoogwaardige eiwitten, die uit voornamelijk voedselgewassen geproduceerd worden. In het algemeen bestaat er voor al deze co-producten een omvangrijke afzetmarkt. De analyse is gebaseerd op basis van informatie van industriële stakeholders over geavanceerde biobrandstofproductie, een inschatting van biomassa grondstofkosten in Nederland, en inzichten in de huidige stand van de bioraffinage technologie. Nieuwe biomassa waardeketens, waarbij zowel biobrandstof als bio-based producten worden geproduceerd dienen echter nog wel ontwikkeld worden.

De uitgevoerde berekeningen naar de financiële haalbaarheid van geavanceerde biobrandstofketens laten zien dat co-productie van biobrandstoffen tezamen met Bio-based Producten een goede methode is om additionele waarde toe te kennen aan de totale biomassa-product-keten. Op basis van een twaalfstal doorgekende ketens (Tabel 2) kunnen de productiekosten van biobrandstoffen gemiddeld 30% lager worden ten opzichte van de base-case waarin geen co-productie van hoogwaardige producten plaatsvindt. Co-productie van hoogwaardige Bio-based Producten resulteert in lagere productiekosten en creëert derhalve een verbeterde marktpositie en een zo mogelijk versnelde marktimplementatie voor de geavanceerde biotransportbrandstoffen.

De berekeningen laten ook zien dat geavanceerde biotransportbrandstoffen indien deze gecombineerd worden met afzet van hoogwaardige co-producten, veel eerder met fossiele brandstoffen kunnen concurreren dan in het geval waar geen hoogwaardige co-productie plaatsvindt. Zo zorgt co-productie ervoor dat biobrandstoffen uit thermo-chemische biobrandstofketens kunnen concurreren met een fossiele brandstof bij een olieprijs die dicht bij de huidige olieprijs ligt (momenteel rond de 70 - 75 \$ per vat), of zelfs lager is dan de huidige olieprijs. Voor de meeste andere biobrandstofketens zorgt co-productie ervoor dat biobrandstofproductie zou kunnen concurreren met fossiele brandstoffen bij een olieprijs van ca. 80 tot 110 \$ per vat, dicht bij de huidige olieprijs. Bij deze analyse wordt er van uitgegaan dat biobrandstoffen zonder financiële stimulering zouden moeten concurreren met fossiele benzine of diesel. Verder zijn de resultaten erg afhankelijk van de kosten van de biomassa grondstof. In deze studie is een eigen inschatting van biomassa grondstofkosten in Nederland gemaakt, echter de gevolgde methodiek maakt het ook mogelijk om bij een veranderende biomassa grondstof prijs eenzelfde analyse te maken.

De technologieën voor productie en toepassing van hoogwaardige co-producten die naast biobrandstoffen uit biomassa geproduceerd kunnen worden bevinden zich in verschillende stadia van ontwikkeling. Voor een aantal van de co-producten is de technologie voor handen, of kan die naar verwachting relatief snel op grote schaal geïmplementeerd worden. Voorbeelden daarvan zijn ethyleen, BTX, butanol en CO₂. Voor andere co-producten is de technologie voor productie en gebruik nog grotendeels in ontwikkeling. Voorbeelden hiervan zijn fenolvervangers uit lignine en hoogwaardige eiwitten. De marktperspectieven zijn echter voor de meeste co-producten zeer goed te noemen.

Tabel 2. Overzicht van geanalyseerde biobrandstof-coproductie ketens, met toepassingsmogelijkheden voor het co-product en verwachte kostprijsverlaging van de biobrandstof als het gevolg van co-productie.

Biomassa waardeketen	Toepassingen co-product	Verwachte reductie biobrandstofkostprijs door co-productie: (%)
Thermochemische productie ketens		
Fischer-Tropsch diesel + was	Smeermiddelen, coatings	11
Mixed Alcohol + alcoholen	Oplosmiddel, basis chemical	20
Methanol + BTX, ethyleen	Polymeren, basis chemical	19
Synthetic Natural Gas + CO ₂	Industrieel gebruik CO ₂	11
Biochemische productie ketens		
Bioethanol + lignine chemicaliën	Phenolharsen, lijmen, polymeren	35
Biobutanol + butanol, lignine chemicaliën	Phenolharsen, lijmen, polymeren, gebruik CO ₂	30
Bioethanol + eiwitten (agroreststromen)	Hoogwaardige eiwitten (food, feed), gebruik CO ₂	16
Biowaterstof + waterstof, veevoer	Industrieel gebruik H ₂ , CO ₂	53
Andere ketens		
Afvalvetten: biodiesel + chemicaliën*	Epoxyharsen, textiel, papier	18
Ruwe plantaardige olie: biodiesel + chemicaliën*	Epoxyharsen, textiel, papier	12
Microalgen: biodiesel + chemicaliën**, eiwitten	Coatings, hoogwaardige eiwitten	56
Zeewier: ethanol + alginaten	Dehydratatie, farmaciegels, etc.	64

* epichloorhydrine (EPI) uit glycerine

** op lipiden gebaseerde chemicaliën

Gezien het positieve effect dat productie van hoogwaardige co-producten kan hebben op de marktcompetitiviteit (lagere productiekosten) van geavanceerde biobrandstoffen, verdient het aanbeveling om bij invoer van nieuwe stimuleringsmaatregelen ook aandacht te besteden aan het opwaarderen van procesresiduen. Met andere woorden, een nieuw stimuleringsprogramma dat marktintroductie van geavanceerde biobrandstoffen bewerkstelligt zou ook verdere ontwikkeling en implementatie van co-productie van Bio-based Producten (chemicaliën, materialen, veevoer) moeten proberen te stimuleren. Hierbij moeten twee opmerkingen geplaatst worden. Ten eerste bevindt de technologie voor biobrandstofproductie en die voor het opwaarderen van het co-product zich vaak in een verschillend ontwikkelingsstadium. Dit betekent dat de verschillende

ontwikkelingstadiï (lab, pilot, demo en industrieel/toegepast onderzoek) voor de productie van zowel geavanceerde biobrandstoffen als hoogwaardige co-producten naast elkaar ondersteund zouden moeten worden. Een voorbeeld hiervan is een demonstratieproject van een nieuwe biobrandstofproductietechniek, met daarnaast het op pilot-schaal hoogwaardig verwaarden van het daarbij geproduceerde co-product. Ten tweede is het de vraag of bedrijven die zich richten op het verder ontwikkelen en marktintroductie van geavanceerde biobrandstoffen, zich tevens zullen richten op hoogwaardige co-productie Bio-based Producten uit residuen. Het ligt in de lijn van verwachting dat juist clustering van meerdere bedrijven (bijv. biobrandstofproducenten, co-product verwerkers en technologieleveranciers) nodig is om de daadwerkelijke marktimplementatie van hoogwaardige co-productieketens te bewerkstelligen.

Op basis van getoonde resultaten rijst de vraag of Energy-driven (Biofuel-driven) Biorefineries de weg is die bereden moet worden. Alhoewel de productiekosten van de geavanceerde biotransportbrandstoffen dalen door de verwaarding van de Bio-based Producten, waardoor de marktcompetitiviteit wordt bevorderd, zou een Product-driven Biorefinery aanpak e.e.a. mogelijk nog verder verbeteren. Hierbij ligt de focus in eerste instantie op de conversie van biomassa in gewenste Bio-based Producten, waarna residuen zouden kunnen worden aangewend voor de productie van biotransportbrandstoffen, kracht en of warmte. Op deze wijze wordt een groter deel van het “schaarse goed” biomassa benut voor de productie van hoogwaardige toepassingen, waarna de residuen op zo mogelijk relatief eenvoudige wijze kunnen worden benut voor de productie van secundaire energiedragers. Dit pleit op de langere termijn voor een stimuleringskader waarbij de inzet van biomassa voor de productie van Bio-based Producten minimaal gelijkwaardig dient te zijn aan die voor Bioenergie (inclusief transportbrandstoffen) om zodoende een “level playing field” te creëren voor implementatie van biomassa in de diverse marktsectoren van de toekomstige Biobased Economy.

Bronnen

Marktgegevens fossiele brandstoffen:

Eurostat; http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/data/main_tables
Energy Information Agency,
<http://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=WTOTOPEC&f=W>

Marktgegevens biobrandstoffen:

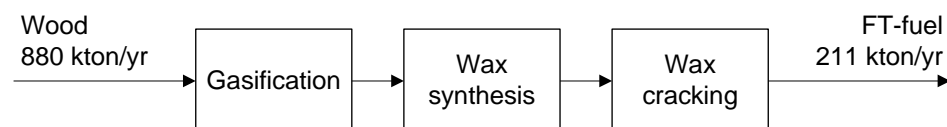
F.O. Licht World Bioethanol and Fuels Newsletter, diverse jaargangen in de periode 2007 - 2010-10-12

Voor gebruikte bronnen t.a.v. informatie over geavanceerde biobrandstofketens en co-producten wordt verwezen naar de Bijlage bij dit rapport

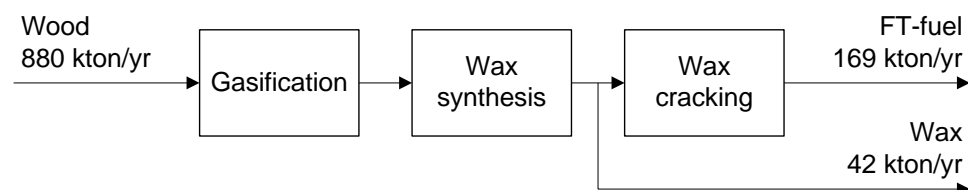
Bijlage: Financieel-economische gegevens van biobrandstofketens

Production of Fischer-Tropsch diesel from lignocellulose

Base case



Biorefinery case



Short description process: Lignocellulosic biomass is gasified with oxygen in an entrained flow gasifier for the production of synthesis gas (a mixture of H₂ and CO). The synthesis gas is cleaned by scrubbing processes and guard beds to remove contaminants that deteriorate the performance of downstream catalytic processes. The cleaned gas is catalytically converted into Fischer-Tropsch wax. The wax is hydrocracked for the production of Fischer-Tropsch fuels. The hydrogen required for cracking the wax is produced in the process. In the biorefinery case, part of the wax is sold as product. The co-production of wax results in a reduction of the amount of Fischer-Tropsch fuels produced.

Wax use and market

The market size for wax is more than 3 million tons/year (Wolfmeier et. al., 2002). This market is supplied both by waxes produced from petroleum and waxes produced from natural products e.g. sugar cane wax. Waxes are used in a wide variety of applications e.g. in paints and coatings, in rubber industry, in adhesives, etc.

Plant size 880 000 ton ds wood/yr

Mass balance

Wood	880 000 ton ds/yr
Fischer-Tropsch fuel	211 418 ton/yr (base case)
Fischer-Tropsch wax (biorefinery case)	169 315 ton/yr (biorefinery case)
	42 284 ton/yr

Economic balance

Investment	340 M€ ^{a)}
Capital costs	67.8 M€/yr ^{b)}
Revenues Fischer-Tropsch wax	42.3 M€/yr ^{c)}

a) Based on costs of mature technology. Cost data from Boerrigter (2006). Costs for 2010 have been assumed 10% higher and an exchange rate of 0.7 €/€ has been used.

b) 0,20 €/€ * yr based on investments. These costs include depreciation (10%), interest (5%) and maintenance and repair (5%).

c) Based on a market value for the wax of 1000 €/ton.

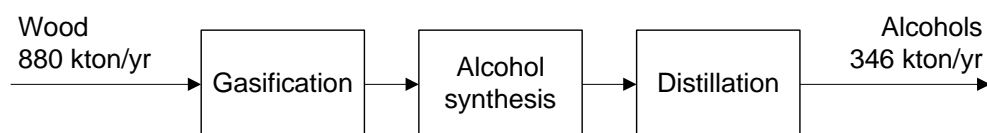
References:

Boerrigter, H. (2006): Economy of Biomass-To-Liquids (BTL) plants; an engineering assessment. Energy research Centre of the Netherlands, Petten, report number, ECN-C—06-019

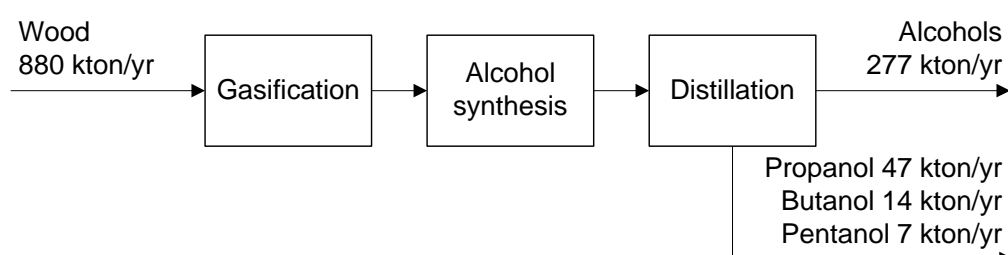
Wolfmeier U. et. al (2002): Waxes. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, John Wiley & Sons Inc., 2010

Production of mixed alcohols from lignocellulose

Base case



Biorefinery case



Short description process: Lignocellulosic biomass is gasified with oxygen in an entrained flow gasifier for the production of synthesis gas (a mixture of H₂ and CO). The synthesis gas is cleaned by scrubbing processes and guard beds to remove contaminants that deteriorate the performance of downstream catalytic processes. The cleaned gas is catalytically converted into mixed alcohols. The catalytic process produces a mixture of methanol, ethanol, propanol, butanol and pentanol. In the base case water is removed from the alcohols by distillation. The alcohols mixture can be used to replace gasoline. In the biorefinery case, propanol, butanol and pentanol are separated from the alcohols mixture and sold as chemicals. The co-production of chemicals results in a reduction of alcohols fuel produced.

Alcohols use and markets

The alcohols (propanol, butanol and pentanol) are used in a wide variety of applications and are produced from petrochemicals. For propanol major applications are solvent and as feedstock for the production of propylacetate and propylamines. The world market for propanol was 63400 ton/year in 1988 (Papa, 2002) and is relatively limited. The world market for butanol is very large, total butanol production exceeded in 1984 1.7 million tonnes/year (Hahn, 2010). Major use of butanol as solvent and plasticizer and in the production of butylacetate, -acrylate and -methylacrylate. The world market for pentanols is very limited. Major use is as solvent and extracting agent.

Plant size 880 000 ton ds wood/yr

Mass balance

Wood	880 000 ton ds/yr
Alcohols as fuel	345 550 ton/yr (base case) 277 477 ton/yr (biorefinery case)
Propanol (biorefinery case)	46 995 ton/yr
Butanol (biorefinery case)	14 168 ton/yr

Pentanol (biorefinery case) 6 911 ton/yr

Economic balance

Investment (base case)	308 M€ ^{a)}
Investment (biorefinery case)	339 M€ ^{b)}
Capital costs (base case)	61.6 M€/yr ^{c)}
Capital costs (biorefinery case)	67.8 M€/yr ^{c)}
Revenues co-products:	
- Propanol	42.3 M€/yr ^{d)}
- Butanol	12.8 M€/yr ^{d)}
- Pentanol	6.2 M€/yr ^{d)}

a) Based on costs of mature technology for Fischer-Tropsch fuels from biomass. Cost data from Boerrigter (2006). Costs for 2010 have been assumed 10% higher and exchange rate of 0.7 €/€ has been used. Costs for the production of mixed alcohols have been assumed to be 10% lower since process requires less process steps.

b) Investments in the biorefinery case are estimated to be 10% higher due to more complex lay-out of the distillation section for separation of the alcohols

c) 0,20 €/€ * yr based on investments. These costs include depreciation (10%), interest (5%) and maintenance and repair (5%).

c) Based on a market value for the the alcohols of 900 €/ton.

References:

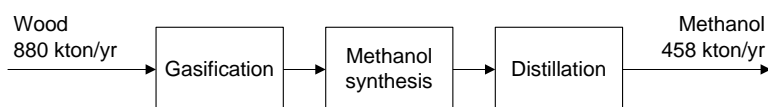
Boerrigter, H. (2006): Economy of Biomass-To-Liquids (BTL) plants; an engineering assessment. Energy research Centre of the Netherlands, Petten, report number, ECN-C—06-019

Hahn H.D. (2010): Butanols. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, John Wiley & Sons Inc., 2010

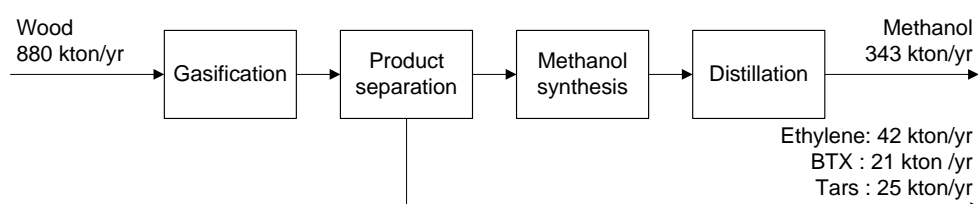
Papa, A.J. (2002): Propanols. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, John Wiley & Sons Inc., 2010

Production of methanol from lignocellulose

Base case



Biorefinery case



Short description process: The feedstock, wood, is gasified in an indirect gasifier. The synthesis gas is cleaned by scrubbing processes and guard beds to remove contaminants to the level required by the catalyst used for methanol synthesis. The clean gas is in a catalytic process converted into methanol. Methanol and water are separated by distillation. The gas produced by indirect gasification contains a lot of valuable hydrocarbon products. In the base case these are converted into synthesis gas. In the biorefinery case, the hydrocarbon products are removed from the gas by scrubbing (BTX and tars) and cryogenic distillation (ethylene).

By products use and world market:

The by-products replace petrochemical products. Ethylene, benzene, toluene and xylenes belong to the base petrochemicals with a large world market. The world market for ethylene is very large with over 100 million tons/year (Zimmermann and Walzl, 2009). Major use of ethylene is for the production of polyethylene, ethyleneoxide and ethylenedichloride. The total market for benzene, toluene and xylenes exceeds 40 million tons/year. Major use of benzene is in the production ethylbenzene, cumene and cyclohexane. For toluene major applications are use as solvent and as feedstock for toluene diisocyanate and phenol. Xylenes are predominantly used as solvent and as extracting agents. A market for biomass tars is not developed yet. In principle the market for biomass tars can be similar to the market for coal tars. The market for coal tars is huge and amount over 30 million tons/year (Collin and Höke, 2000). Similar to coal tar a wide range of different products can be extracted for biomass tars.

Plant size 880 000 ton ds wood/yr

Mass balance

Wood	880 000 ton ds/yr
Methanol	458 484 ton/yr (base case) 343 863 ton/yr (biorefinery case)
Ethylene (biorefinery case)	42 240 ton/yr
Benzene, toluene, xylene (biorefinery case)	21 051 ton/yr

Tars (biorefinery case) 25 537 ton/yr

Economic balance

Investment (base case)	308 M€ ^{a)}
Investment (biorefinery case)	339 M€ ^{b)}
Capital costs (base case)	61.6 M€/yr ^{c)}
Capital costs (biorefinery case)	67.8 €/yr ^{c)}
Revenues co-products:	
- Ethylene	42.2 M€/yr ^{d)}
- BTX	15.6 M€/yr ^{e)}
- Tars	6.4 M€/yr ^{f)}

a) Based on costs of mature technology for Fischer-Tropsch fuels from biomass. Cost data from Boerrigter (2006). Costs for 2010 have been assumed 10% higher and exchange rate of 0.7 €/€ has been used. Costs for the production of methanol have been assumed to be 10% lower since process requires less process steps.

b) Investment costs are estimated to be 31 M€ higher due to equipment needed for separation of the co-products. Additional investments have been estimated base on detailed in-house engineering study by ECN.

c) 0,20 €/€ * yr based on investments. These costs include depreciation (10%), interest (5%) and maintenance and repair (5%).

d) Based on a market value for ethylene of 1000 €/ton.

e) Based on a market value for BTX of 750 €/ton

f) based on a market value for tars of 250 €/ton

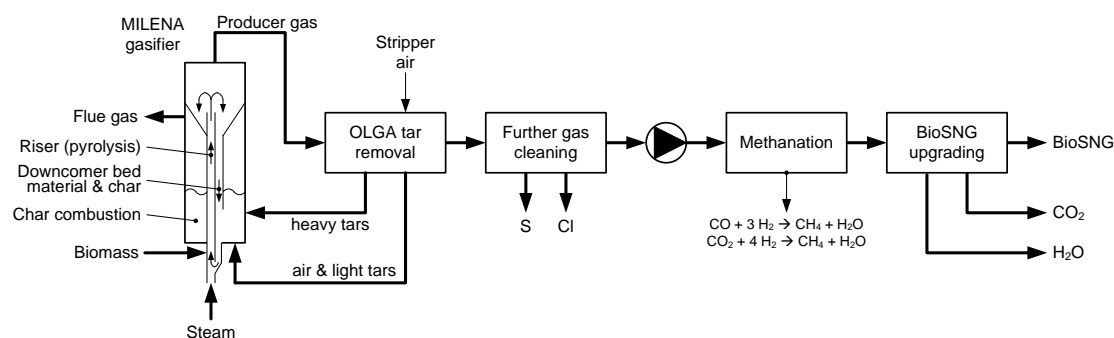
References:

Boerrigter, H. (2006): Economy of Biomass-To-Liquids (BTL) plants; an engineering assessment. Energy research Centre of the Netherlands, Petten, report number, ECN-C—06-019

Collin, G. and Höke, H. (2000): Tar and Pitch. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, John Wiley & Sons Inc., 2010

Zimmermann, H. and Walzl, R. (2009): Ethylene. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, John Wiley & Sons Inc., 2010

Synthetic Natural Gas (SNG) uit lignocellulose biomassa



Short description process: The use of the MILENA indirect gasification concept is foreseen within the BioSNG production plant. This gasification concept produces a N₂-lean mid-calorific producer gas with a high inherent methane concentration. The latter also implies a high inherent tar concentration; these are removed using OLGA scrubbing technology and fed back to the combustion zone of the gasifier. The methanation of producer gas takes place after further gas cleaning and compression. Downstream of a separation step CO₂, water and SNG are the remaining products.

Plant size (input) 500 MW_{th} (LHV, wet-basis)

Mass balance

Woody biomass (25% moisture)	135 ton/h (wet-basis)
SNG	10,000,000 GJ/yr
CO ₂	650 kton/yr

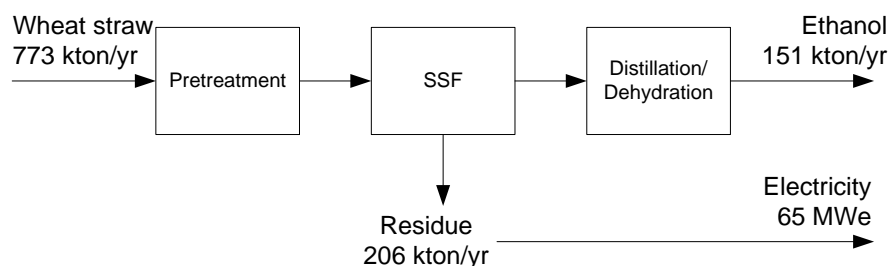
Economics

ISBL	139.5 M€
OSBL	61.4 M€
Indirect costs	55.8 M€
Working capital	30.7 M€
Start-up costs	22.3 M€
Total Capital Investment (TCI)	309.6 M€
Annualized TCI (depreciation 10 yrs, 5% interest)	40.1 M€/yr
Variable costs	19.2 M€/yr
Fixed costs	7.0 M€/yr
Total annual costs	66.3 M€/yr

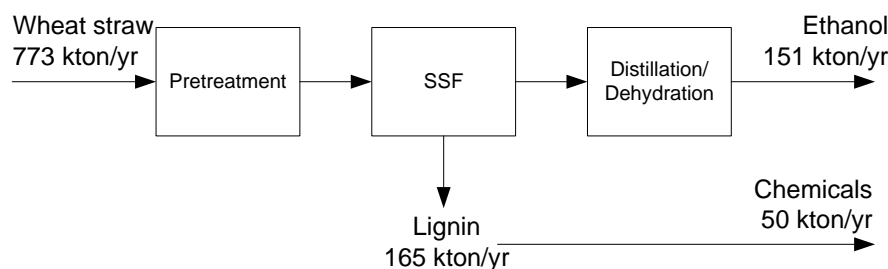
Please note that CO₂ credits for CO₂ emission reduction by replacing fossil natural gas with BioSNG have not been taken into account in the final cost analysis.

Bioethanol from lignocellulose

Base case



Biorefinery case



Short description process:

Wheat straw is converted into bioethanol via a process that includes pretreatment, enzymatic hydrolysis, and fermentation. The developed process concept converts straw into fuel grade ethanol, electricity and heat and does not make use of external energy sources. Via thermal mild acid pre-treatment and enzymatic (pre)hydrolysis sugars are produced from hemi-cellulose and cellulose, the major components of straw.

Both the C5 and C6 sugars produced are co-fermented to ethanol by a genetically modified yeast strain. The ethanol is subsequently purified by distillation, rectification and dehydration. A residue, that contains mainly lignin, minerals and unhydrolyzed sugar polymers and oligomers, is dewatered and combusted in a CHP unit to generate heat for the production process and electricity. The effluent is treated by anaerobic digestion to yield biogas, which is used to produce additional electricity.

Lignin products

In the biorefinery case lignin is generated from the non-fermentable residue, to produce phenols. Phenols are utilised for production of resins, glues and polymeres. The current size of total world market for phenols is estimated at 4 to 5 Mton/yr

Plant size 151 000 ton/yr bioethanol (99.7 vol-%)

Mass balance

Straw 880 000 ton ds/yr
 Bioethanol 151 000 ton/yr (base case; biorefinery case)

Lignin residu (base case)	206 000 ton/yr
Lignin products (biorefinery case)	50 000 ton/yr

Economic balance

Investment	319 M€ ^{a)}
Capital costs	34.2 M€/yr ^{a)}
Operating costs	41.8 M€/yr ^{a,b)}
Feedstock costs @ 38.5 €/ton	26.6 M€/yr
Revenues electricity (base case)	10.0 M€/yr ^{c)}
Revenues CO ₂ (biorefinery case)	8.8 M€/yr ^{d)}

Revenues Lignin products (biorefinery case)	50 M€/yr ^{e)}
---	------------------------

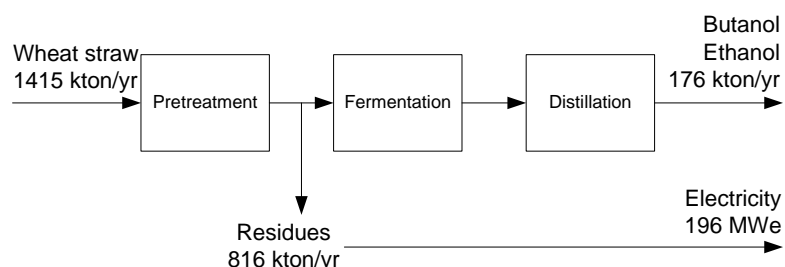
- a) Data taken from EET K0116 Bioethanol/lactic acid project;
- b) Including costs of straw @ 38.5 €/ton
- c) Based on electricity price of 0.05 €/kWh
- d) Based on industrial market value for CO₂ of 65 €/ton
- e) Based on a market value for lignin chemicals of 800 €/ton, and yield of 0.3 kg lignin products/ kg of lignin residu. Costs exclude upgrading costs for lignin estimated at 250 €/ton

References:

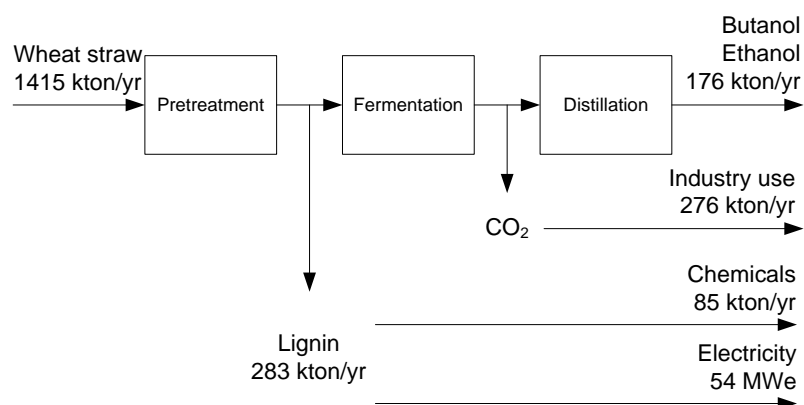
ECN (2007) EET K01116 public summary, ECN-E--07-045. J.H. Reith, H. den Uil, H. van Veen, W.T.A.M. de Laat, J.J. Niessen, E. de Jong, H.W. Elbersen, R.Weusthuis, J.P. van Dijken & L. Raamsdonk. 2002. Co-production of bio-ethanol, electricity and heat from biomass residues, 2002. In: Proceedings of the 12th European Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 17 -21 June 2002, Amsterdam, The Netherlands. 1118 – 1123 / ECN-RX--02-030, July 2002.

Biobutanol from lignocellulose

Base case



Biorefinery case



Short description process: Wheat straw is converted into ABE (acetone, butanol, ethanol) via a process that includes pretreatment, enzymatic hydrolysis, and fermentation. During fermentation, ABE products are removed through in-situ product removal, and upgraded. Process residues are converted into heat and electricity by a CHP unit. Soluble organic residues and gaseous byproducts are converted into biogas in a anaerobic digestion plant

Coproduct use

In the biorefinery case lignin is generated from the non-fermentable residue, to produce phenols. Phenols are utilised for production of resins, glues and polymeres. As a result of this co-product use, the electricity generated is reduced to 54 MWe . In addition, pure CO₂, a by-product from ABE fermentation is marketed and sold for industrial utilisation. Furthermore, in the biorefinery case 25% of the produced butanol is marketed and sold as platformchemical.

Plant size 176 000 ton/yr ABE products

Mass balance

Straw 1 415 000 ton dry matter/yr

Butanol	100 000 ton/yr (base case)
Ethanol	17 000 ton/yr
Acetone	50 000 ton/yr
CO ₂	276 000 ton/yr
Hydrogen	8 100 ton/yr
Solid residue	816 000 ton/yr
Lignin products	85 000 ton/yr (biorefinery case)
Economic balance	
Investment	437 M€ ^{a)}
Capital costs	52 M€/yr ^{a)}
Operating costs	49.2 M€/yr ^{a,b)}
Feedstock costs @ 38.5 €/ton	56.6 M€/yr
Revenues electricity (base case)	54 M€/yr ^{c)}
Revenues Lignin products	68 M€/yr ^{d)} (biorefinery case)
Revenues CO ₂	17.9 M€/yr ^{e)} (biorefinery case)
Revenues Butanol as platformchemical	22.5 M€/yr ^{f)} (biorefinery case)

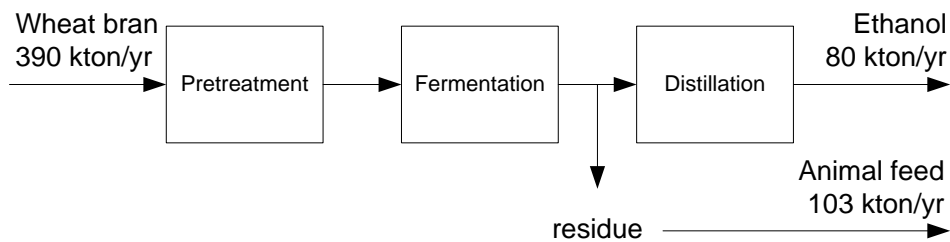
- a) Data taken from EOS 02036 Biobutanol project
- b) Excluding cost of the feedstock
- c) Based on electricity price of 0.05 €/kWh
- d) Based on a market value for lignin chemicals of 800 €/ton, and yield of 0.3 kg lignin products/ kg of lignin residu. Costs exclude upgrading costs for lignin estimated at 400 €/ton
- e) Based on industrial market value for CO₂ of 65 €/ton
- f) Based on market value of butanol as platformchemical of 900 €/ton

Source:

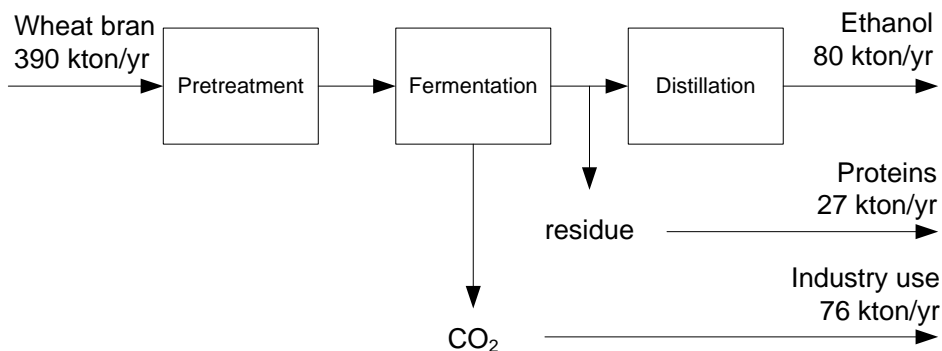
Public Summary, EOS 02036 Biobutanol project, [www. Biobutanol.nl](http://www.Biobutanol.nl); Lopez-Contreras, A. Et al, Production of longer-chain alcohols from biomass-butanol, isopropanol and 2,3-butanediol in : Bioalcohol Production: Biochemical conversion of Lignocellulosic biomass, Ed. By K.W. Waldron, Woodhead Energy Series No 3.(2010)

Bioethanol from agro side-streams

Base case



Biorefinery case



Short description process:

Wheat bran, a dry byproduct from the production of flour from wheat grain, is converted into bioethanol by a process that includes enzymatic hydrolysis, fermentation, and distillation. Both the C5 and C6 sugars produced are co-fermented to ethanol by a genetically modified yeast strain. A solid residue, that contains mainly fibres and protein, is generated and sold as animal feed.

Co-product use:

In the biorefinery case, a high value animal feed protein is isolated and upgraded. In addition, pure CO₂, a byproduct produced during fermentation, is collected and sold for other industrial purposes

Plant size 80 kton/yr bioethanol (99.7 vol-%)

Mass balance

Wheat bran (88% dry matter) 390 000 ton ds/yr

Bioethanol	79 900 ton/yr
Solid residu (base case)	103 000 ton/yr
Protein yield (biorefinery case)	34 000 ton/yr
CO ₂	76 800 ton/yr

Economic balance

Investment	80 M€ ^{a)}
Capital costs	16.0 M€/yr ^{b)}
Operating costs	10.5 M€/yr ^{c)}
Feedstock costs at 70 €/yr	24 M€/yr
Revenues animal feed (base case)	7.7 M€/yr ^{d)}
Revenues CO ₂	5.0 M€/ yr ^{e)}
Revenues protein (biorefinery case)	24 M€/yr ^{f)}

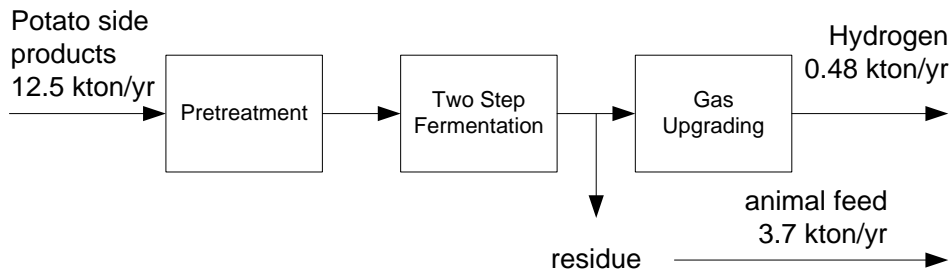
- a) Capital investment estimated at 800 €/m³ ethanol installed capacity
- b) Capital costs 20% per year of capital investment cost
- c) Operating costs 105 €/m³ ethanol excluding costs of wheat bran
- d) Based on a market value for animal feed of 75 €/ton
- e) Based on industrial market value for CO₂ of 65 €/ton
- f) Based on 17.3% protein content in wheat bran, and yield of 0.5 kg animal feed protein/ kg of total protein. Revenues based on animal protein market value of 750 €/ton excluding upgrading costs for protein which are estimated at 500 €/ton

References:

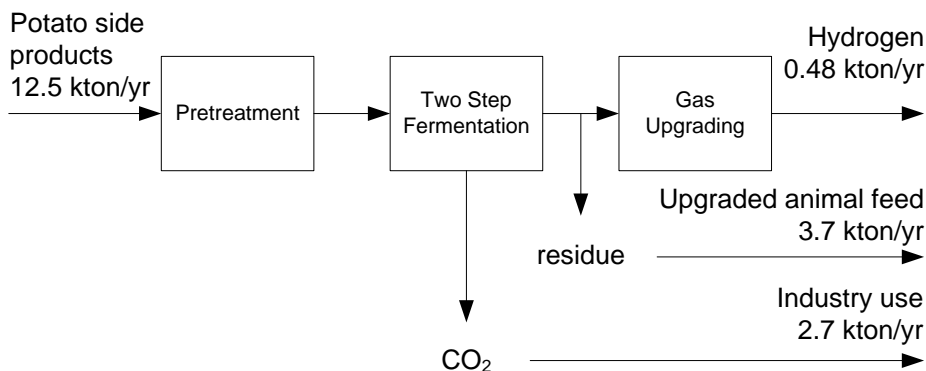
ECN-E--07-045 (2002). J.H. Reith, H. den Uijl, H. van Veen, W.T.A.M. de Laat, J.J. Niessen, E. de Jong, H.W. Elbersen, R. Weusthuis, J.P. van Dijken & L. Raamsdonk. Co-production of bio-ethanol, electricity and heat from biomass residues. In: Proceedings of the 12th European Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 17 -21 June 2002, Amsterdam, The Netherlands. 1118 – 1123 / ECN-RX--02-030, July 2002.

Bio-hydrogen from agro-residues

Base case



Biorefinery case



Short description process:

Potato steam peels, a wet byproduct from the production of french fries from potatoes, are converted into biohydrogen by a process that includes enzymatic hydrolysis, two-step fermentation, and gas upgrading. The process concept is based on a decentral production system that produces 60 kg of hydrogen per year; equivalent to 2 MW.

Both the C5 and C6 sugars produced are co-fermented to hydrogen in a two step fermentation process. The produced gas is upgraded to fuel-grade hydrogen. A solid residu, which contains mainly fibres and protein, is generated and sold as wet animal feed.

Co-product use:

In the biorefinery case the solid residu is upgraded to a higher value animal feed. Pure CO₂, produced during fermentation, is collected and sold for us by the industry. In addition, 25% of produced hydrogen is marketed as platformchemical.

Plant size 2 MW

Mass balance

Potato steam peelings	93 000 ton/yr (13.4% dry matter)
Bio-hydrogen	480 ton/yr (base case; biorefinery case)
Animal feed	3 737 ton d.m./yr (base case; biorefinery case)

CO ₂	2 729 ton/yr ^{a)}
Economic balance	
Investment	11.45 M€
Capital costs	1310 k€/yr
Operating costs excluding feedstock costs	1301 k€/yr
Feedstock costs @ 30 €/ton d.m.	373.9 k€/yr
Revenues animal feed	186.9 k€/yr (base case) ^{b)}
	262.0 k€/yr (biorefinery case) ^{b)}
Revenues CO ₂	176.8 k€/yr ^{c)}
Revenues H ₂ as platformchemical	1440 k€/yr ^{d)}

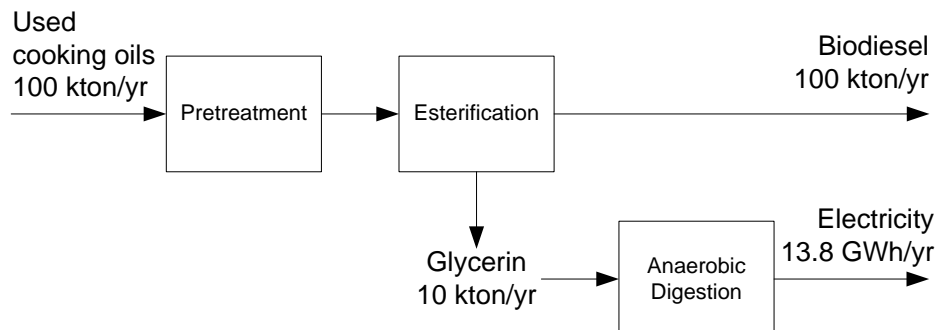
- a) 5.67 kg CO₂ for kg of hydrogen produced
- b) Based on animal feed values of 30 and 100 €/ton for base case and biorefinery case, respectively. Revenues upgraded animal feed include cost of 30 €/kg for upgrading
- c) Market value pure CO₂ 65 €/ton
- d) Market value H₂ as platform chemical 12€/kg

References:

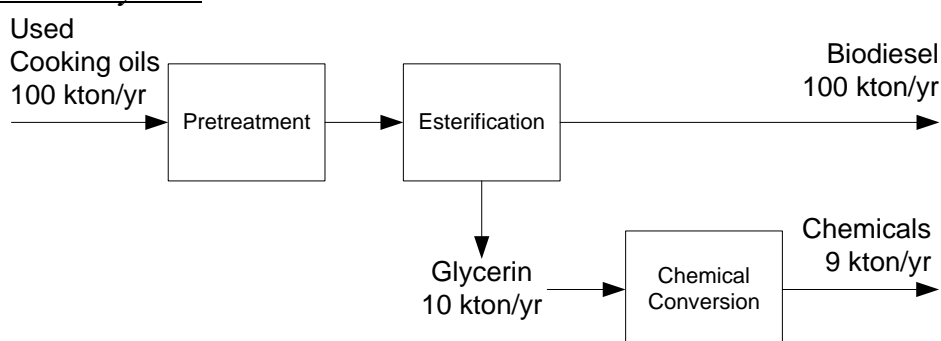
Hyvolution project www.hyvolution.nl ; Ljunggren, M. and G. Zacchi (2009), Techno-Economic Evaluation of an Integrated Biological Hydrogen and Methane Production Process, Conference proceedings 17th European Biomass Conference & Exhibition; Foglia, D et al, (2009) Impact of Process Integration on a Two-Stage Fermentation Process for the Production of Biohydrogen, Conference proceedings 17th European Biomass Conference & Exhibition; Biohydrogen EET project www.Biohydrogen.nl

Bio-diesel from waste cooking oils

Base case



Biorefinery case



Short description process:

Waste cooking oils are converted into biodiesel by a trans-esterification process. During the process, crude glycerine is produced as byproduct. In the base case, crude glycerine is used as feedstock for biogas generation, for electricity generation.

Co-product use:

In the biorefinery case, glycerine is refined and used converted to epichlorhydrine. Epichlorhydrine is a high volume commodity chemical that is largely used in the production of epoxy resins.

Plant size 100 kton/yr waste cooking oils(d.m.)

Mass balance

Waste cooking oils 100 000 ton/yr (100% dry matter)

Biodiesel 100 000 ton/yr (100 v/v% basis)

Glycerine 10 000 ton/yr (dry matter; 85% purity)

Electricity yield (base case) 13 800 MWh/yr

Epichlorhydrine (biorefinery case) 9 000 ton/yr

Economic balance

Investment	20.0 M€ ^{a)}
Capital costs	4.0 M€/yr
Operating costs excluding feedstock costs	20.96 M€/yr
Feedstock costs @ 150 €/ton oil	15 M €/yr
Costs refining glycerine (biorefinery case)	150 k€/ton
Revenues electricity (base case)	0.7 M€/yr ^{c)}
Revenues epichlorhydrine (biorefinery case)	11 M€/yr ^{d)}

- a) Capital expenses for biodiesel assumed similar to rapeseed biodiesel; 200 €/ton biodiesel installed capacity
- b) Operating cost conversion based on 84.6 euro/ton biodiesel plus upgrading costs for waste cooking oil of 100 euro/ton; Operating exclude feedstock costs
- c) Based on electricity from biogas yield glycerine of 1380 KWhr/ton glycerine ; electricity price 0.05 €/kW
- d) Based on market price Epichlorhydrine of 1250 €/ton

References:

Dobbelaere, S (2010), Biorefining Opportunities in the Biodiesel Sector, EC FP7 Bioref Integ project. Senternovem, Eindrapport "Bundeling van de resultaten mestvergistingsprojecten van de ROB-subsidieregeling, 2008

Bio-diesel from crude Rapeseed oil

Short description process:

Crude rapeseed oil is converted into biodiesel by a trans-esterification process. During the process, crude glycerine is produced as byproduct. In the base case, crude glycerine is used as feedstock for biogas generation, for electricity generation. In the biorefinery case, glycerine is refined and used converted to epichlorhydrine.

Plant size 100 kton/yr rapeseed oil (d.m.)

Mass balance

Crude rapeseed oil 100 000 ton/yr (100% dry matter)

Biodiesel 100 000 ton/yr (100 v/v% basis)

Glycerine 10 000 ton/yr (dry matter; 85% purity)

Electricity yield (base case) 13 800 MWh/yr

Epichlorhydrine (biorefinery case) 9 000 ton/yr

Economic balance

Investment 20.0 M€^{a)}

Capital costs 4.0 M€/yr

Operating costs excluding feedstock costs 8.46 M€/yr

Feedstock costs @ 640 €/ton d.m. 64.0 M€/yr

Costs refining glycerine (biorefinery case) 150 k€/ton

Revenues electricity (base case) 0.7 M€/yr^{c)}

Revenues epichlorhydrine (biorefinery case) 11 M€/yr^{d)}

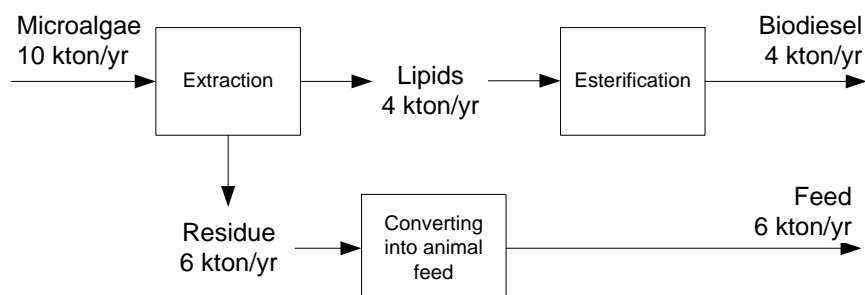
- a) Capital expenses for biodiesel assumed 200 €/ton biodiesel installed capacity
- b) Operating cost conversion based on 84.6 euro/ton biodiesel; Operating costs exclude feedstock costs
- c) Based on electricity from biogas yield glycerine of 1380 KWhr/ton glycerine ; electricity price 0.05 €/kW
- d) Based on market price Epichlorhydrine of 1250 €/ton

References:

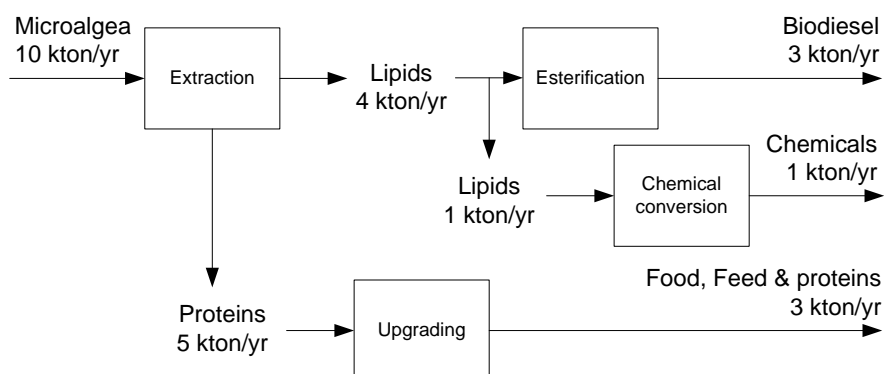
Dobbelaere, S (2010), Biorefining Opportunities in the Biodiesel Sector, EC FP7 Bioref Integ project.. Senternovem, Eindrapport "Bundeling van de resultaten mestvergistingsprojecten van de ROB-subsidieregeling, 2008

Biodiesel from MicroAlgae

Base case



Biorefinery case



Short description process:

The developed process concept converts microalgae into biodiesel, by extracting lipids.

In the base case a solid residue, that contains mainly fibres and protein, is generated and sold as animal feed

In the biorefinery case, 25% of the produced lipids are converted to chemicals, 75% to biofuels.

In addition, the protein fraction in the algae is upgraded to a combination of food-grade (20%) and animal feed-grade (80%) protein at market values of 2000 and 750 €/ton respectively. We assume that microalgae contain 40% lipids.

Plant size 10 kton microalgae/yr

Mass balance

Microalgae 10 000 ton/yr (100% dry matter)

Bio-diesel 4 000 ton/yr (100 v/v% basis)

Bio-diesel (biorefinery case) 3 000 ton/yr (100 v/v% basis)

Animal feed 6 000 ton d.m./yr (base case)

Chemicals (biorefinery case) 1 000 ton/yr

Total protein yield (biorefinery case) 3 000 ton/yr

Economic balance

Investment 1.6 M€ ^{a)}

Capital costs	320 k€/yr ^{b)}
Operating costs excluding feedstock costs	338 k€/yr ^{c)}
Feedstock costs @ 400 €/ton d.m.	4.0 M€/yr ^{d)}
Revenues animal feed	500 k€/yr (base case) ^{e)}
Revenues chemicals	2.0 M€
Revenues protein	4.3 M€ ^{f)}

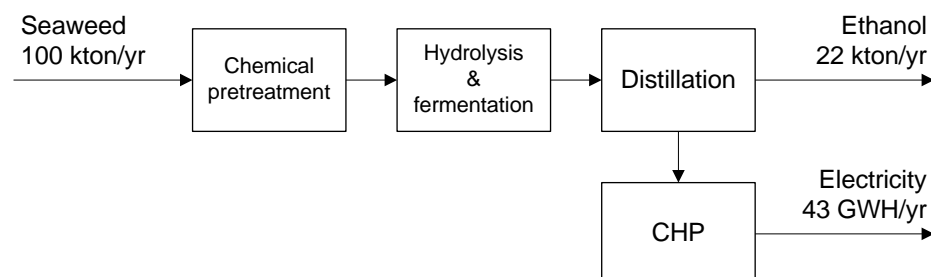
- a) investment in conversion facility assumed twice that of biodiesel from plant oil facility. Capacity plant is 4 000 ton lipids per year. At algae yields of 40 - 80 tons d.m. per year, this is equivalent to a 125 to 250 ha algae facility Based on animal feed values of 30 and 100 €/ton for base case and biorefinery case, respectively. Revenues upgraded animal feed include cost of 30 €/kg for upgrading
- b) 10% depreciation, 5% maintenance + repair, 5% interest
- c) Operating cost conversion based on 84.6 euro/ton biodiesel for conversion of plant oils; Operating costs exclude the costs of algae
- d) Assumed cost of 100 ha facility that is possible in future: 0.4 €/kg (10% of current cost)
- e) Based on animal feed price of 75 €/ton dry matter
- f) Based on food protein price of 2000 euro/ton dry matter and animal feed protein price of 750 euro/ton dry matter. Revenues exclude upgrading costs of 500 keuro/ton raw protein

References:

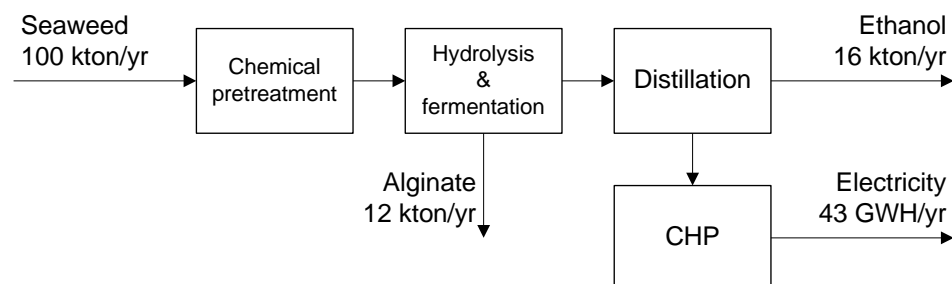
Dobbelaere, S, (2010) Biorefining Opportunities in the Biodiesel Sector, WC FP7 Bioref Integ project. Wijffels R.H, M.J. Barbosa, and M.H.M Eppink (2010), Microalgae for the productions of bulk chemicals and biofuels, Biofuels Bioproducts and Biorefining 4:2, 287-295. Barbosa (2010), Marine Biorefinery, presentation for Bioref Integ/IEA Task 42 Training course, Amsterdam, 2010.

Bioethanol from Seaweed (macro-algae)

Base case



Biorefinery case



Short description process: Seaweed biomass is cultivated offshore in the North Sea in wind turbine parks, harvested and transported to an ethanol production factory on land including sections for distillation and dehydration of the ethanol. In the plant the seaweed biomass is subjected to pre-treatment and enzymatic hydrolysis and the resulting sugars are fermented to ethanol, which is distilled and dehydrated to 99.7 vol%. Non-fermentable residues are dewatered and dried and combusted for heat and electricity generation. The heat is used in the ethanol plant (e.g. for distillation) and the surplus electricity is delivered to the grid. In the biorefinery case alginates are extracted from the seaweed biomass during pre-treatment and purified and marketed separately. The remainder of the seaweed biomass is used for ethanol and electricity production. Because the sugars from the extracted alginates are not available for fermentation this option leads to a lower ethanol production.

Alginates use and market

Alginates can be applied as coatings and fillers for paper, textiles and plastics, ingredient for food, cosmetics and personal care products, medicinal products, flocculants, foils etc. As such they can partly substitute petrochemical chemicals and materials.

In addition alginates can be hydrolyzed and chemically converted e.g. to furanics that can be used to synthesize biopolymers to substitute petrochemical plastics. An alternative is the fermentation of monomers derived from alginates to chemical building blocks such as lactic acid or succinate for application in solvents (lactic acid) and bioplastics. These applications all have a large market potential. Finally, other products can be derived from seaweed biomass as well such as proteins or mineral products with large market outlets.

Plant size 100 000 ton ds seaweed/yr

Mass balance

Seaweed 100 000 ton d.w./year

Ethanol (base case) 21 600 ton/yr

Ethanol (biorefinery case) 16 425 ton/yr

Electricity 42 556 MWh/yr

Alginates (biorefinery case) 11 500 ton d.w./yr

Economic balance

Investment 71 M€ ^{a)}

Capital costs 14.2 M€/yr ^{b)}

Running costs 4.5 M€/yr ^{c)}

Revenues electricity 2.1 M€/yr ^{d)}

Revenues alginates (biorefinery case) 17.3 M€/yr ^{e)}

a) Based on cost estimate for ethanol plant for lignocellulosic biomass s of mature technology. (Reith et. al., 2002)

b) 0,20 €/€ * yr based on investments. These costs include depreciation (10%), interest (5%) and maintenance and repair (5%).

c) The indicated running costs exclude feedstock costs. Included are chemicals, enzymes, maintenance, labour (Reith et.al., 2002).

d) Electricity market value 50 Euro/MWh

e) Market value alginates put at 1500 Euro/ton (Reith et. al. , 2005)

References:

- J.H. Reith, H. den Uil, H. van Veen, W.T.A.M. de Laat, J.J. Niessen, E. de Jong, H.W. Elbersen, R.Weusthuis, J.P. van Dijken & L. Raamsdonk. 2002. Co-production of bio-ethanol, electricity and heat from biomass residues, 2002. In: Proceedings of the 12th European Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 17 -21 June 2002, Amsterdam, The Netherlands. 1118 – 1123 / ECN-RX-02-030, July 2002.
- Reith, J.H., E.P. Deurwaarder, K. Hemmes, A.P.W.M. Curvers, P. Kamermans, W. Brandenburg, G. Zeeman, 2005. Bio-offshore; grootschalige teelt van zeewieren in combinatie met offshore windparken in de Noordzee. ECN rapport C-05-008