

## Woord vooraf

Deze masterproef vormt het sluitstuk van mijn academische opleiding tot Master TEW met afstudeerrichting Innovatie & Ondernemen, aan de Universiteit Hasselt. Dit eindwerk heeft veel tijd en energie geveerd van mezelf, maar ook van een aantal mensen die ik via deze weg graag zou bedanken.

Mijn dank gaat vooreerst uit naar mijn promotor Prof. dr. Ghislain Houben voor zijn begeleiding en advies. Zijn raad en feedback hebben het voor mij mogelijk gemaakt om deze masterproef naar een hoger niveau te tillen. Bovendien hebben zijn inzichten en boeiende lessen mijn interesse in innovatie & ondernemen verder aangewakkerd.

Daarnaast zou ik graag de experts willen bedanken die ik heb mogen interviewen. Zij hebben met hun kennis elk hun deel bijgedragen aan mijn mogelijkheden om deze masterproef tot een goed einde te brengen. Zij hebben zonder wederdienst hun tijd beschikbaar gesteld en veel moeite gedaan om mij zo goed mogelijk verder te helpen.

Tenslotte zou ik graag mijn familie en vrienden bedanken, die mij altijd moreel ondersteund hebben. Dit niet enkel tijdens het schrijven van mijn masterproef, maar tijdens mijn gehele opleiding.

Marnix Van Looy  
Diepenbeek, mei 2015



# Samenvatting

Fossiele brandstoffen zijn wereldwijd nog steeds de meest gebruikte soorten brandstoffen. Hoewel het gebruik van fossiele brandstoffen heel wat nadelen met zich meebrengt, blijft de vraag stijgen. Daarnaast zijn fossiele brandstoffen uitputbaar, wat de nood aan alternatieven alleen maar doet toenemen. Fruitresten lijken mogelijk gebruikt te kunnen worden als grondstof voor brandstofproductie. In deze masterproef zal onderzocht worden of het economisch haalbaar is om fruitresten te gebruiken als brandstof.

Om dit onderzoek te kunnen uitvoeren, moet er eerst een overzicht gegeven worden van wat een brandstof nu net is, en welke soorten er allemaal bestaan. In hoofdstuk twee wordt er eerst en vooral een overzicht gegeven van de soorten brandstoffen, gebaseerd op de werken van Astbury en Rashad & Hamad. Zij verdelen alle soorten brandstoffen in drie categorieën, namelijk organische brandstoffen, anorganische brandstoffen en kernbrandstoffen. Vervolgens wordt er door een uitgebreide literatuurstudie een overzicht gegeven van de kenmerken van een brandstof. De soorten brandstoffen kunnen dan in tabel vijf met elkaar vergeleken worden aan de hand van de eerder besproken kenmerken. Om een goed beeld te kunnen vormen van de huidige situatie wordt er, aan de hand van de gegevens van het Internationale Energie Agentschap, een overzicht weergegeven van het wereldwijde aanbod van en de wereldwijde vraag naar de verschillende soorten brandstoffen. Vervolgens wordt er per brandstof gekeken naar de verschillende toepassingen waarvoor ze vandaag gebruikt worden. Hoofdstuk twee wordt afgesloten met een vergelijking tussen de twee meest verwachte toekomstscenario's. Het New Policies Scenario (NPS) houdt rekening met de doorvoering van de beleidsmaatregelen die vandaag op tafel liggen. Aan de hand van de veronderstelling dat dit de maatregelen zijn die genomen zullen worden, voorspelt het NPS de evolutie in de wereldwijde brandstofproductie en -consumptie. Dit scenario wordt vergeleken met het 450 Scenario (450S). Bij dit scenario wordt gerekend op de vereiste beleidsmaatregelen om de globale gemiddelde temperatuurstijging te beperken tot 2°C. 450 staat voor het doel om op lange termijn de uitstoot van broeikasgassen te beperken tot 450 PPM (Parts Per Million) CO<sub>2</sub>-equivalent.

Vervolgens zal er in hoofdstuk drie een uitgebreid overzicht gegeven worden van de brandstoffen waarvan verwacht wordt dat ze een belangrijke rol van betekenis zullen spelen in de nabije toekomst. Uit een uitgebreide literatuurstudie blijkt dat de volgende brandstoffen en technieken momenteel het meeste toekomstpotentieel bezitten: bio-ethanol, methanol, natuurlijk gas, LPG, waterstof, afvalsolventen, chemische brandstoffen, rubberkrumels, afvaloliën, biomassa in het algemeen, van gas voorziene vaste stoffen, modder uit riolen, glycerol, biodiesel en CTL (Coal To Liquid). Van elke soort zal een beknopte beschrijving gegeven worden, en de voor- en nadelen zullen opgesomd worden.

Het vierde hoofdstuk van deze masterproef omvat het empirisch onderzoek naar de mogelijkheid om fruitresten te gebruiken als brandstof. Eerst wordt er een verkennende literatuurstudie beschreven die de belangrijkste concepten, begrippen en technieken definieert. Zo wordt er voor

het empirisch onderzoek vertrokken van het door Rosentrater beschreven concept van industriële symbiose. Er is sprake van industriële symbiose wanneer het afval van het ene bedrijf als grondstof wordt gebruikt door een ander bedrijf. Wanneer fruitresten gebruikt worden als brandstof, is dit het geval. Uit het empirisch onderzoek door middel van interviews met experts zal er een overzicht gegeven worden van de verschillende mogelijke manieren waarop fruitresten vandaag in België verwerkt worden of zouden kunnen worden. Fruitresten worden vooral gebruikt als bodemverbeteraar, of ze worden verwerkt tot veevoeding. Daarnaast zullen twee mogelijke manieren besproken worden die technisch haalbaar zijn, om fruitresten als brandstof te gebruiken. De eerste manier is vergisting, wat biogas oplevert dat kan omgezet worden in elektriciteit of kan opgewaardeerd worden tot aardgas. Beide toepassingen zullen uitgebreid toegelicht worden, en de economische haalbaarheid en de voor- en nadelen zullen besproken worden. De tweede manier, het pelletiseren van fruitresten, wordt niet toegepast in de praktijk, maar is technisch wel mogelijk. Pellets kunnen verbrand worden om op die manier energie te genereren. Er zal een uitgebreide analyse gemaakt worden van dit proces van pelletiseren en van de redenen waarom het economisch niet rendabel blijkt te zijn. Hoofdstuk vier zal worden afgerond met een gedetailleerde analyse van de rendabiliteit van de manieren om fruitresten te gebruiken als brandstof, en van de vereisten die rendabel zijn met zich meebrengt.

Tenslotte zijn in hoofdstuk vijf de conclusies en verdere aanbevelingen van deze masterproef opgenomen.

# Inhoudsopgave

Woord vooraf .....	1
Samenvatting.....	3
Hoofdstuk 1: Methodologie .....	7
1.1 Probleemstelling.....	7
1.2 Centrale onderzoeksvraag en deelvragen.....	12
1.2.1 Wat is een brandstof en welke soorten bestaan er? .....	12
1.2.2 Welke zijn de huidige en toekomstige evoluties op het vlak van brandstoffen?.....	14
1.2.3 Zijn fruitresten een mogelijke grondstof voor brandstofproductie? .....	20
1.3 Onderzoeksaanpak.....	22
Hoofdstuk 2: Definiëring en soorten brandstoffen .....	25
2.1 Soorten brandstof .....	25
2.2 Kenmerken van een brandstof .....	27
2.3 Aanbod en vraag van de soorten brandstoffen .....	29
2.4 Toepassingen.....	31
2.4.1 Steenkool.....	31
2.4.2 Olie .....	31
2.4.3 Natuurlijk gas.....	31
2.4.4 Elektriciteit .....	32
2.4.5 Biobrandstoffen.....	32
2.5 Verwachte evoluties.....	32
Hoofdstuk 3: Huidige en toekomstige evoluties op het vlak van brandstoffen.....	35
3.1 Bio-ethanol .....	35
3.2 Methanol.....	36
3.3 Natuurlijk gas.....	37
3.4 Vloeibaar petroleumgas (LPG).....	37
3.5 Waterstof.....	37
3.6 Afvalsolventen .....	38
3.7 Chemische brandstoffen .....	38
3.8 Rubberkrumels .....	39
3.9 Afvaloliën.....	39
3.10 Biomassa.....	39
3.11 Van gas voorziene vaste stoffen.....	40
3.12 Modder uit riolen .....	40

3.13 Glycerol.....	40
3.14 Biodiesel .....	40
3.15 CTL .....	41
Hoofdstuk 4: Fruitresten als grondstof voor brandstofproductie.....	43
4.1 Bodemverbeteraar .....	44
4.2 Veevoeding.....	44
4.3 Pelletiseren.....	44
4.4 Vergisting.....	47
4.4.1 Proces .....	47
4.4.2 Cijfers.....	49
4.4.3 Analyse .....	50
4.5 Biogas opwaarderen tot aardgas .....	51
4.6 Bio-ethanol .....	52
4.7 Voorwaarden voor economische rendabiliteit .....	53
4.7.1 Pelletiseren.....	53
4.7.2 Vergisting.....	53
4.7.3 Opwaarderen.....	56
Hoofdstuk 5: Conclusies en aanbevelingen.....	59
Bibliografie .....	65
Bijlagen .....	71

# Hoofdstuk 1: Methodologie

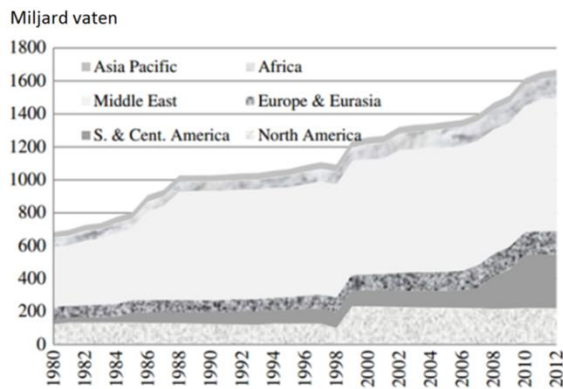
## **1.1 Probleemstelling**

De stijgende industrialisering en mobiliteit hebben voor een sterke stijging gezorgd in de wereldwijde vraag naar brandstoffen (Agrawal, 2007). Bovendien is ongeveer 80% van de energie die vandaag wereldwijd gebruikt wordt, afkomstig van fossiele brandstoffen. Het gebruik van diesel en benzine is wijdverspreid in verschillende sectoren (landbouw, transport,...) om mechanische energie te genereren (Demirbas, 2009). 58% van het verbruik van fossiele brandstoffen kan toegewezen worden aan de transportsector (Escobar, et al., 2009). Binnen de transportsector is 98% van de geconsumeerde energie afkomstig van fossiele brandstoffen. Fossiele brandstoffen raken echter uitgeput: British Petroleum schat de totale wereldwijde reserve van olie en natuurlijk gas op respectievelijk 265.3 miljard m<sup>3</sup> en 187.3 triljoen m<sup>3</sup> (BP Statistical Review of World Energy, 2013). Gebaseerd op de huidige consumptie van energie resulteert dit in geschatte reserves voor respectievelijk 51 en 56 jaar. Naast het feit dat fossiele brandstoffen uitputbaar zijn, dragen ze ook bij tot de uitstoot van broeikasgassen, zowel tijdens de productie als tijdens de consumptie (IEA, 2012). Dit brengt meerdere negatieve gevolgen met zich mee, zoals klimaatveranderingen, verdwijnen van gletsjers, stijging van de zeespiegel en verlies aan biodiversiteit (Gullison, et al., 2007).

Dankzij het geleidelijk herstel van de wereldeconomie na de recente financiële crisis, is de vraag naar fossiele brandstoffen weer significant gestegen. Hierdoor zijn de prijzen van fossiele brandstoffen gestegen, wat op zijn beurt weer gezorgd heeft voor een stijging in productie en export in de mijnsector. Vooral de productie van steenkool is sterk gestegen door een sterke stijging in de vraag vanuit China. Volgens het International Energy Agency (IEA, 2013) was het aandeel van olie in de wereldwijde energieconsumptie 40.8%, gevolgd door aardgas (15.5%) en steenkool (10.1%).

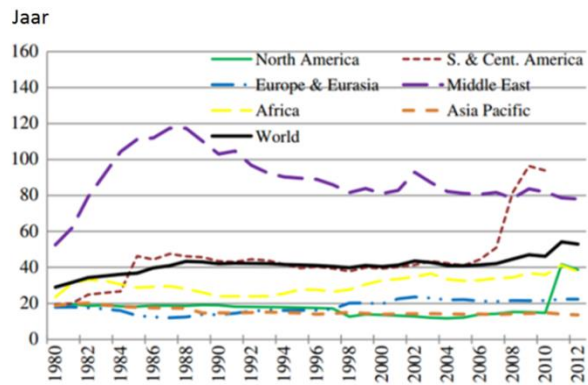
Een vaak voorkomende maatstaf om de trends in fossiele brandstoffen weer te geven is de reserves-over-productie **(R/P)<sup>2</sup> ratio**. De ratio's van steenkool en aardgas worden alsmaar kleiner; dit is voornamelijk toe te schrijven aan de stijgende productie van de fossiele brandstoffen. Wat olie betreft is het redelijk te verwachten dat de (R/P)<sup>2</sup> ratio daalt, maar deze ratio is min of meer constant gebleven (zie grafiek 1 en 2). Dit komt door het feit dat de productie van olie groter is dan de consumptie ervan, waardoor de reserves kunnen aangroeien in dezelfde grootorde als de productie, wat dan leidt tot een constante (R/P)<sup>2</sup> ratio. Aangezien olie en aardgas niet-hernieuwbare brandstoffen zijn, en dus eindig in hoeveelheid, zijn de verwachtingen dat de (R/P)<sup>2</sup> ratio zal dalen op de lange termijn. De olie- en aardgasproductie zal stijgen tot het maximum bereikt wordt, waarna de productie zal dalen (Nyambuu & Semmler, 2014). Volgens de Peak-Oil theorie van Hubbert (1956) is de productiecurve van olie een Gausscurve. Additionele grafieken kunnen gevonden worden in bijlage 1.

Grafiek 1: Olie reserves



Bron: BP (2013)

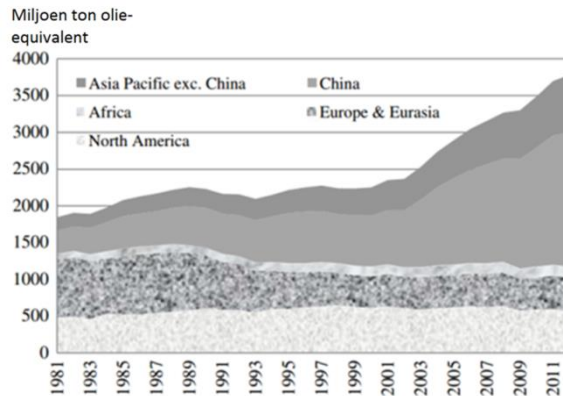
Grafiek 2: Olie R/P ratio



Bron: BP (2013)

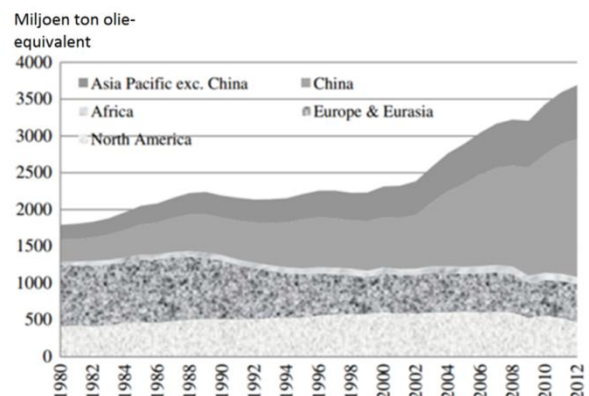
De wereldwijde steenkoolreserves worden geschat op 861 miljard ton (BP Statistical Review of World Energy, 2013). Steenkool heeft de grootste (R/P)<sup>2</sup> ratio in vergelijking met andere fossiele brandstoffen. Gebaseerd op de huidige consumptie van energie zouden de steenkoolreserves pas uitgeput raken binnen 109 jaar. Hier moet wel een belangrijke kanttekening bij gemaakt worden: in 2000 bedroeg deze schatting nog 210 jaar. Op iets meer dan een decennium is de verwachte levensduur van de voorraad gehalveerd. Dit is vooral te wijten aan een sterke stijging in de productie en consumptie van steenkool in Azië en China in het bijzonder (zie grafiek 3 en 4).

Grafiek 3: Steenkool productie



Bron: BP (2013)

Grafiek 4: Steenkool consumptie

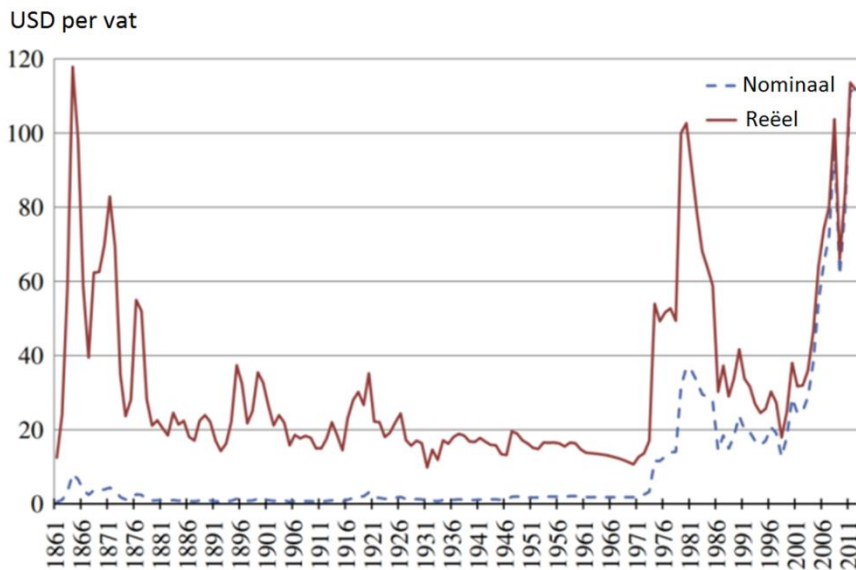


Bron: BP (2013)

De alsmaar kleiner wordende productiemogelijkheden hebben, samen met de stijgende vraag naar olie, ook gezorgd voor prijsstijgingen, te zien in grafiek 5.



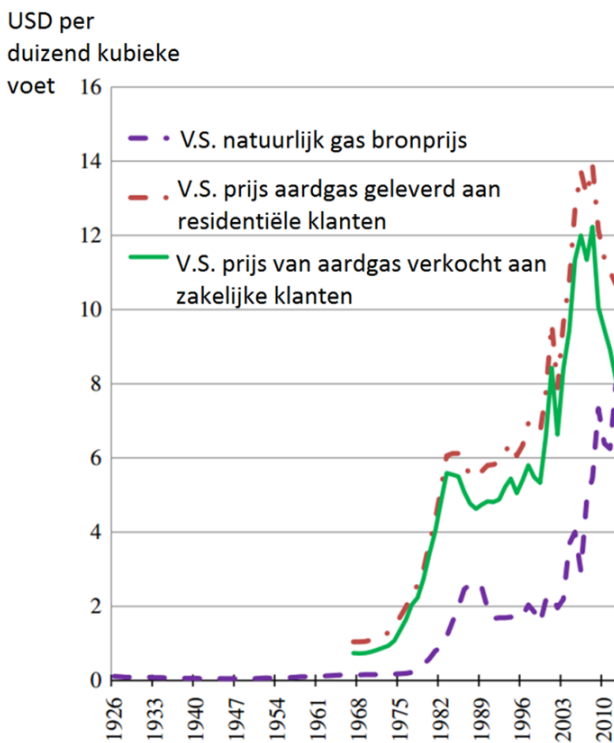
Grafiek 5: Nominale en reële olieprijs 1861-2012



Bron: BP (2013)

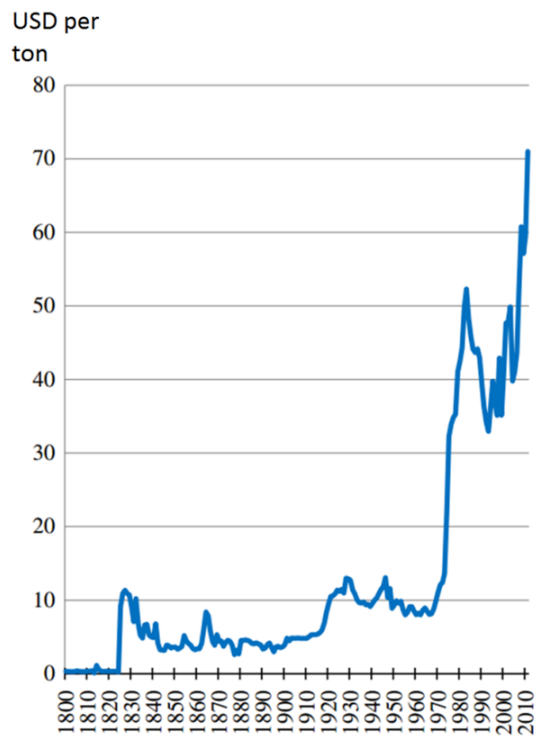
De prijsevolutie van aardgas kent een vergelijkbaar verloop als olie. De prijzen stegen tot de financiële crisis van 2008, waarna ze een terugslag kenden. Nu de wereld zich herstelt van de crisis is er terug een stijging in de aardgasprijzen waarneembaar. De trends in prijzen van steenkool zijn vergelijkbaar met die van olie en aardgas (zie grafiek 6 en 7).

Grafiek 6: Prijs natuurlijk gas



Bron: IEA (2013)

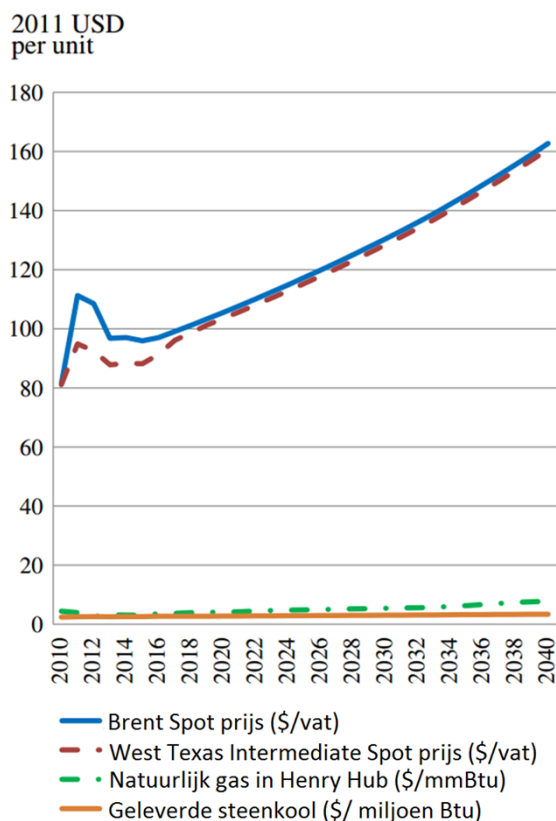
Grafiek 7: Nominale steenkoolprijs



Bron: IEA (2013)

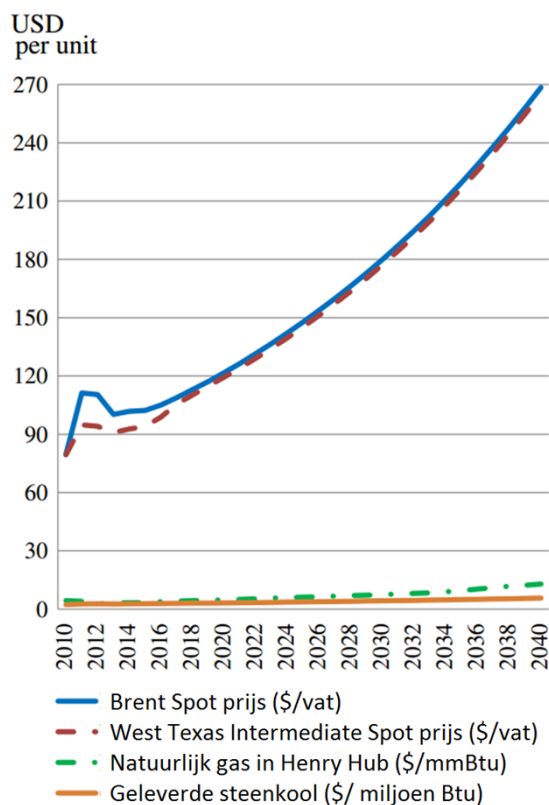
Het International Energy Agency (2013) voorspelt de nominale en reële prijsevoluties van ruwe olie, aardgas en steenkool tot 2040 (zie grafiek 8 en 9). Het IEA voorspelt dat de prijzen van alle fossiele brandstoffen zullen stijgen op lange termijn. Als er een onderscheid gemaakt wordt tussen de verschillende soorten fossiele brandstoffen wordt het duidelijk dat de prijsstijging van ruwe olie veel groter is in vergelijking met de andere niet-hernieuwbare energiebronnen. Deze evolutie is te wijten aan de vermindering van de ontdekking van nieuwe olievoorraden en aan de uitputting van bestaande olievoorraden (Nyambuu & Semmler, 2014).

Grafiek 8: Reële prijzen projecties 2010-2040



Bron: IEA (2013)

Grafiek 9: Nominale prijzen projecties 2010-2040



Bron: IEA (2013)

Zowel de productie als consumptie van alle fossiele brandstoffen kennen een stijgende trend. De consumptiestijging is vooral toe te wijzen aan het stijgende gebruik van energie om economische groei door industrialisering mogelijk te maken. Dit is momenteel nog vooral het geval in landen als China. Daarbij komt dat, hoewel de productie van deze niet-hernieuwbare brandstoffen stijgt, de groei in reserves de stijgende vraag niet kan bijhouden. Zoals eerder vermeld, resulteert dit in een dalende  $(R/P)^2$  ratio voor steenkool en aardgas. De  $(R/P)^2$  ratio voor olie heeft daarentegen de laatste jaren een stijgende trend gekend. Dit komt door een stijgende olieproductie uit Noord- en Zuid-Amerika, Centraal-Amerika en Afrika. Desondanks kan deze trend niet aanhouden, gezien het feit dat olie een uitputbare energiebron is. Op lange termijn zal de  $(R/P)^2$  ratio naar verwachting dalen (Nyambuu & Semmler, 2014).

Al deze gegevens leiden tot de conclusie dat er substituten voor fossiele brandstoffen moeten geïdentificeerd en geproduceerd worden die hernieuwbaar, duurzaam en efficiënt zijn, voldoende energie bevatten én minder broeikasgassen uitstoten (Liew, Hassim & Ng, 2014), (Nigam & Sing, 2011).

## 1.2 Centrale onderzoeksvraag en deelvragen

In dit onderzoek zal nagegaan worden of het economisch haalbaar is om fruitresten tot brandstof te verwerken. De centrale onderzoeksvraag zal, met behulp van de deelvragen, hier een antwoord op bieden:

### **Is het economisch haalbaar om fruitresten te verwerken tot brandstof?**

Hieruit worden de volgende onderzoeksvragen afgeleid:

#### 1.2.1 Wat is een brandstof en welke soorten bestaan er?

Om te kunnen bestuderen of fruitresten als grondstof kunnen dienen bij de productie van brandstof, is het noodzakelijk dat er eerst een algemeen beeld gevormd wordt over wat een brandstof is en aan welke vereisten er moet voldaan worden om als brandstof geclassificeerd te worden. Er zijn immers veel verschillende soorten brandstof die allemaal van elkaar verschillen maar toch onder dezelfde noemer vallen. Om als alternatieve brandstof even effectief gebruikt te kunnen worden als de conventionele fossiele brandstoffen, moet de alternatieve brandstof vergelijkbaar zijn op het vlak van bepaalde kenmerken, zoals de ontstekings- en verbrandingseigenschappen, aangezien deze eigenschappen bepalen hoe en of een materiaal beschikbaar is als brandstof (Sangeeta, et al., 2014). De ontstekings- en verbrandingseigenschappen worden gedefinieerd aan de hand van zes specifieke kenmerken, die nu achtereenvolgens zullen toegelicht worden.

##### a. Cetaangetal

Het cetaangetal wordt gedefinieerd als het volume van n-cetaan in een mengsel van n-cetaan en  $\alpha$ -methylnaftaleen die dezelfde ontstekingsvertraging geeft als de brandstof in kwestie. Ontstekingsvertraging is de vertraging tussen het begin van de injectie en de start van de verbranding van de brandstof. Deze ontstekingsvertraging staat voor de ontstekingskwaliteit van de brandstof. Hoe hoger het cetaangetal, hoe korter de ontstekingsvertraging. Het cetaangetal is meestal enkel een goede vergelijkingsbasis voor verschillende soorten brandstof in dezelfde motor (Astbury, 2008).

##### b. Calorische waarde

De verbrandingswarmte is een rechtstreekse maatstaf voor de energie-inhoud van een brandstof. De verbrandingswarmte wordt gemeten in termen van de hoeveelheid warmte die vrijkomt bij de verbranding van een eenheid brandstof met zuurstof. Er zijn twee verschillende verbrandingswarmtes, of calorische waarden, voor elke petroleumbrandstof: bruto en netto. Wanneer koolwaterstoffen verbrand worden, is een van de vrijkomende elementen waterdamp. De bruto calorische waarde houdt mee rekening met de warmte die de waterdamp vrijgeeft, terwijl de nettowaarde dit buiten beschouwing laat (Astbury, 2008).

##### c. Octaangetal

Verbranding in een motor met vonkontsteking hangt vooral af van het design van de motor en de kwaliteit van de brandstof. Onder ideale omstandigheden verspreidt de vlam, resulterend uit de

vonk, zich gelijkmatig over de verbrandingsruimte tot alle brandstof verbrand is. De temperatuurstijging als gevolg van het verspreiden van de vlam resulteert in een verhoogde druk in de zogenaamde eindgaszone: dit is het deel van de mengeling van brandstof en lucht waar de vlam nog niet geraakt is. De stijging van temperatuur en druk zorgt ervoor dat de brandstof pre-  
vlamreacties ondergaat. Tussen de belangrijkste van die reactieproducten bevinden zich de zeer temperatuurgevoelige peroxiden. Als deze peroxiden een bepaald concentratiegehalte overstijgen, zal het gas in de eindgaszone ontbranden voor de vlam van de ontsteking de eindgaszone bereikt. Deze ontbranding zorgt dan voor de uiteindelijke ontsteking, ook wel "kloppen" genoemd. De verschillende types koolwaterstoffen in brandstof gedragen zich verschillend in hun pre-  
vlamreacties en dit resulteert in verschillen in hun neiging tot kloppen. Het octaangetal van een brandstof is dan een maatstaf voor de mate waarin de brandstof de neiging tot kloppen heeft, waar een hoger octaangehalte staat voor een hogere neiging tot kloppen (Hsieh, Chen, Wu, & Lin, 2002).

#### d. Ontvlammingspunt

Het ontvlammingspunt wordt gedefinieerd als de minimumtemperatuur waarbij de dampen van een olie een kortstondige vonk geven wanneer de olie wordt blootgesteld aan een standaardvlam. Het ontvlammingspunt kan de mogelijke brandgevaaren tijdens transport, verwerking en opslag van een brandstof voorspellen (Astbury, 2008).

#### e. Volatiliteit

De volatiliteit of vluchtigheid van een vloeistof is de neiging om te veranderen van een vloeistof naar een gas. Dit is een van de meest primaire kenmerken van alle vloeibare brandstoffen. De volatiliteit van een brandstof heeft invloed op de prestaties van een motor op verschillende manieren, waarvan de belangrijkste het gemak van starten is. De brandstof moet daarnaast voldoende vluchtig zijn om een snelle opwarming en geleidelijke verdamping voor een goede verdeling tussen de cilinders te garanderen. De brandstof mag ook weer niet té volatiel zijn: dit zou resulteren in verlies van dampen uit de brandstoftank of dampvorming op ongewenste plaatsen wat de doorstroming van de brandstof zou beperken (Astbury, 2008).

#### f. Zelfontstekingstemperatuur

De zelfontstekingstemperatuur is van toepassing op gasvormige brandstoffen. Het wordt gedefinieerd als de temperatuur waarbij het gas spontaan ontbrandt in een afgesloten ruimte. Dit is ook weer een maatstaf om de veiligheid van de brandstof te meten (Sangeeta, et al., 2014).

In de literatuurstudie zullen de kenmerken van een brandstof en de verschillende soorten verder toegelicht worden.

### **1.2.2 Welke zijn de huidige en toekomstige evoluties op het vlak van brandstoffen?**

Het antwoord op deze deelvraag zal bestaan uit een literatuurstudie over de evoluties op het vlak van brandstoffen. Zo wordt een algemeen beeld geschetst over de ontwikkelingen en wat er allemaal mogelijk is of zal zijn op het vlak van technologie en vooruitgang. Biobrandstoffen, waterstof, natuurlijk gas en syngas (synthesegas) zijn naar alle waarschijnlijkheid de vier belangrijkste duurzame bronnen van brandstof voor de nabije toekomst. Van deze vier mogelijkheden zijn biobrandstoffen het meest milieuvriendelijk. Gezien de stijgende ongerustheid omtrent de opwarming van de aarde ligt de focus vooral op het meest milieuvriendelijke alternatief, waardoor vooral biobrandstoffen onderzocht worden als een alternatief voor fossiele brandstoffen (Nigam & Singh, 2011).

Een veelgebruikte definitie van biobrandstof is een vaste, vloeibare of gasvormige brandstof die afkomstig is van hernieuwbare bronnen zoals biomassa, plantages of afvalolie (Demirbas, 2009). Naast hernieuwbaar zijn er nog een aantal voorwaarden waaraan voldaan moet worden om onder de categorie biobrandstof te vallen: biobrandstof mag niet giftig zijn en is CO<sub>2</sub>-neutraal (Cucek, Varbanov, Klemes, & Kravanja, 2012). Biobrandstof mag dus geen significant effect hebben op milieu- en gezondheidsrisico's (Egebäck & Westerholm, 1997). Bijgevolg kunnen biobrandstoffen voorgesteld worden als een alternatieve energiebron die de problemen die gepaard gaan met fossiele brandstoffen aanpakt: biobrandstoffen bieden meer zekerheid aan de aanbodzijde, verminderen de uitstoot van voertuigen en zorgen bovendien voor inkomenszekerheid voor boeren. Een bijkomend voordeel voor veel landen is dat investeren in biobrandstoffen de afhankelijkheid van olie afkomstig uit andere landen vermindert. Naast deze voordelen zijn er ook verschillende uitdagingen die moeten overwonnen worden. De belangrijkste voordelen en uitdagingen worden weergegeven in tabel 1. Tussen 1980 en 2005 is de productie van biobrandstof drastisch gestegen van 4.4 miljard liter tot 50.1 miljard liter (Armbruster & Coyle, 2006) (Murray, 2005). Naar de toekomst toe worden nog sterke stijgingen verwacht (Licht, 2008).

Tabel 1: Potentiele voordelen en uitdagingen van biobrandstoffen

Voordelen	Uitdagingen
<b>Energiezekerheid</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Binnenlandse energiebron</li> <li>• Lokaal verdeeld</li> <li>• Goed verbonden supply-chain</li> <li>• Hogere betrouwbaarheid</li> </ul>	<b>Feed stock</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verzamelnetwerken</li> <li>• Opslagfaciliteiten</li> <li>• Concurrentie voedsel &lt;-&gt; brandstof</li> </ul>
<b>Economische stabiliteit</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prijsstabiliteit</li> <li>• Scheppen van werkgelegenheid</li> <li>• Plattelandsontwikkeling</li> <li>• Verminderen concurrentie tussen brandstoffen</li> <li>• Verminderen verschil tussen vraag en aanbod</li> <li>• Nieuwe industrieën ontwikkelen</li> <li>• Controle op monopolie van fossiele brandstofrijke staten</li> </ul>	<b>Technologie</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voorbehandeling</li> <li>• Productie van enzymen</li> <li>• Efficiëntieverbeteringen</li> <li>• Technologiekosten</li> <li>• Productie van bijproducten met toegevoegde waarde</li> </ul>
<b>Milieuwinst</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Betere benutting van afval</li> <li>• Vermindering van lokale verontreiniging</li> <li>• Vermindering uitstoot broeikasgassen door energieverbruik</li> <li>• Vermindering van stortplaatsen</li> </ul>	<b>Beleid</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verandering in landgebruik</li> <li>• Middelen voor onderzoek en ontwikkeling</li> <li>• Commercieel beleid voor biobrandstoffen</li> <li>• Subsidies op de productie van biobrandstoffen</li> <li>• Belastingkredieten op de productie en het gebruik van biobrandstoffen</li> </ul>

Bron: Nigam & Singh (2011)

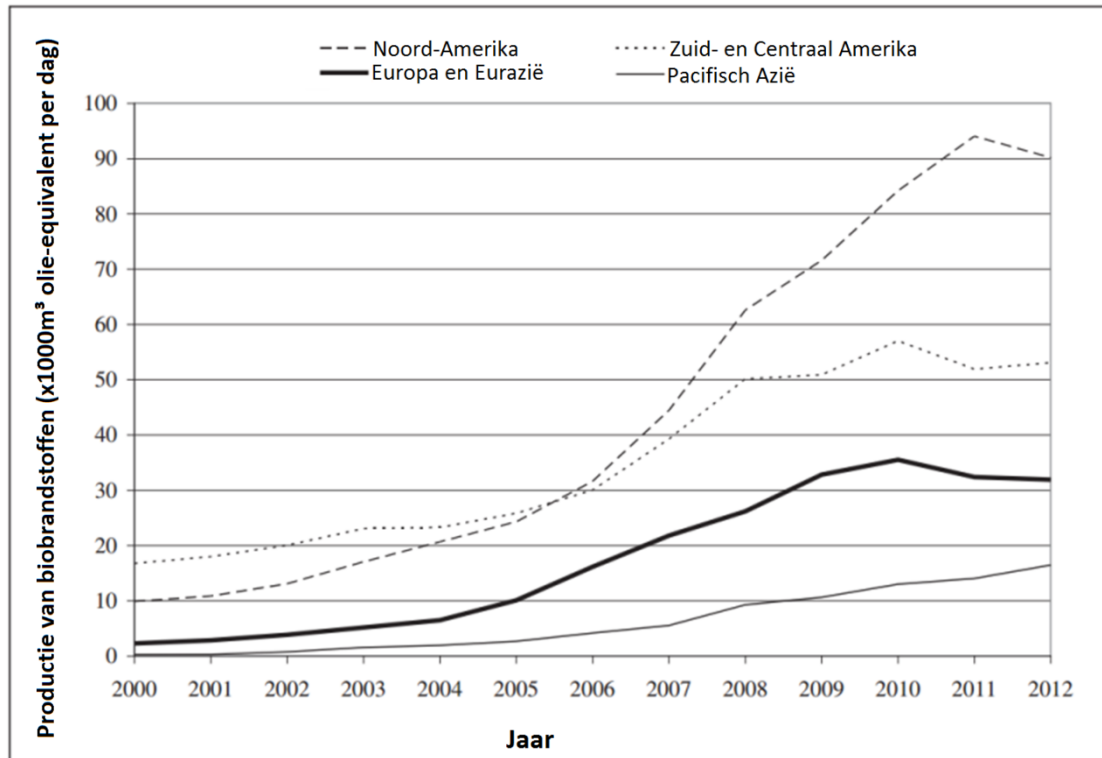
In maart 2007 heeft de Europese Raad de doelstellingen omtrent hernieuwbare energie vastgelegd voor 2020. Zo moet voor elke lidstaat minimum 20% van de energie in het algemeen van hernieuwbare energiebronnen komen tegen 2020, terwijl het aandeel van biobrandstoffen in de transportsector minimum 10% moet bedragen (EU, 2009). Er bestaan al heel wat technieken die kunnen worden toegepast, maar er zijn ook verschillende nieuwe technieken in ontwikkeling. Tabel 1 geeft een overzicht van de verschillende technologieën en hun brandstoffen, relatief t.o.v. hun huidige en potentiële grondstof (Nigam & Singh, 2011).

In het algemeen kunnen biobrandstoffen onderverdeeld worden in twee groepen, namelijk primaire en secundaire biobrandstoffen. Primaire biobrandstoffen worden in hun onbewerkte vorm gebruikt voor verwarming, koken en elektriciteitsproductie. Voorbeelden hiervan zijn brandhout, houtpellets, landbouwafval etc. Secundaire biobrandstoffen worden geproduceerd door biomassa te verwerken en kunnen gebruikt worden in verschillende industriële processen en voertuigen.

Er zijn al verschillende soorten biobrandstof beschikbaar, zoals bioalcohol, biodiesel, biogas en biowaterstof. Biobrandstoffen kunnen zowel naar tijd als naar functie onderverdeeld worden in vier generaties (Naik, et al., 2010). Met functie wordt bedoeld dat zowel de grondstoffen als de

productietechnologieën verschillen naargelang de generatie biobrandstof. Het laatste decennium is de wereldwijde productie van biobrandstof sterk gestegen. Momenteel is Noord-Amerika de grootste producent van biobrandstof ter wereld, zoals te zien is in grafiek 10. Noord-Amerika produceert meer dan 90,000 m<sup>3</sup> biobrandstof per dag (BP Statistical Review of World Energy, 2013). De verwachting is dat de huidige stijgende trend in de productie van biobrandstof zal blijven aanhouden om zo de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen en de milieuproblemen te verminderen.

Grafiek 10: Wereldwijde productie van biobrandstof



Bron: BP Statistical Review of World Energy (2013)

In de volgende paragrafen worden de verschillende generaties biobrandstof kort toegelicht.

De **eerste generatie biobrandstof** is afkomstig van gewassen zoals maïs, graan, suikerbiet en oliezaden (Demirbas, 2009). De primaire producten die afkomstig zijn van de eerste generatie biobrandstof zijn biodiesel en bio-ethanol, die gebruikt worden als bio-energie (Hammond, Kallu, & McManus, 2008). Biodiesel en bio-ethanol worden vooral gebruikt als brandstof in de transportsector door ze te mengen met fossiele brandstoffen. Diesel wordt in de meeste gevallen gemengd met 5% biodiesel, terwijl benzine gemengd wordt met 10% bio-ethanol. Deze manier om biodiesel en bio-ethanol toe te passen heeft geleid tot een sterke stijging in de vraag naar biobrandstof van de eerste generatie. Het United States Department of Agriculture (USDA) beschrijft de voordelen van biodiesel als volgt: biodiesel is hernieuwbaar, geschikt om diesel uit petroleum te vervangen, geschikt om te gebruiken in bestaande dieselmotoren zonder (of met beperkte) aanpassingen, minder uitstoot van broeikasgassen en biodiesel is biologisch afbreekbaar



en kan geproduceerd worden uit gerecycleerde bronnen en landbouwproducten (USDA, 2003). Biodiesel wordt als CO<sub>2</sub>-neutraal beschouwd: de CO<sub>2</sub> die vrijkomt bij de verbranding was voordien opgeslagen uit de atmosfeer tijdens de groei van de plant die gebruikt wordt om biodiesel te maken (Nigam & Singh, 2011). Biodiesel heeft ook een lager ontstekingspunt dan conventionele diesel, waardoor het transport veiliger wordt. De eerste generatie biobrandstof wordt in significante hoeveelheden geproduceerd en gecommmercialiseerd, maar aangezien de productie van de eerste generatie biobrandstof vooral afkomstig is van gewassen en gronden die ook voor voedsel doeleinden kunnen ingezet worden, is er sprake van een stijgende competitie tussen het gebruik van deze gewassen en gronden voor voedsel, of voor grondstof voor de productie van biobrandstof. Dit is meteen het grootste probleem met de eerste generatie biobrandstof: de productiekosten zijn hoog omdat er competitie moet gevoerd worden met voedsel én hierdoor zijn bepaalde soorten voedsel in prijs gestegen (Nigam & Singh, 2011). Daarenboven worden de negatieve sociale en economische gevolgen vaak benadrukt waardoor er binnen de samenleving een "voedsel versus brandstof" conflict is ontstaan (Liew, Hassim & Ng, 2014). Deze nadelen zorgen ervoor dat de focus verlegd wordt naar niet-eetbare biomassa om biobrandstof te produceren.

Lignocellulose biomassa wordt gebruikt als de grondstof voor de **tweede generatie biobrandstoffen** (Koçar & Civas, 2013). Het gebruik van lignocellulose zou de nadelen van de eerste generatie kunnen omzeilen. Lignocellulose biomassa is vezel-houdende biomassa, afkomstig van biomassa waarvoor geen landbouwgrond nodig is, waardoor het "voedsel versus brandstof" conflict hier niet van toepassing is. De grondstoffen kunnen specifiek geteeld worden voor energiedoelstellingen. Dit leidt tot een hogere productie per eenheid land en bovendien kan een grotere hoeveelheid van het plantmateriaal gebruikt worden om biobrandstof te produceren, waardoor de efficiëntie van het landgebruik stijgt in vergelijking met de eerste generatie biobrandstoffen (Nigam & Singh, 2011). De potentiële grondstoffen voor de tweede generatie biobrandstoffen bestaan o.a. uit kruidachtige en houtachtige planten, land- en bosbouwresiduen, stedelijk en industrieel afval, organisch afval, etc. Wat meteen opvalt is dat alle bovengenoemde grondstoffen niet-eetbaar en relatief makkelijk en overvloedig beschikbaar zijn in vergelijking met de grondstoffen van de eerste generatie biobrandstoffen, nl. voedingsgewassen of energiegewassen (Naik, et al., 2010). Het grootste nadeel van lignocellulose biomassa is dat deze biomassa voorkomt in veel verschillende fysieke vormen met verschillende karakteristieken en chemische samenstellingen. Lignocellulose biomassa zal om deze reden een voorbehandeling moeten krijgen alvorens het verder kan omgezet worden naar biobrandstof (Agbor, et al., 2011). Dit impliceert dat de productie van de tweede generatie biobrandstoffen meer gesofisticeerde technieken vereist, wat resulteert in hogere investeringen per productie-eenheid. Hierdoor zullen er waarschijnlijk grootschalige projecten ontstaan om schaalvoordelen in de kapitaalkosten te bekomen (Stevens, Worgetten, & Saddler, 2004). Bovendien wordt met lignocellulose biomassa het "voedsel versus brandstof" probleem niet helemaal opgelost. Het rechtstreekse conflict wordt vermeden, maar bij sommige soorten lignocellulose biomassa wordt er land gebruikt dat ook had kunnen gebruikt worden om voedselgewassen op te kweken. Hiervoor moeten er nog oplossingen gezocht worden (Brennan & Owende, 2010).

De **derde generatie biobrandstoffen** wordt vooral gewonnen uit zeewier (Demirbas, 2011). Zeewier is een van de meest efficiënte planten op het vlak van fotosynthese: het zet zonne-energie om in chemische energie in de vorm van oliën, proteïnen en koolhydraten (Naik, et al., 2010). Dit maakt zeewier uitermate interessant om te gebruiken als grondstof voor biobrandstof. Daarnaast heeft zeewier nog enkele unieke kenmerken, die een voordeel kunnen betekenen bij de productie van biobrandstof: (1) hoge energie-efficiëntie, (2) snel groeitempo en veel olieproductie, (3) weinig tot geen marktcompetitie, (4) niet-giftig, (5) in sterke mate bio-afbreekbaar, (6) verbruikt een minimale hoeveelheid aan zoet water, (7) gebruikt een minimale hoeveelheid aan land en (8) kan functioneren als een zuiveraar van afvalwater door voedingsstoffen als stikstof en fosfor te verwijderen (Demirbas, 2011). De recentste ontwikkelingen focussen zich op microscopisch zeewier of microscopische algen, ook bekend als microalgen (Nigam & Singh, 2011). Het voordeel van microalgen is dat ze nog meer proteïnen en koolhydraten kunnen opslaan, wat omgezet kan worden in biobrandstof (Harun, et al., 2010). Hoewel er veel voordelen verbonden zijn aan het gebruik van zeewier en microalgen als grondstof voor de productie van biobrandstof is er nog veel technologische ontwikkeling nodig om de techniek bruikbaar te maken. Bovendien zijn de gevolgen voor het milieu nog niet helemaal duidelijk. Zo zou het kunnen dat biodiesel gebaseerd op microalgen schadelijker is voor het milieu dan eerdere generaties biodiesel. Dit komt omdat er nog geen zekerheid is over de hoeveelheid water en voedingsstoffen die microalgen zouden nodig hebben tijdens het telen (Holma, et al., 2013). Bovendien is het ook nog een groot vraagteken hoe het zeewier of de microalgen op grote schaal geoogst zouden kunnen worden. De huidige oogsttechnologie is zo inefficiënt dat het nog niet economisch rendabel is om zeewier te gebruiken als grondstof voor de productie van biobrandstoffen (Demirbas, 2011). Verder onderzoek is dus noodzakelijk.

De **vierde generatie biobrandstof** maakt gebruik van de geavanceerde technologie van biochemie en processen gebaseerd op petroleum om koolstof-negatieve biodiesel en bio-ethanol te produceren (Lü, Sheahan, & Fu, 2011). Technisch gezien gaat het om het mengen van genetisch aangepaste microben met CO<sub>2</sub> in de aanwezigheid van zonlicht. Het is echter duidelijk geworden dat deze techniek voor milieuproblemen kan zorgen (Warwick, Beckie, & Hall, 2009). Daarom is het onderzoek naar deze nieuwste generatie schaars.

Tabel 2 toont een samenvatting van de voor- en nadelen van fossiele brandstoffen en de vier generaties biobrandstoffen.

Tabel 2: Voor- en nadelen van de verschillende generaties biobrandstoffen

Brandstof	Voordelen	Nadelen
Petroleum	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoge beschikbaarheid</li> <li>• Gevestigde technologieën</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uitputbaarheid van fossiele brandstoffen</li> <li>• Veroorzaken klimaatverandering</li> <li>• Fluctuatie van fossiele brandstofprijzen</li> <li>• Hogere CO<sub>2</sub>-uitstoot dan biobrandstoffen</li> </ul>
Eerste generatie biobrandstoffen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bio-afbreekbaar</li> <li>• Energiezekerheid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concurrentie voor landgebruik</li> <li>• Gemengd met conventionele brandstof</li> <li>• Hoogste CO<sub>2</sub>-uitstoot van alle generaties biobrandstof</li> </ul>
Tweede generatie biobrandstoffen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geen concurrentie voor voedsel</li> <li>• Productie van bijproducten met toegevoegde waarde</li> <li>• Energiezekerheid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ingewikkelde processen zijn vereist</li> <li>• Conversie-technologieën zijn in ontwikkeling</li> <li>• Lage conversie in vergelijking met petroleum</li> </ul>
Derde generatie biobrandstoffen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoge olieopbrengst</li> <li>• Geen concurrentie voor voedsel en land</li> <li>• Geen giftige inhoud</li> <li>• Energiezekerheid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoge verwerkingskosten</li> <li>• Productietechnologie is in ontwikkeling</li> <li>• Moeilijk te oogsten en te verwerken</li> </ul>
Vierde generatie biobrandstoffen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Koolstof-negatieve biobrandstof</li> <li>• Energiezekerheid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gebrek aan onderzoek naar de technische en economische aspecten in de praktijk</li> <li>• Nog in de ontwikkelingsfase</li> </ul>

Bron: Liew, Hassim & Ng (2014)

### 1.2.3 Zijn fruitresten een mogelijke grondstof voor brandstofproductie?

Deelvraag drie zal zich specifiek toespitsen op de mogelijkheden om fruitresten in te zetten als een grondstof voor brandstofproductie, en zal naast een literatuurstudie vooral beantwoord worden door empirisch onderzoek in de vorm van interviews met experts en eigen berekeningen.

Er worden jaarlijks grote hoeveelheden voedselafval geproduceerd die afkomstig zijn uit alle stappen van de voedselkringloop. In ontwikkelde landen is 42% van het voedselafval afkomstig van huishoudens, 39% van de industrie, 14% van de voedseldienstensector en 5% van de kleinhandel en distributiesector (Mirabella, Castellani, & Sala, 2014). In 2006 was er sprake van een voedselverlies van naar schatting 89Mt (miljoen ton) in de 27 lidstaten van de EU (Europese Commissie, 2010). Dit komt neer op 179kg per capita. De Europese Commissie (2010) voorspelt een voedselverlies van 126Mt tegen 2020 als er geen preventieve maatregelen worden getroffen. Deze gigantische afvalhoeveelheden zorgen voor grote managementproblemen, zowel vanuit economisch als ecologisch standpunt. Zo wordt geschat dat elke ton voedselafval verantwoordelijk is voor de uitstoot van 2 ton CO<sub>2</sub> (Europese Commissie, 2010). Er worden wel degelijk al bepaalde elementen uit dit afval gebruikt om op de een of andere manier meerwaarde te creëren, maar het leeuwendeel van dit afval wordt momenteel niet gebruikt en weggegooid. Desondanks hebben de meeste soorten afval het potentieel om hergebruikt te worden in andere productiesystemen, zoals bijvoorbeeld bio-raffinaderijen. Energieopwekking uit dit afval is onderzocht in de vorm van de productie van biogas, waterstof en bio-ethanol. Voorbeelden van het afval dat hiervoor gebruikt wordt, zijn stro van maïs, rijst en tarwe, en suikerriet. Er zijn ook soorten afval die grotendeels ongebruikt blijven en verder onderzocht moeten worden. Voorbeelden hiervan zijn afval van citrusvruchten, appels, suikerbieten en druiven. Deze afvalgroep bevat veel polysacchariden die gebruikt zouden kunnen worden in de productie van bio-ethanol (Van Dyk, et al., 2013). Tabel 3 geeft een overzicht van het geschatte geproduceerde afval van verschillende soorten groenten en fruit in 2010:

Tabel 3: Wereldwijde productie fruit- en groentesoorten

Fruit/Groente	Totale wereldwijde productie in 2010	Geschatte geproduceerde hoeveelheid afval in 2010
Appel	69 569 612 MT	17 392 403 – 24 349 364 MT
Citrus: pompelmoes	6 957 837 MT	3 478 918 MT
Citrus: citroen en limoen	14 244 782 MT	4 985 673 – 6 410 151 MT
Citrus: sinaasappel	69 416 336 MT	24 295 717 – 29 154 861 MT
Olijf	20 578 186 MT	3 704 073 MT
Druif	68 311 466 MT	10 929 834 MT
Banaan	102 114 819 MT	30 634 445 – 40 845 928 MT
Ananas	19 418 478 MT	8 738 315 MT
Aardappel	324 181 889 MT	48 627 283 – 129 672 755 MT
Tomaat	145 751 507 MT	4 372 545 – 10 202 605 MT

Bron: Van Dyk, et al. (2013)

Binnen afval uit voedselproductie kan een onderscheid gemaakt worden tussen vast en vloeibaar afval. Vast afval kan niet gebruikt worden in de productie van het product, zoals de schil, pitten of

vezels van fruit die verwijderd worden voor de productie van fruitsappen. Vast afval uit de voedselproductie wordt momenteel op verschillende manieren verwerkt. Veel bedrijven dumpen het afval dicht bij hun fabriek. Dit heeft als nadeel dat er geurhinder en andere milieuproblemen kunnen ontstaan, aangezien dit afval veel voedingsstoffen en water bevat, wat leidt tot de groei van bacteriën en gisting. Een andere manier die veel toegepast wordt in de praktijk, is het transport van het afval naar een stortplaats. Ook kan het afval verbrand worden. Dit heeft een zeer lage efficiëntie aangezien dit afval weinig calorische waarde en veel water bevat (Laufenberg, Kunz, & Nystroem, 2003). Bovendien zorgt verbranding voor lucht- en milieuvervuiling in het algemeen. Vast afval uit voedselproductie kan daarnaast ook gebruikt worden als (onderdeel van) dierenvoeding, vooral in veevoeding (Laufenberg, Kunz, & Nystroem, 2003). Maar dit afval bevat meestal weinig proteïnen en is daarom ook voor het gebruik in veevoeding niet ideaal. Bovendien moet het afval gedroogd worden voor het gebruikt kan worden, wat extra kosten met zich meebrengt, die meestal niet gerecupereerd kunnen worden uit de verkoop. Een andere mogelijke toepassing is het gebruik van het vast afval als bodemverbeteraar (Arvanitoyannis, Ladas, & Mavromatis, 2006). Het afval kan eerst gecomposteerd, een tijdsintensief proces, of onbewerkt gebruikt worden (Van Dyk, et al., 2013).

Voedselafval kan ook gebruikt worden om energie op te wekken (Menon & Rao, 2012). Er bestaan al verschillende non-biologische methoden zoals verbranding, vergassing, hydrothermale verwerking, etc. Het hoge watergehalte zal hier wel effect hebben op de effectiviteit van deze technologieën. Biologische methoden zijn onder andere de productie van waterstof, biogas en bio-ethanol (Van Dyk, et al., 2013). Zowel de non-biologische als de biologische methoden zullen in detail besproken worden in de literatuurstudie.

### 1.3 Onderzoeksaanpak

Een concrete planning van deze masterproef kan gevonden worden in bijlage 2.

Om het te onderzoeken probleem beter te begrijpen en inzicht te verwerven in de reeds bestaande gebruiken en technologieën van brandstoffen zal er eerst een **algemene literatuurstudie** uitgevoerd worden. Bronnen zullen online opgezocht worden via de databank Ebscohost. Om de juiste relevante wetenschappelijke artikels te vinden zullen zoektermen als "fossil fuel evolution", "energy sources", "fuels: historical development" en "fuels overview" gebruikt worden. Dit opzet is van toepassing op deelvragen een en twee.

Om een antwoord te geven op deelvraag drie en de centrale onderzoeksvraag, zal de literatuurstudie uitgebreid worden met een **empirisch onderzoek** met als doel de economische haalbaarheid van het gebruik van fruitresten als brandstof te bestuderen. Hiervoor zullen interviews met experts uit de brandstofsector, de fruitsector en experts in het vakgebied hernieuwbare energie essentieel zijn, maar er zal ook een verkennende literatuurstudie gevoerd worden met trefwoorden als "fruit waste worldwide", "valorization of food waste", "byproducts food waste", "food processing waste", etc. Uit het empirisch onderzoek zullen conclusies getrokken worden aan de hand van eigen berekeningen.

De opzet van een empirisch onderzoek is het verzamelen en analyseren van kwalitatieve data. Het probleem met het analyseren van kwalitatieve data is dat, in vergelijking met kwantitatieve data-analyse, er weinig tot geen algemeen aanvaarde regels en richtlijnen bestaan om de kwalitatieve data te analyseren. De analyse van de kwalitatieve data zal in deze masterproef gebaseerd worden op het werk van Miles & Huberman (1994). Volgens Miles en Huberman zijn er drie algemene stappen die gevolgd moeten worden bij het analyseren van kwalitatieve data: (1) data reductie; (2) weergeven van de data en (3) het trekken van conclusies.

De eerste stap, **data reductie**, verwijst naar het feit dat er bij het verzamelen van kwalitatieve data enorme hoeveelheden data gegenereerd worden. Dit kan problematisch zijn wanneer er geen consequente methode toegepast wordt om de data overzichtelijker te maken en te verminderen. Data reductie kan het best verkregen worden door een systeem van codering en categorisatie toe te passen. Codering bestaat uit het herkennen van patronen en bepaalde consistenties in de overvloed aan data. Categorisatie volgt logischerwijs als volgende stap: de data rangschikken op een goed georganiseerde manier.

De tweede stap die moet doorlopen worden bij het analyseren van de data, is het **weergeven van de data**. Deze stap impliceert het weergeven van de gereduceerde data uit de vorige stap op een georganiseerde en overzichtelijke manier. Dit zal zowel gebeuren in de vorm van tekst als op een grafische manier met behulp van relevante grafieken en tabellen.

De derde en laatste stap is het **trekken van conclusies**. Het trekken van conclusies is de essentie van het analyseren van kwalitatieve data, en dit zal vooral toegepast worden bij deelvraag drie. Deelvraag een en twee geven eerder een overzicht van de literatuur en de huidige situatie, waar

deelvraag drie nieuwe, relevante conclusies zal kunnen voortbrengen. De conclusies zullen een antwoord kunnen bieden op de deelvraag en de centrale onderzoeksvraag door mogelijke verklaringen en scenario's te vergelijken voor de geobserveerde patronen en linken in de data.

Het is belangrijk dat de getrokken conclusies op een of andere manier geverifieerd kunnen worden. De conclusies moeten plausibel, geldig en betrouwbaar zijn. **Betrouwbaarheid** kan bij kwalitatief onderzoek anders geïnterpreteerd worden dan bij kwantitatief onderzoek. Bij kwalitatief onderzoek wordt er een onderscheid gemaakt tussen categorie-betrouwbaarheid en interbeoordelaars-betrouwbaarheid. Categorie-betrouwbaarheid hangt af van het vermogen van de analist om categorieën te formuleren en te verantwoorden waarom bepaalde items wel of niet in bepaalde categorieën horen. Categorie-betrouwbaarheid slaat dus op het goed classificeren van de kwalitatieve data. Goed gedefinieerde categorieën leiden tot een hogere categorie-betrouwbaarheid en uiteindelijk ook tot een hogere interbeoordelaars-betrouwbaarheid. Interbeoordelaars-betrouwbaarheid hangt af van hoe consistent de onderzoeksresultaten zijn in vergelijking met gelijksoortig onderzoek door andere onderzoekers. Interbeoordelaars-betrouwbaarheid geeft dus weer of de resultaten de data juist interpreteren en of de resultaten veralgemeend kunnen worden naar andere contexten (Kassarjian, 1977).

Om de conclusies te verifiëren en voldoende categorie- en interbeoordelaars-betrouwbaarheid te verkrijgen zal de techniek van **triangulatie** toegepast worden. Algemeen gesteld is triangulatie het gebruiken van verschillende methodes. De idee erachter is dat het vertrouwen in de resultaten stijgt wanneer verschillende methoden of verschillende bronnen van data leiden tot dezelfde resultaten. In deze masterproef zullen twee methoden van triangulatie toegepast worden: data triangulatie en theorie triangulatie. Data triangulatie betekent dat er data van verschillende bronnen zullen verzameld worden. Zo zullen er data verzameld worden van literaire bronnen, maar ook via interviews met verschillende experts. Theorie triangulatie slaat op het gebruiken van verschillende theorieën en perspectieven om de data te interpreteren en analyseren. In deze masterproef zal er vooral vanuit een economische invalshoek naar de data gekeken worden, maar ook andere factoren zoals milieu en samenleving zullen in het achterhoofd gehouden worden (Sekaran & Bougie, 2013).

Zoals al eerder vermeld zal er voor de derde deelvraag gebruik gemaakt worden van **interviews met experts** om de nodige data te verzamelen. Het voordeel van interviews als methode om gegevens te verzamelen, is de flexibiliteit. Bij het uitvoeren van interviews kan er altijd gekozen worden om de vragen aan te passen naargelang de situatie of hoe het interview vordert. Enquêtes mogen dan wel efficiënter zijn op het vlak van tijd en energie, ze bieden niet voldoende vrijheid en flexibiliteit als methode van dataverzameling om te gebruiken voor de derde deelvraag van deze masterproef (Sekaran & Bougie, 2013).

Bij het zoeken naar experts om te raadplegen, wordt er gebruik gemaakt van het **sneeuwbalprincipe**. Aan elke expert die geraadpleegd wordt, wordt gevraagd wie hij of zij nog aanbeveelt om te interviewen als volgende stap in het uitwerken van de masterproef. Hierdoor vermenigvuldigt het aantal te raadplegen experts snel en kunnen er doordachte keuzes gemaakt

worden op basis van de aanbevelingen van de experts. Elk interview levert meerdere nieuwe potentiële interview-kandidaten op.

Interviews kunnen gestructureerd of ongestructureerd zijn. Bij het verzamelen van data voor deze masterproef zal er gebruik gemaakt worden van **ongestructureerde interviews**. De gestelde vragen zullen breed en open zijn om zo een zo goed mogelijk beeld te krijgen over het onderwerp. Na verschillende interviews op die manier gedaan te hebben, kan er nog gekeken worden naar welke aspecten meer aandacht zouden nodig hebben om vervolgens gestructureerde interviews te doen om die additionele data te verzamelen (Sekaran & Bougie, 2013).

Aangezien het gaat om een relatief complex onderwerp en elk interview relatief lang zal duren, zullen de interviews in persoon gebeuren en niet via de telefoon of internet. Daarnaast kunnen de vragen makkelijk aangepast worden tijdens het interview om bijvoorbeeld twijfel of onduidelijkheden op te lossen. Daarnaast kan er ook non-verbale communicatie opgevangen worden. De nadelen van persoonlijke interviews, namelijk geografische beperkingen en energie en tijd die erin gestoken moeten worden, zijn niet van toepassing voor dit onderzoek. De geografische beperkingen vormen geen beperking voor de kwaliteit van het onderzoek.

De keuze van experts om te interviewen wordt bepaald door de beroepsuitoefening van de potentiële expert en diens verwachte kennis op het voor deze masterproef relevante gebied. Op voorhand kan er niet met zekerheid gesteld worden of elke gecontacteerde expert informatie kan bieden die waardevol is voor deze masterproef, maar door voldoende potentiële experts te contacteren moet dit probleem verholpen kunnen worden. Een lijst van de geraadpleegde experts kan gevonden worden in bijlage 3.

Het criterium om te bepalen wanneer gestopt kan worden met het uitvoeren van de interviews is de **theoretische saturatie**. Theoretische saturatie betekent dat er geen additionele gegevens verkregen worden door het voeren van bijkomende interviews. Dit gebeurt wanneer er bij het interviewen van nieuwe experts geen nieuwe gegevens aan bod komen (Glaser & Strauss, 1967). Bij het uitvoeren van het kwalitatieve onderzoek voor de derde deelvraag van deze masterproef werd theoretische saturatie bereikt na 6 interviews met experts.



## Hoofdstuk 2: Definiëring en soorten brandstoffen

### **2.1 Soorten brandstof**

De meest algemene definitie stelt dat een brandstof een materiaal is dat gebruikt wordt om hitte en energie te leveren door de verbranding ervan. De grote meerderheid van de brandstoffen die momenteel wijdverspreid gebruikt worden zijn fossiele brandstoffen. Het gaat dan voornamelijk om drie grote categorieën: natuurlijk gas, brandstoffen gebaseerd op steenkool en brandstoffen afgeleid uit olie. Natuurlijk gas wordt voornamelijk gebruikt in vaste installaties; aangezien natuurlijk gas moeilijk op te slaan is, is het minder geschikt voor mobiel gebruik. Een voorbeeld van zo een vaste installatie is de verwarmingsinstallatie in woningen. Steenkool wordt ook bijna uitsluitend gebruikt in vaste installaties omwille van praktische redenen. Een voorbeeld hiervan is een steenkoolcentrale waar door middel van de kolen elektriciteit opgewekt wordt.oliebrandstoffen zijn daarentegen wel geschikt voor mobiel gebruik omwille van het makkelijke transport op kleine schaal en het mogelijke gebruik van deze brandstof in mobiele installaties. Benzine in een automotor is een voorbeeld van deze categorie brandstoffen (Astbury, 2008).

Er zijn al heel wat alternatieve brandstoffen beschikbaar en in ontwikkeling die mogelijk de fossiele brandstoffen zouden kunnen vervangen. Om als brandstof in aanmerking te komen, moet er voldaan worden aan verschillende voorwaarden. De belangrijkste voorwaarde is dat een brandstof ontvlambaar moet zijn. Zonder deze eigenschap is een kandidaat-brandstof sowieso niet bruikbaar als brandstof. Om te kunnen ontsteken, moet een brandstof gemengd kunnen worden met een geschikt oxidatiemiddel om zo een ontvlambare atmosfeer te creëren. Een voorbeeld hiervan is benzine, de brandstof, die gemengd moet worden met zuurstof, het oxidatiemiddel, om ontvlambaar te kunnen zijn. Een interessant concept dat hier relevant is, is het concept van de vuurdriehoek (zie grafiek 11). Dit concept zegt dat de volgende drie elementen aanwezig moeten zijn om de brandstof te kunnen doen ontvlammen: de brandstof zelf (bijvoorbeeld benzine), het oxidatiemiddel (bijvoorbeeld zuurstof) en een bron van ontsteking (bijvoorbeeld een vlam). Het ontbreken van een van de drie componenten is dus ook altijd voldoende om de ontsteking van de brandstof te voorkomen (Astbury, 2008).

Grafiek 11: Vuurdriehoek



Bron: Astbury (2008)

Brandstoffen kunnen ook onderverdeeld worden in categorieën naargelang de vorm waarin ze opgeslagen en gebruikt worden. Bij de traditionele (fossiele) brandstoffen zijn de vorm waarin ze gebruikt en opgeslagen worden meestal identiek. Benzine bijvoorbeeld wordt opgeslagen en ingespoten in de motor als vloeistof. Bij alternatieve brandstoffen is er vaker verschil tussen vorm van gebruik en opslag. Het bekendste voorbeeld hiervan zijn afvalsolventen, die vaak variëren in vorm (Astbury, 2008). Bovendien moeten alternatieve brandstoffen een relatief consistent aanbod

hebben, zodat de toestellen om de brandstof te gebruiken ontworpen kunnen worden volgens de specifieke ontstekings-eigenschappen van die alternatieve brandstof.

Daarnaast kunnen brandstoffen in de volgende drie categorieën onderverdeeld worden: (1) organische brandstoffen; (2) anorganische brandstoffen en (3) kernbrandstoffen.

**Organische brandstoffen** zijn brandstoffen die koolstof bevatten. Bij organische brandstoffen wordt de energie vrijgegeven door een chemische reactie. De meest voorkomende chemische reacties zijn oxidatie en verbranding. Onder de categorie organische brandstoffen vallen alle fossiele brandstoffen die allemaal koolstof bevatten, maar ook biobrandstof en biomassa. In tabel 4 worden de verschillende soorten brandstoffen per categorie opgesomd.

Een tweede categorie is de groep van de **anorganische brandstoffen**. Anorganische brandstoffen bevatten geen covalente koolstof-waterstofbinding waardoor ze niet in de categorie van organische brandstoffen vallen. Anorganische brandstoffen wekken energie uitsluitend op uit oxidatie. Dit is het geval bij waterstofgas.

Bij de derde en laatste groep brandstoffen, namelijk **kernbrandstoffen**, is er geen sprake van energieopwekking via een chemische reactie, maar wel via een kernreactie. De energiedichtheid van een kernbrandstof is veel hoger dan de energiedichtheid van brandstoffen die gebruikt worden in een chemische reactie. Het verschil tussen een kernreactie en een chemische reactie is dat bij een chemische reactie de kernen van de atomen ongewijzigd blijven. Het zijn enkel de elektronen van de atomen die zich gaan verplaatsen tussen de atoomkernen. Bij een kernreactie worden de kernen wel beïnvloed: bij een kernreactie ontstaat energie doordat een deel van de massa tijdens het proces verdwijnt; de massa's voor en na de kernreactie verschillen. Waar er bij organische en anorganische brandstoffen warmte vrijkomt als energieproduct, komt er bij het gebruik van kernbrandstoffen kinetische energie of gammastraling (elektromagnetische straling met een hoge energie) vrij. Hierdoor is de energie die vrijkomt bij kernbrandstoffen vele malen groter dan de energie die vrijkomt bij organische en anorganische brandstoffen. Voorbeelden van brandstoffen die gebruikt kunnen worden bij kernreacties zijn uranium, plutonium en deuterium (Rashad & Hammad, 2000). Een overzicht van de verschillende soorten brandstoffen kan gevonden worden in tabel 4.

Tabel 4: Soorten brandstoffen

Organische brandstoffen	Anorganische brandstoffen	Kernbrandstoffen
<ul style="list-style-type: none"><li>• Benzine</li><li>• Diesel</li><li>• Kerosine</li><li>• LPG</li><li>• Steenkool</li><li>• Biomassa</li><li>• Aardgas</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Waterstof</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Plutonium</li><li>• Uranium</li><li>• Deuterium</li></ul>

Bron: Rashad & Hammad (2000)

## 2.2 Kenmerken van een brandstof

Er bestaan ontzettend veel kenmerken om allerlei soorten brandstoffen te categoriseren, maar die kenmerken zijn vaak erg technisch, nietszeggend of slechts relevant voor een verwaarloosbare groep brandstoffen. De kenmerken die hier beschreven worden zijn de meest gebruikte om de belangrijkste brandstoffen te onderscheiden, en bieden de meeste mogelijkheden om tot een vergelijking te komen tussen de verschillende soorten brandstoffen.

Het **octaangetal** is een maatstaf voor de waarschijnlijkheid van de brandstof om te ontsteken tijdens het verbrandingsproces in traditionele verbrandingsmotoren. Verbranding in een motor met vonkontsteking hangt vooral af van het design van de motor en de kwaliteit van de brandstof. Onder ideale omstandigheden verspreidt de vlam, resulterend uit de vonk, zich gelijkmatig over de verbrandingsruimte tot alle brandstof verbrand is. De temperatuurstijging als gevolg van het verspreiden van de vlam resulteert in een verhoogde druk in de zogenaamde eindgaszone: dit is het deel van de mengeling van brandstof en lucht waar de vlam nog niet geraakt is. De stijging van temperatuur en druk zorgt ervoor dat de brandstof pre-vlamreacties ondergaat. Tussen de belangrijkste van die reactieproducten bevinden zich de zeer temperatuurgevoelige peroxiden. Als deze peroxiden een bepaald concentratiegehalte overstijgen, zal het gas in de eindgaszone ontbranden voor de vlam van de ontsteking de eindgaszone bereikt. Deze ontbranding zorgt dan voor de uiteindelijke ontsteking, het zogenaamde "kloppen". De verschillende types koolwaterstoffen in brandstof gedragen zich verschillend in hun pre-vlamreacties en dit resulteert in verschillen in hun neiging tot kloppen. Het octaangetal van een brandstof is dan een maatstaf voor de mate waarin de brandstof de neiging tot kloppen heeft, waar een hoger octaangehalte staat voor een hogere neiging tot kloppen (Hsieh, Chen, Wu, & Lin, 2002). Hoe hoger het octaangetal is, hoe minder makkelijk de vloeistof zal ontploffen. Een goede motor die brandstoffen van een laag octaangetal kan tolereren kan dan ook brandstoffen van een hoog octaangetal tolereren, maar een motor die minder goed ontworpen is zal enkel brandstoffen van een hoog octaangetal kunnen tolereren om ontploffingen te voorkomen (Astbury, 2008). Om dan van nieuwe

(alternatieve) brandstoffen het octaangetal te meten, worden deze brandstoffen vergeleken met verschillende standaardmengsels in een standaard testmotor totdat er vergelijkbare ontstekingswaarschijnlijkheden bereikt worden. Zo krijgt de nieuwe, onbekende brandstof hetzelfde octaangetal als het vergelijkbare standaardmengsel uit de test (Gordon, 1991).

Diesel, kerosine en steenkool krijgen geen octaangetal toegekend omdat zij zeer makkelijk ontsteken onder hoge druk. Hierdoor zijn zij niet geschikt om gebruikt te worden in benzinemotoren waardoor het octaangetal in dat geval niet relevant is. Daarnaast worden de nucleaire brandstoffen vooral veel andere parameters gebruikt om ze onderling te kunnen vergelijken. Aangezien het vergelijken van de kenmerken van nucleaire brandstoffen een onderzoek op zich zou kunnen vormen, wordt er op deze kenmerken in deze masterproef niet verder ingegaan. De samenstelling van biomassa varieert dan weer in dergelijke mate, dat eigenschappen toekennen aan de brandstof in het algemeen onmogelijk is. In tabel 5 kan een overzicht gevonden worden van de octaangetallen van de verschillende soorten brandstoffen.

Het **cetaangetal** is een indicatie van de ontstekingskwaliteit van diesel. Het is een maatstaf van de ontstekingsvertraging tussen de start van de injectie in de motor en de eigenlijke verbranding van de brandstof. Een hoger cetaangetal staat voor een kortere ontstekingsvertraging dan een lager cetaangetal. In modernere dieselmotoren impliceert een brandstof met een lager cetaangetal slechte prestaties, en mogelijk zelfs schade aan de motor. Het is ook belangrijk dat diesel, of de alternatieve brandstof die in aanmerking zou komen om diesel te vervangen, voldoende glad is. Hiermee wordt bedoeld dat de werking van een dieselmotor vereist dat de brandstof de motor ook smeert. Indien dit niet, of in beperkte mate, het geval is, zal de brandstof een negatief effect hebben op de levensduur van de dieselmotor. Aangezien het cetaangetal enkel van toepassing is op diesel, wordt deze categorie niet weergegeven in tabel 5.

Het **ontvlammingspunt** is de temperatuur waarbij de dampdruk voldoende hoog is om een concentratie brandbare lucht boven de vloeistof te vormen. Dit is een maatstaf om vloeibare brandstoffen te categoriseren. Vloeibare brandstoffen moeten dus altijd in een omgeving met een temperatuur onder hun ontvlammingspunt opgeslagen worden. Anders bestaat er altijd een risico op vorming van brandbare dampen die een ontploffing kunnen veroorzaken (NFPA, 1986).

De **zelfontstekingstemperatuur** is een eigenschap die toepasbaar is op vloeibare en gasvormige brandstoffen. Het is de minimumtemperatuur waarbij de brandstof spontaan ontsteekt in een gesloten ruimte (NFPA, 1986).

De **minimale ontstekingsenergie** is het minimale energieniveau dat vereist is om het mengsel van brandstof en zuurstof te ontsteken (Haas, 1977).

Tabel 5: Kenmerken van de verschillende soorten brandstoffen

Brandstof	Octaangetal	Ontvlammingspunt (°C)	Zelfontstekingstemperatuur (°C)	Minimale Ontstekingsenergie (mJ)
Steenkool	N/A	127	349	/
Waterstof	Geen data	Gas	500	0,14
Benzine	≥95	-43	450	0,2
Diesel	N/A	>52	338	0,2
Kerosine	N/A	>38	295	0,65
LPG	>104	Gas	450	0,25
Biomassa	Samenstelling varieert	Samenstelling varieert	Samenstelling varieert	Samenstelling varieert
Aardgas	99	Gas	580	0,14
Plutonium	/	/	/	/
Uranium	/	/	/	/
Deuterium	/	/	/	/

Bron: Astbury (2008)

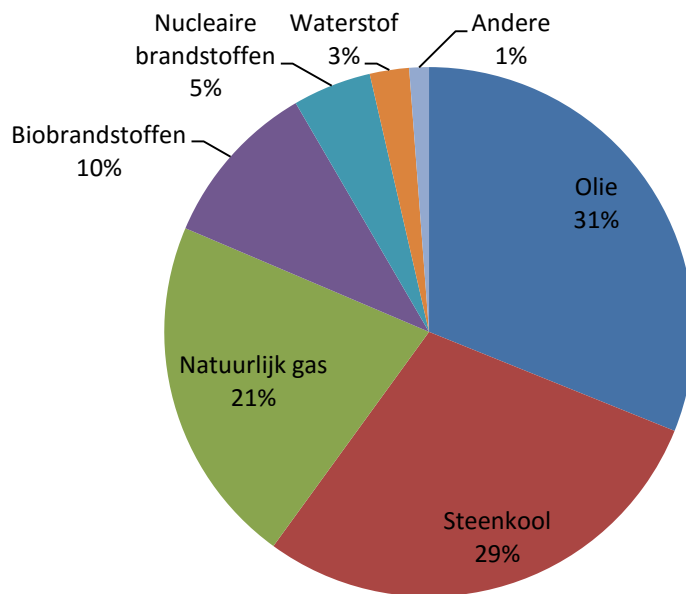
### 2.3 Aanbod en vraag van de soorten brandstoffen

Het Internationale Energie Agentschap (IEA) heeft in haar meest recente rapport van 2015 data opgenomen over het wereldwijde aanbod en consumptie van de verschillende soorten brandstoffen. De totale brandstofproductie wereldwijd in 2013 komt neer op 13 541 Mtoe (million tons of oil equivalent), terwijl de totale consumptie 9 301 Mtoe bedroeg. De reden voor het verschil in hoeveelheid tussen productie en consumptie is het feit dat er in de meeste gevallen nog bewerkingsstappen worden uitgevoerd voordat het product geconsumeerd kan worden.

Het Internationale Energie Agentschap categoriseert de verschillende soorten brandstoffen als volgt: (1) steenkool, (2) waterstof, (3) olie, (4) biobrandstoffen, (5) natuurlijk gas, (6) nucleaire brandstoffen en (7) overige brandstoffen (IEA, 2015). Benzine, diesel en kerosine vallen allemaal onder de categorie olie. LPG daarentegen wordt voor 60% gewonnen uit gas en voor 40% uit olie, maar wordt door het IEA geheel toegewezen aan de categorie olie.

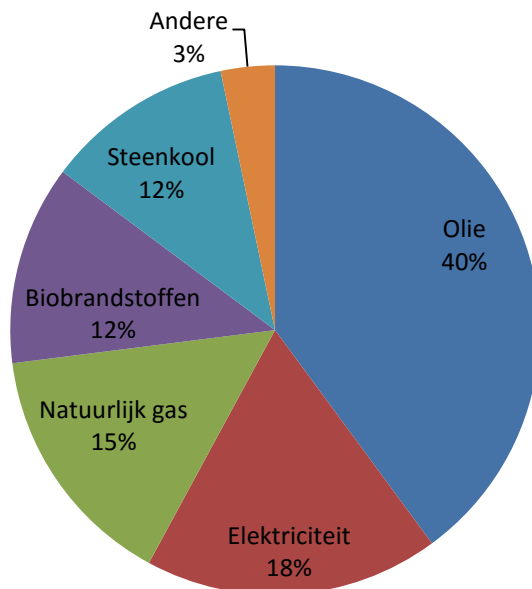
In grafieken 12 en 13 worden de aandelen van de verschillende soorten brandstoffen in de wereldwijde brandstofproductie en -consumptie weergegeven.

Grafiek 12: Wereldwijde brandstofproductie (2013)



Bron: IEA (2015)

Grafiek 13: Wereldwijde energieconsumptie (2013)

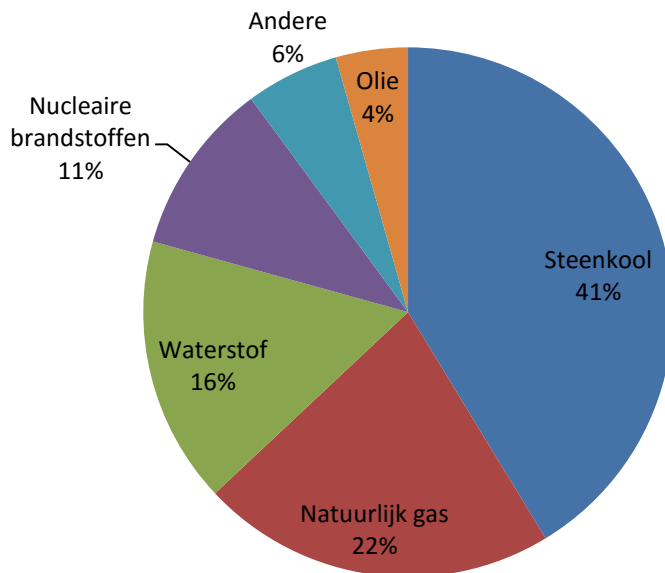


Bron: IEA (2015)

De elektriciteit die geconsumeerd wordt heeft een aandeel van 18% in de wereldwijde energieconsumptie. De opwekking van elektriciteit gebeurt door het verwerken van de volgende categorieën van brandstoffen: (1) steenkool, (2) waterstof, (3) olie, (4) natuurlijk gas, (5) nucleaire brandstoffen en (6) andere soorten brandstoffen. In grafiek 14 kan een overzicht

gevonden worden van het aandeel van elk van de bovenstaande categorieën brandstoffen in de elektriciteitsproductie.

Grafiek 14: Aandeel van brandstoffen in de elektriciteitsproductie



Bron: IEA (2015)

## 2.4 Toepassingen

### 2.4.1 Steenkool

Van de totale wereldwijde consumptie van 1 069 Mtoe steenkool in 2013 werd 78,9% door de industriesector gebruikt. 6,1% werd gebruikt voor niet-energetische doeleinden, terwijl slechts 0,3% gebruikt werd voor transport. De overige 14,7% werd gebruikt voor allerlei toepassingen in allerlei sectoren, zoals de landbouwsector, de commerciële sector, de publieke sector of in privéwoningen.

### 2.4.2 Olie

Olie en afgeleiden werden vooral gebruikt voor transportdoeleinden, met een aandeel van 63,8% op een totale olieconsumptie van 3 716 Mtoe. 16,2% werd gebruikt voor niet-energetische doeleinden. De industriesector neemt met 8,4% slechts een klein aandeel in van de totale olieconsumptie wereldwijd. De overige 11,6% werd gebruikt voor allerlei toepassingen in allerlei sectoren, zoals de landbouwsector, de commerciële sector, de publieke sector of in privéwoningen.

### 2.4.3 Natuurlijk gas

Bij natuurlijk gas is de consumptie veel meer verspreid dan bij de andere brandstoffen. Maar liefst 44,8% wordt algemeen toegeschreven aan de categorie "overige", waaronder allerlei

toepassingen in allerlei sectoren (zoals de landbouwsector, de commerciële sector, de publieke sector of gebruik in privéwoningen), vallen. De tweede grootste verbruiker van natuurlijk gas is de industriesector, met een aandeel van 37,2% op een totale consumptie van 1 401 Mtoe. Het gebruik voor niet-energetische doeleinden bedraagt 11,1%, terwijl de transportsector 6,9% van de totale natuurlijk gasconsumptie voor zijn rekening neemt.

#### **2.4.4 Elektriciteit**

Aangezien veel brandstoffen omgezet worden in elektriciteit voor consumptie, is het interessant om even stil te staan bij de toepassingen waarvoor elektriciteit gebruikt wordt. Volgens de gegevens van het IEA neemt de industriesector van de totale elektriciteitsconsumptie van 1 677 Mtoe, 42,3% voor zijn rekening. De transportsector is slechts voor 1,5% van de totale elektriciteitsconsumptie verantwoordelijk, waardoor er ook hier, net zoals bij natuurlijk gas, vooral sprake is van een zeer verspreid gebruik. Zo zijn allerhande toepassingen in allerlei sectoren (zoals de landbouwsector, de commerciële sector, de publieke sector of gebruik in privéwoningen) verantwoordelijk voor 56,2% van de elektriciteitsconsumptie.

#### **2.4.5 Biobrandstoffen**

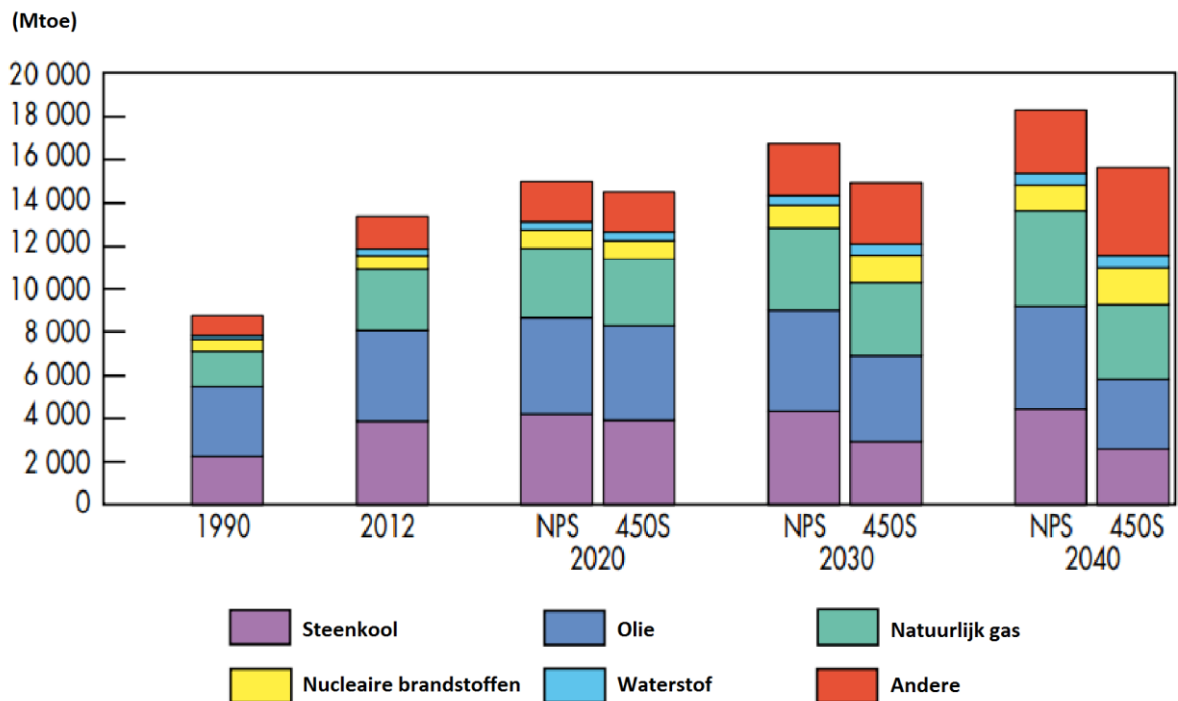
Aangezien biobrandstoffen voor veel verschillende doeleinden gebruikt worden en er weinig juiste gegevens bestaan over de hoeveelheden die aan elke toepassing kunnen toegewezen worden, kunnen er momenteel nog geen conclusies getrokken worden over de manieren waarop biobrandstoffen gebruikt worden. De cijfers die wel al bestaan zijn vaak gebaseerd op ruwe schattingen, waardoor een juist beeld schetsen van het gebruik van biobrandstoffen moeilijk wordt.

### **2.5 Verwachte evoluties**

Om te kunnen voorspellen hoe het aanbod van de verschillende soorten brandstoffen zal evolueren, maakt het IEA een onderscheid tussen twee mogelijke scenario's. Het eerste scenario waarmee rekening gehouden wordt om de evoluties te voorspellen is het New Policies Scenario (NPS). Het NPS is gebaseerd op de beleidsmaatregelen die momenteel op tafel liggen en al dan niet zullen doorgevoerd worden. Het tweede scenario is het 450 Scenario (450S), waarbij gerekend wordt op de vereiste beleidsmaatregelen om de globale gemiddelde temperatuurstijging te beperken tot 2°C. Dit scenario is gunstiger dan het New Policies Scenario, maar vereist wel grotere inspanningen. Zo staat 450 voor het doel om op de lange termijn de concentratie van de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen te stabiliseren op 450 PPM (Parts Per Million) CO<sub>2</sub>-equivalent. Een verdere verdieping in de verschillen tussen de scenario's valt buiten het bestek van deze masterproef. In grafiek 15 wordt een overzicht gegeven van de verwachte evolutie van de brandstofproductie tot en met 2040, waarbij biobrandstoffen bij de categorie "Andere" horen.



Grafiek 15: Voorspellingen brandstofproductie



Bron: IEA (2015)

Wat meteen opvalt, wanneer de twee scenario's vergeleken worden, is dat in het geval van het 450 Scenario de totale brandstofproductie minder zou zijn dan in het geval van het New Policies Scenario. Dit verschil is te wijten aan het doorvoeren van beleidsmaatregelen die leiden tot een efficiënter gebruik van alle brandstofsoorten. Het gaat dan niet alleen om een efficiëntere toepassing bij consumptie, maar ook om betere verwerkingstechnieken en minder verspilling in het algemeen. Daarnaast zijn de aandelen van steenkool, olie en natuurlijk gas kleiner in de totale brandstofproductie bij 450S dan bij NPS, terwijl het aandeel van andere brandstofsoorten zoals biobrandstoffen groter is bij 450S dan bij NPS, net zoals het aandeel van nucleaire brandstoffen. Ook deze voorspellingen zijn toe te wijzen aan de strengere beleidsmaatregelen bij 450S om de CO<sub>2</sub>-uitstoot te beperken.

Daarnaast zou volgens de voorspellingen in het geval van het 450 Scenario minder energie geconsumeerd worden dan in het New Policies Scenario; nl. 10 748 Mtoe in het geval van 450S en 12 487 Mtoe in het geval van NPS. Zoals eerder vermeld is dit verschil toe te wijzen aan het verschil in beleidsmaatregelen die zouden leiden tot een efficiënter gebruik van de brandstofsoorten.



## Hoofdstuk 3: Huidige en toekomstige evoluties op het vlak van brandstoffen

In dit hoofdstuk zal een overzicht gegeven worden van wat de huidige en toekomstige evoluties op het vlak van brandstoffen met zich mee zullen brengen. Alternatieve brandstoffen zullen variëren in hun gebruik. Sommige soorten zullen relatief makkelijk algemeen gebruikt worden omdat ze toegepast kunnen worden in de bestaande technologie, terwijl andere mogelijk verregaande technologische ontwikkelingen vereisen.

Er worden momenteel verschillende substanties en hun natuurlijke bronnen onderzocht als mogelijke alternatieven voor fossiele brandstoffen. De gebruiksmogelijkheden hangen af van de criteria die hier eerder al besproken werden (zie Hoofdstuk 2). Er wordt vooral gekeken naar hoe de nieuwe mogelijkheden gelijken op en verschillen van standaard fossiele brandstoffen. De bekendste en populairste mogelijkheden zijn ethanol, glycerol, biodiesel, waterstof en verschillende oliën. Vloeibare brandstoffen die afkomstig zijn van de CTL-technologie (Coal To Liquid) kunnen ook gezien worden als een interessant alternatief voor de conventionele brandstoffen benzine en diesel (Sangeeta, et al., 2014). De volgende alternatieve brandstoffen zijn nu al beschikbaar, of zullen makkelijk beschikbaar gemaakt kunnen worden in de nabije toekomst. Een volledige lijst geven zou praktisch onhaalbaar zijn. Daarom zijn dit de brandstoffen waarvan verwacht wordt dat ze een belangrijke rol van betekenis zullen spelen in de nabije toekomst (Astbury, 2008).

### **3.1 Bio-ethanol**

Ethanol wordt bereid door de fermentatie van suikers. Deze techniek is al langer bekend en wordt algemeen gebruikt voor menselijke consumptie in de vorm van bier, wijn en andere gedistilleerde dranken (La Rovere, 2004). Sinds de 19<sup>de</sup> eeuw wordt alcohol al gebruikt als mogelijke brandstof voor allerlei toepassingen. Zo zijn er bijvoorbeeld automotoren die werken op alcohol. Het grote nadeel en meteen de reden waarom alcohol nooit doorgebroken is als brandstof, is de hoge kostprijs. Bio-ethanol is een soort alcohol dat de laatste jaren aan aandacht wint als mogelijk alternatief voor de fossiele brandstoffen. Vooral wanneer bio-ethanol gemengd wordt met benzine zijn er heel wat voordelen aan verbonden. Ten eerste wordt bio-ethanol geproduceerd van biomassa. Dit impliceert dat bio-ethanol een bron gebruikt die reeds in de omloop is (wat CO<sub>2</sub> betreft). Dit in tegenstelling tot fossiele brandstoffen, waar in de bron broeikasgassen zitten die vrijkomen bij de ontginning ervan. Er komen dus geen nieuwe broeikasgassen van de biomassa in de atmosfeer. Daarnaast stoot bio-ethanol weinig CO<sub>2</sub> uit, en bovendien is het een veilige substantie om op te slaan en te transporteren (Crookes, et al., 1994). Hoe bio-ethanol geproduceerd wordt valt buiten het relevantiegebied voor deze masterproef.

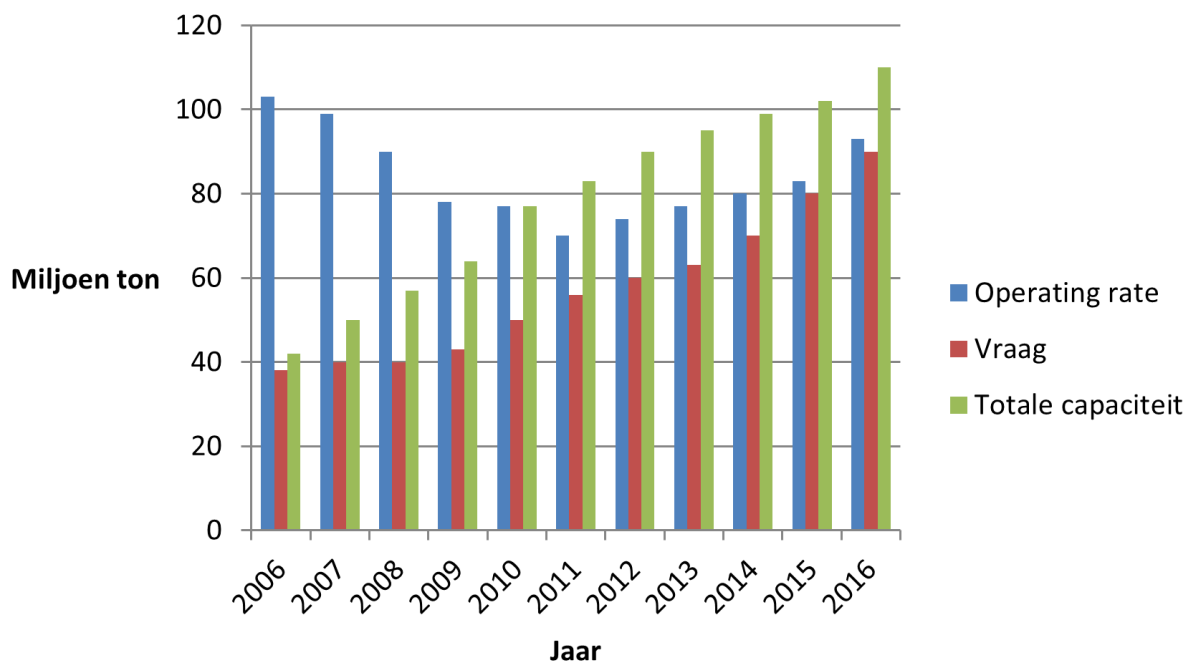
Uiteraard zijn er ook nadelen verbonden aan het gebruik van bio-ethanol. Aangezien de mogelijkheden om bio-ethanol te gebruiken vooral in de transportsector liggen, wordt hier vooral gefocust op de nadelen van bio-ethanol als transportbrandstof. Een eerste nadeel is dat bio-ethanol voor roest en corrosie kan zorgen in de motor. Daarnaast kan bio-ethanol ook reageren op onderdelen die gemaakt zijn van rubber. Bovendien is er meer bio-ethanol nodig dan benzine om

dezelfde hoeveelheid energie op te wekken. Een mengeling van bio-ethanol en benzine zou dus een mogelijke oplossing zijn om (een deel van) deze problemen op te lossen. Volgens Palmer zorgt een mengeling van 10% bio-ethanol met benzine voor een stijging van de geproduceerde energie van 5% (Cardona & Sanchez, 2007). 10% bio-ethanol blijkt ook de ideale verhouding te zijn om bepaalde nadelen, zoals roest en corrosie, van het gebruik in bestaande benzinemotoren te beperken (Palmer, 1986).

### 3.2 Methanol

Methanol wordt beschouwd als een van de belangrijkste en beste mogelijkheden om de fossiele brandstoffen in motoren te vervangen (Zhen & Wang, 2015). De vraag naar methanol is dan ook sterk gestegen, ongeveer maal 2.5 tijdens de afgelopen tien jaar, en de productiecapaciteit is tijdens diezelfde periode ongeveer drie keer zo groot geworden (Johnson, 2012) (Zie grafiek 16). Voorlopig is het veilig te veronderstellen dat het aanbod aan de volledige vraag naar methanol kan voldoen.

Grafiek 16: Wereldwijde methanol vraag en aanbod

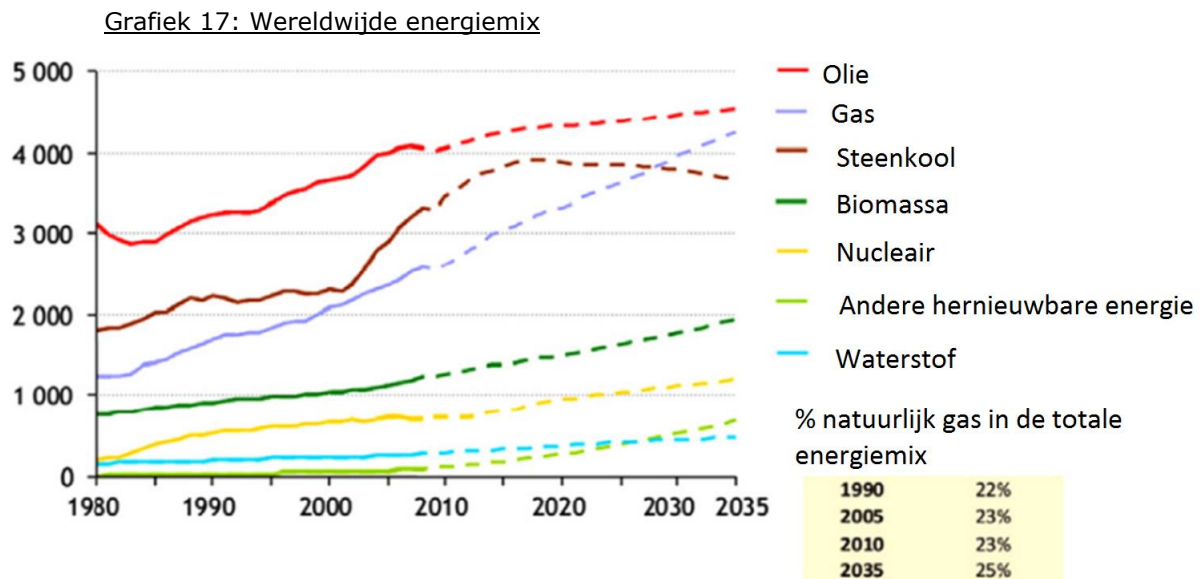


Bron: Johnson (2012)

De productie van methanol als een alternatieve brandstof kan op verschillende manieren gebeuren. Door het combineren van methaan en stoom kan het zogenaamde synthetisch gas of syngas gevormd worden. Dit syngas wordt vervolgens onder hoge druk en temperatuur omgevormd tot methanol (Lange, 2001). Een andere mogelijkheid om methanol te vormen is uit de distillatie van houtafval. Daarnaast wordt methanol al geproduceerd uit natuurlijk gas, biomassa of steenkool (Pellegrini, et al., 2011). Momenteel wordt het grootste deel van de beschikbare methanol geproduceerd uit synthetisch gas (Michigan State, 2007).

### 3.3 Natuurlijk gas

Natuurlijk gas wordt al algemeen gebruikt voor verwarming, zowel door particulieren als bedrijven, en voor elektriciteitsopwekking. In deze context van alternatieve brandstoffen is natuurlijk gas relevant voor de transportsector (United Utilities, 2007). Om als brandstof te kunnen gebruiken wordt het natuurlijk gas samengeperst tot 1% van het volume dat het inneemt bij standaard atmosferische druk (Khan, Yasmin, & Shakoor, 2015). Natuurlijk gas is momenteel een van de belangrijkste energiebronnen wereldwijd, met een aandeel van 23% in de wereldwijde energiemix (zie grafiek 17) (BP Statistical Review of World Energy, 2014).



Bron: BP Statistical Review of World Energy (2014)

De verwachting is dat natuurlijk gas steenkool inhaalt als tweede belangrijkste bron van energie tegen 2030.

Natuurlijk gas kan gebruikt worden als een brandstof op zich, maar er zijn ook mogelijkheden om natuurlijk gas te mengen met andere brandstoffen zoals bijvoorbeeld diesel. Beide manieren van gebruik hebben hun voor- en nadelen, maar deze vallen buiten de doelstelling van deze masterproef.

### 3.4 Vloeibaar petroleumgas (LPG)

LPG of vloeibaar petroleumgas wordt al gebruikt in huizen en bedrijven als brandstof in gebieden waar gaspijpen niet beschikbaar zijn. Daarnaast is het ook beschikbaar als brandstof om te koken en te verwarmen in caravans en om te kamperen. Ook voor het gebruik in de transportsector is het al geschikt, maar hier zijn toch nog enkele aanpassingen voor nodig die de verspreiding van LPG als algemeen aanvaard alternatief voor fossiele brandstoffen tegenhouden (Astbury, 2008).

### 3.5 Waterstof

Waterstof is een van de meest geschikte alternatieve brandstoffen op lange termijn vanwege de geringe uitstoot en mate van vervuiling. Waterstof kan gebruikt worden als een compacte

energiebron in brandstofcellen en batterijen. Bovendien wordt verwacht dat waterstof in de nabije toekomst aan populariteit zal winnen als brandstof in de transportsector, aangezien waterstof nagenoeg geen schadelijke stoffen uitstoot bij het uiteindelijke gebruik. In een brandstofcel is water het enige restproduct (Lam, Lee, & Mohamed, 2010). Het grote voordeel van waterstof is de beschikbaarheid: waterstof bevindt zich in meer dan 75% van de materie in het universum. In de natuur wordt waterstof altijd gevonden in combinatie met andere elementen. Zo bevat vooral water relatief veel waterstof, maar waterstof kan ook gevonden worden in biomassa, natuurlijk gas en kolen. Om waterstof als brandstof te kunnen gebruiken moet de waterstof uit deze elementen kunnen gehaald worden. Dit is al mogelijk met huidige technologie en zal naar alle waarschijnlijkheid nog vele malen efficiënter kunnen uitgevoerd worden na verder onderzoek in de toekomst. Waterstof kan vloeibaar gemaakt worden om het makkelijker te kunnen opslaan, gebruiken en transporteren (Das, Gulati, & Gupta, 2000).

Al deze eigenschappen maken van waterstof een populaire alternatieve brandstof voor de toekomst. Er is echter ook een belangrijk element waar rekening mee gehouden moet worden wanneer waterstof opgeworpen wordt als een geschikt alternatief voor conventionele brandstoffen. Waterstof is namelijk een van de twee natuurlijke elementen die combineren om water te vormen. Positief bekeken is waterstof een van de meest overvloedig aanwezige elementen op onze planeet, waardoor het een enorm potentieel heeft om de energiebron van de toekomst te worden. Dit kan enkel op voorwaarde dat waterstof op een kosteneffectieve manier geproduceerd kan worden op relatief korte termijn en het niet verloren gaat op lange termijn. Deze laatste voorwaarde is waar het schoentje knelt: als de mens er niet in slaagt om waterstof op aarde te houden, bestaat het risico dat alle leven op de planeet uitgeroeid wordt. Er is geen enkele manier van opslag, chemisch proces of manier van transport die 100% efficiënt is. Er gaat altijd wel iets verloren door bijvoorbeeld een lek. Gezien de afhankelijkheid van alle leven van water, kan zelfs een kleine vermindering van de waterhoeveelheid desastreuze gevolgen hebben, misschien zelfs erger dan de gevolgen van de opwarming van de aarde door het gebruik van fossiele brandstoffen. Dit bewustzijn moet altijd in het achterhoofd gehouden worden wanneer waterstof gepositioneerd wordt als de brandstof van de toekomst (Sangeeta, et al., 2014).

### **3.6 Afvalsolventen**

Afvalsolventen worden al gebruikt als brandstof, maar de problemen hiermee bestaan uit de kwaliteit, de brandstofwaarde en de beschikbaarheid. Ook de grote verscheidenheid in soorten afval brengen moeilijkheden met zich mee. Zo vereisen sommige soorten afval specifieke installaties, wat niet altijd rendabel blijkt te zijn (Astbury, 2008).

### **3.7 Chemische brandstoffen**

Chemische brandstoffen zijn brandstoffen bestaande uit gemengd brandbaar afval van chemische fabrieken. Deze soort is enigszins vergelijkbaar met afvalsolventen, met een zeer variabele samenstelling. Maar in tegenstelling tot afvalsolventen kunnen chemische brandstoffen vaste, opgeloste stoffen bevatten (Astbury, 2008).

### **3.8 Rubberkrumels**

Rubberkrumels zijn afkomstig van banden en van de rubberindustrie. Uit dit rubber kan olie van een hoge calorische waarde worden afgeleid die verbrand kan worden in bestaande standaard oliebrandingsinstallaties (Hansen, 1992).

### **3.9 Afvaloliën**

Er zijn twee soorten afvaloliën: enerzijds minerale oliën die meestal gerecycled worden tot smeerolie, en anderzijds plantaardige kookoliën die kunnen worden hergebruikt als brandstof. Dit hergebruik kan onbewerkt zijn, of de olie kan verwerkt worden tot biodiesel (Astbury, 2008).

Plantaardige oliën zijn lipiden, vetachtige stoffen, die uit de planten worden gehaald. Zowel pure plantaardige oliën als mengelingen van deze oliën met conventionele brandstoffen zijn mogelijke alternatieven voor de fossiele brandstoffen, dankzij de specifieke chemische elementen die zij bevatten (Luo, et al., 2010). Pure plantaardige oliën kunnen vooral in dieselmotoren de klassieke brandstof vervangen, aangezien ze geen CO<sub>2</sub> noch zwaveloxiden uitstoten. Dit komt door de afwezigheid van zwavel in deze planten. Een groot nadeel is dan wel weer dat deze oliën een relatief grote hoeveelheid NO<sub>x</sub> uitstoten. Dit probleem kan wel aangepakt worden door de traditionele motoren aan te passen. Een voorbeeld van zo een motor is de dieselmotor in een groot schip. Een bijkomend voordeel is dat de huidige methodes voor opslag en distributie niet moeten aangepast worden om plantaardige oliën op grote schaal te kunnen gebruiken (Espadafor, et al., 2009). Ruwe zonnebloemolie bijvoorbeeld heeft dezelfde hitte-afgave curve als diesel, en geeft dezelfde cilinderdruk. Daarnaast stoot een motor die zonnebloemolie als brandstof gebruikt veel minder CO<sub>2</sub> uit dan een motor die diesel als brandstof gebruikt (Canakci, Ozsezen, & Turkcan, 2009). Mengelingen van plantaardige oliën en diesel zijn ook een mogelijk alternatief voor de fossiele brandstoffen of de pure plantaardige oliën. Daarnaast wordt er ook onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van water met plantaardige olie emulsies omdat de toevoeging van water de concentratie NO<sub>x</sub> en koolwaterstof vermindert. Het nadeel van de toevoeging van water is dan weer dat er meer CO<sub>2</sub> uitgestoten wordt, wat de praktische toepasbaarheid momenteel nog belemmert (Crookes, Kiannajad, & Nazha, 1993).

### **3.10 Biomassa**

Biomassa is een bron van hernieuwbare energie die in theorie in oneindige hoeveelheden beschikbaar is, zolang er vruchtbare bodem en water bestaat (Speirs, McGlade, & Slade, 2015). Hier wordt al meteen het grootste probleem duidelijk, namelijk het feit dat de productie van biomassa vruchtbaar land gebruikt, dat bijgevolg niet gebruikt kan worden voor de productie van voornamelijk voedsel. Daarnaast is biomassa een brede term die alle vormen van natuurlijk groeiende mineralen beslaat. Voorbeeld: kippenmest, houtschilfers, rioolgas, alcohol, plantaardige olie en biogas (Astbury, 2008). Het is dus noodzakelijk om elke soort biomassa met verschillende kenmerken en eigenschappen afzonderlijk te exploiteren. Verschillende installaties voor verschillende soorten biomassa brengen uiteraard additionele kosten met zich mee (IPCC, 2011).

### **3.11 Van gas voorziene vaste stoffen**

Het materiaal waaruit vertrokken wordt is meestal hout of koolstof in de vorm van cokes, houtskool of steenkool. Uit deze vaste stoffen wordt gas gegenereerd. Het gaat dan meestal om koolmonoxide en een mengsel van waterstof (Astbury, 2008).

### **3.12 Modder uit riolen**

Modder specifiek uit riolen is een semi-vast materiaal met een variabele samenstelling. Maar wanneer deze modder gedroogd wordt, vormt dit een brandbaar poeder. Gezien de grote beschikbaarheid van dit materiaal zou het kunnen gebruikt worden in afvalverwerkingsbedrijven als brandstof op lange termijn (Astbury, 2008).

### **3.13 Glycerol**

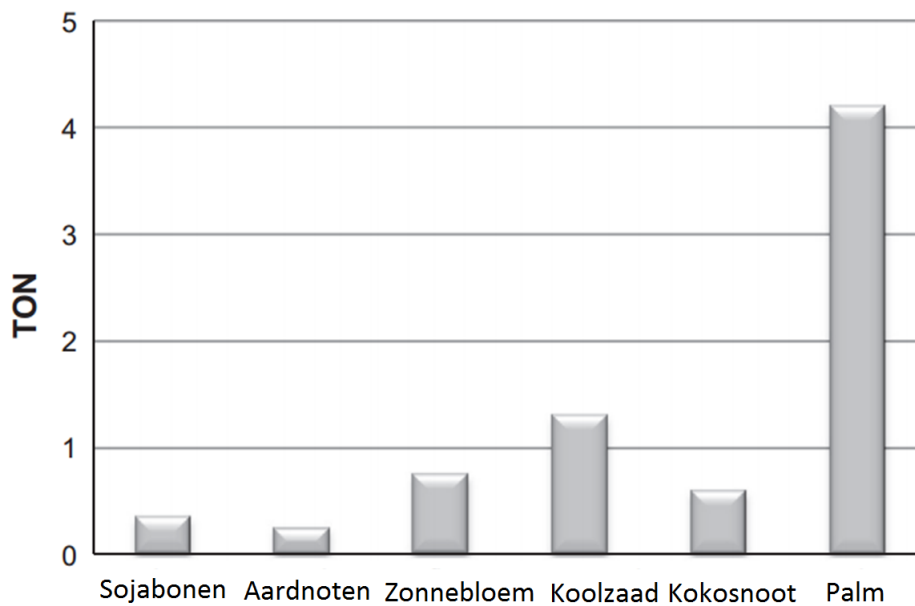
Glycerol is een van de meest voorkomende bijproducten in verschillende productieprocessen, en dient voornamelijk als bron van koolstof. Glycerol kan omgevormd worden naar veel producten zoals bio-ethanol, die bekendstaan om hun lage CO<sub>2</sub>-uitstoot (Abdel-Rahman & Osman, 1997). Glycerol kan een heel belangrijke bron zijn naar de toekomst toe, maar meer onderzoek naar waardevollere toepassingen is nodig.

### **3.14 Biodiesel**

Biodiesel is een van de meest veelbelovende brandstoffen. De verwachting is dat biodiesel benzine en diesel zal kunnen vervangen in de nabije toekomst. Biodiesel wordt momenteel vooral geproduceerd van raapzaden, maar uit recent onderzoek blijkt dat palmzaden een hogere opbrengst kunnen genereren. Aangezien ook de productiekosten van biodiesel van palmzaden lager ligt dan die van raapzaden, worden palmzaden beschouwd als een mogelijk beter alternatief (zie grafiek 18) (Tan, et al., 2009).



Grafiek 18: Opbrengsten van geselecteerde plantaardige oliën



Bron: Tan, et al. (2009)

Een van de grote voordelen van biodiesel is dat biodiesel in een verbrandingsmotor kan gebruikt worden als brandstof zonder dat er aanpassingen aan die motor vereist zijn. Een ander voordeel is dat de productie van biodiesel geen geografische beperkingen met zich meebrengt, zoals dat wel het geval is bij fossiele brandstoffen waar landen zoals België alles moeten importeren. Zo komt ongeveer 75% van alle biodiesel die wereldwijd geproduceerd wordt uit Europa (Sangeeta, et al., 2014).

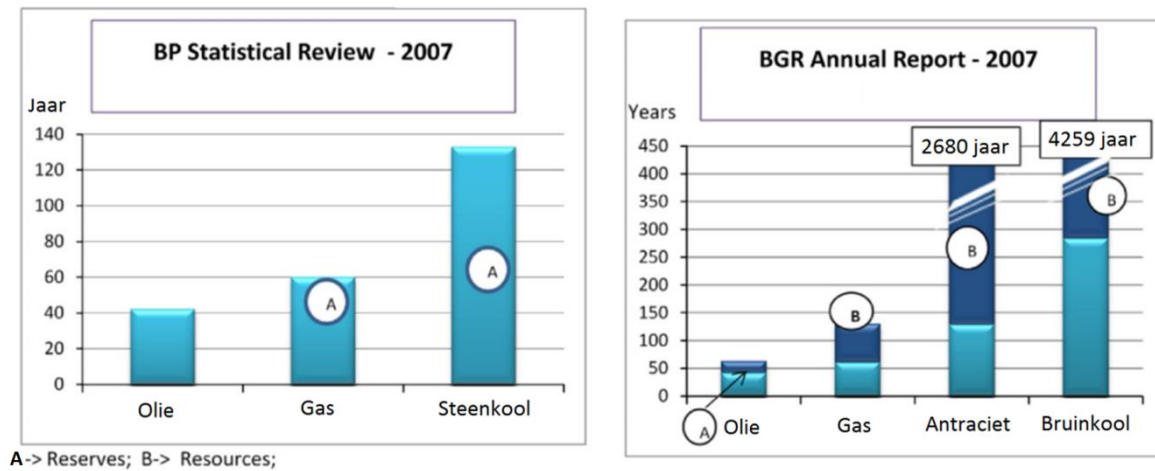
De grondstoffen die kunnen dienen voor de productie van biodiesel kunnen in drie categorieën onderverdeeld worden: (i) plantaardige oliën, (ii) frituurolie en (iii) dierlijke vetten. Van deze categorieën wordt frituurolie momenteel beschouwd als de beste grondstof om biodiesel te produceren (Sangeeta, et al., 2014). Afvalvet wordt ook gebruikt als grondstof voor de productie van biodiesel. Het is voornamelijk afkomstig uit restaurants waar het vet gescheiden wordt van het afvalwater om vervuiling van rioolleidingen tegen te gaan. Dit vet wordt gezien als een biobrandstof die voldoende verbrandingswaarde heeft om efficiënt verbrand te kunnen worden. De voordelen die hiermee verbonden zijn, zijn het feit dat het een manier is om het vetafval te verwerken, het is makkelijk te transporteren en bovendien erg goedkoop. Een van de grootste nadelen is de behandeling van het restafval na verbranding van het afvalvet.

### 3.15 CTL

CTL (Coal To Liquid) is het omzetten van steenkool in vloeibare brandstoffen. De omzetting gebeurt door het afbreken van de moleculaire structuur van de steenkool en de toevoeging van waterstof. Het grote nadeel van CTL is dat de CO<sub>2</sub>-uitstoot hoog is. Dit probleem kan wel aangepakt worden door zogenaamde Carbon Capture and Storage (CCS) technieken, maar het verbruik van zo een vloeibare brandstof geproduceerd door CTL mét CCS stoot evenveel CO<sub>2</sub> uit als conventionele brandstoffen die geproduceerd worden uit ruwe olie (Nishiyama, 1991). Het grote voordeel van

deze techniek is dan ook dat steenkool nog overvloedig beschikbaar is, dit in tegenstelling tot de almaar kleiner wordende ruwe olie- en gasreserves (zie grafiek 19) (Périneau, 2009).

Grafiek 19: Fossiele brandstofreserves



Bron: BP Statistical Review of World Energy (2007)

CTL brengt nog andere voordelen met zich mee. Zo zijn de geproduceerde brandstoffen al compatibel met de diesel- en benzinemotoren van vandaag. Bovendien zijn er geen veranderingen vereist in de infrastructuur voor het verspreiden of opslaan van de brandstof, aangezien de huidige infrastructuur hiervoor reeds geschikt is. Aangezien CTL minder zwavel bevat, zou de uitstoot van andere schadelijke stoffen dan CO<sub>2</sub> beperkt worden in vergelijking met het gebruik van benzine of diesel (Sangeeta, et al., 2014).

Er wordt ook onderzoek gedaan naar mogelijkheden om de conventionele brandstoffen efficiënter te maken. Deze onderzoeken richten zich voornamelijk op het mengen van water met olie, namelijk water-in-olie emulsies. Emulsies zijn mengsels van stoffen die van nature niet of moeilijk mengen. Water staat algemeen bekend voor het afremmen van verbranding, maar verrassend genoeg kan water ook de snelheid van verbranding verhogen. Het toevoegen van water aan bijvoorbeeld diesel verhoogt de verbrandingsefficiëntie in de ontstekingsmotor. Daarenboven vermindert de toevoeging van water de uitstoot van stikstof en zwaveloxiden (Lif & Holmberg, 2006).

## Hoofdstuk 4: Fruitresten als grondstof voor brandstofproductie

Om een antwoord te krijgen op de vraag of fruitresten een mogelijke grondstof zouden kunnen zijn voor brandstofproductie is er eerst een verkennende literatuurstudie gevoerd waaruit de belangrijkste concepten, begrippen en technieken konden gedefinieerd worden. Vervolgens werden deze academische theorieën getoetst aan de Belgische praktijk. Een samenvatting van de meest voorkomende huidige toepassingen van fruitresten in België kan gevonden worden in tabel 6. Deze verschillende toepassingen zullen in de volgende hoofdstukken verder toegelicht worden.

Tabel 6: Meest voorkomende huidige toepassingen van fruitresten in België

Toepassing	Belangrijkste voordelen	Belangrijkste nadelen
<b>Bodemverbeteraar</b>	Gemak van verwerking	Regelgeving
<b>Veevoeding</b>	Meeste toegevoegde waarde	Regelgeving
<b>Pelletiseren</b>	Hernieuwbare brandstof	Hoge kosten en gebrek aan efficiëntie
<b>Vergisting:</b>		
➤ <b>Elektriciteitsopwekking</b>	Hernieuwbare brandstof	Efficiëntie en afhankelijkheid van subsidies
➤ <b>Opwaarderen biogas</b>	Mogelijke toepassingen	Hoge kosten
<b>Bio-ethanol</b>	Toepasbaar op grote schaal	Hoge kosten

Er zijn in de literatuur verschillende studies te vinden die het bio-raffinageconcept, namelijk het gebruiken van biomassa in de plaats van fossiele brandstoffen, onderzoeken. Omwille van het al eerder vermelde probleem van competitie tussen land voor voedsel- en land voor biomassaproductie, komt de focus van de meeste onderzoeken meer te liggen op het gebruik van residuen als een secundaire energiebron. Door deze nieuwe focus worden de landbouw- en voedselsector meer en meer relevant voor het concept van bio-raffinage door de potentiële mogelijkheden om voedselafval te gebruiken als alternatieve brandstoffen (Ghatak, 2011) (Kamm & Kamm, 2004).

Bij deze deelvraag zal er vertrokken worden vanuit het concept van industriële symbiose. Er is sprake van industriële symbiose wanneer het afval of de bijproducten van het ene bedrijf of productieproces als grondstof worden gebruikt door een ander bedrijf of productieproces. De eerste stap van deze industriële symbiose in de voedselsector is het identificeren, kwantificeren en karakteriseren van de residuen (Rosentrater, 2004). Vervolgens moeten de verschillende bronnen

voedselafval geclassificeerd worden om te kunnen ontdekken hoe ze waarde kunnen leveren. Bij deze stap moet ook onderzocht worden welke conventionele en nieuwe technologieën gebruikt kunnen worden om het voedselafval te verwerken (Galanakis, 2012).

#### **4.1 Bodemverbeteraar**

Zoals al eerder vermeld, produceren de verschillende voedselindustrieën grote hoeveelheden groente- en fruitafval. Algemeen gesteld hebben groente- en fruitafval een hoge biologische afbreekbaarheid, maar stoten ze ook zeer veel methaan uit (Misi & Forster, 2002). Vroeger ging de overgrote meerderheid van de fruitresten naar de landbouwsector, om daar meestal te dienen als bodemverbeteraar. Door de alsmaar strenger wordende regelgeving is het onmogelijk geworden om deze manier te blijven toepassen en moeten bedrijven op zoek naar alternatieve verwerkingsmogelijkheden (T. Anné, persoonlijke communicatie, 4 maart, 2016).

#### **4.2 Veevoeding**

Een van die alternatieve verwerkingsmogelijkheden is het gebruiken van fruitresten voor veevoeding. Handelaars in afvalstromen verkopen voornamelijk aan de klant of sector die de hoogste prijs kan garanderen. Bij fruitresten is veevoeding zeer vaak het eerste afzetkanaal, omdat de stromen voor veevoeding meestal meer toegevoegde waarde hebben dan voor energieopwekking. Soms gaat het zelfs zo ver dat de fruitresten uitsluitend naar veevoeding gaan, behalve op momenten wanneer de veevoedermarkt verzadigd is. Bij appelpulp is er bijvoorbeeld in het najaar een piek in het aanbod door de oogst. Op die momenten wordt er naar alternatieve afzetkanalen gekeken, waardoor vergisting prominenter in beeld komt (G. de Bruijne, persoonlijke communicatie, 1 maart, 2016). Het grote nadeel van het gebruiken van fruitresten voor veevoeding is het feit dat de fruitresten GMP (Good Manufacturing Practices) gecertificeerd moeten zijn (T. De Coster, persoonlijke communicatie, 10 maart, 2016). Dit brengt extra kosten met zich mee, die er soms voor zorgen dat veevoeding opeens niet meer de meest interessante optie is op financieel vlak.

In de volgende hoofdstukken zullen verschillende mogelijke technieken besproken worden om brandstof te produceren uit fruitresten. Afvalstromen (niet enkel fruitresten) worden in de eerste plaats beoordeeld op hun droge stofgehalte (DS). Het droge stofgehalte is dat deel van het product dat niet uit water bestaat. Een appel bijvoorbeeld heeft een droge stofpercentage van ongeveer 12 – 14% (T. De Coster, persoonlijke communicatie, 10 maart, 2016). Een product met een zeer laag droge stofgehalte bevat dus al meer water in verhouding tot de waardevolle componenten dan producten die een hoger droge stofgehalte hebben.

#### **4.3 Pelletiseren**

Een mogelijke techniek om fruitafval als brandstof te gebruiken is het maken van pellets uit fruitafval, die vervolgens verbrand worden, om zo warmte en elektriciteit op te wekken. Dit is een techniek die technisch mogelijk is, maar uit de toetsing met de praktijk blijkt dat de praktische haalbaarheid in de huidige economie nihil is. Appelpulp dat al twee extracties heeft ondergaan bij de productie van fruitsappen, heeft nog een droge stofgehalte van naar schatting 20 – 25% (W. Vandeput, persoonlijke communicatie, 22 februari, 2016). In de hypothese dat de appelpulp

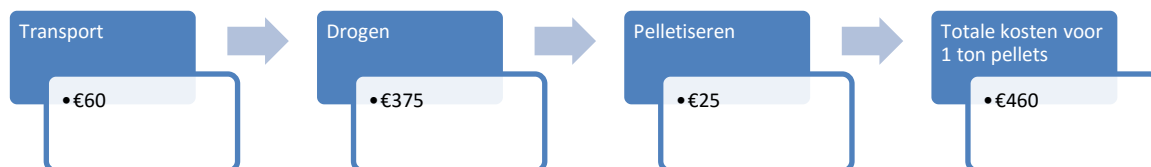
gedroogd zou moeten worden van 20% DS tot 100% DS, betekent dit, dat er voor elke ton gedroogd product, vijf ton appelpulp nodig is. 90% DS zou ook al voldoende kunnen zijn om appelpulp te kunnen pelletiseren, maar door gebrek aan onderzoek en exacte gegevens wordt hier voor de zekerheid uitgegaan van een DS van 100%. De veronderstelling is hier dat de appelpulp gratis verkregen kan worden (prijzen fluctueren sterk in tijd en ruimte). Er moet dus rekening gehouden worden met de **logistieke kosten** van de fabriek naar de drogerij, maar ook met de logistieke kosten van de drogerij naar de verbrandingslocatie (assumptie: €10/ton transportkosten).

Vervolgens moet het product gedroogd worden. **Drogen** van een nat product impliceert het verdampen van water. Fruitresten kunnen gedroogd worden in een drogingsinstallatie, waar warme lucht wordt doorgeblazen. Die warme lucht komt in contact met het vocht in de fruitresten, waardoor het vocht verdampt en het droge stofpercentage stijgt. Omdat fruitresten zoveel vocht bevatten, vraagt dit proces zeer veel energie om het gewenste droge stofpercentage te bereiken, wat bijgevolg hoge kosten met zich meebrengt (assumptie: €75/ton nat product).

De volgende stap is het **pelletiseren** van het ondertussen gedroogd product. De gedroogde fruitresten moeten eerst gemalen of verbrijzeld worden om als grondstof voor pellets te kunnen dienen. De belangrijkste reden hiervoor is dat grotere deeltjes onderdelen van de machines zouden kunnen beschadigen tijdens het persen. Vervolgens wordt er stoom of water aan de gedroogde fruitresten toegevoegd. Dit lijkt tegenstrijdig met het op voorhand drogen van de fruitresten, maar door het toevoegen van stoom of water in deze stap van het proces, ontstaat er een vloeibare laag bovenop de fruitresten, wat zorgt voor een betere persing. De fruitresten worden namelijk zachter zonder dat ze veel vochtiger worden. Hierdoor wordt de kwaliteit van de pellets verhoogd, maar het toevoegen van stoom of water komt ook de levensduur van de machines ten goede, aangezien de fruitresten minder droog zijn en dus voor minder slijtage zullen zorgen.

Vervolgens kunnen de pellets geproduceerd worden. De fruitresten worden onder druk door kleine gaatjes in een matrijs geduwd, waardoor de substantie warm en zacht wordt. Als de pellets de pers verlaten, zijn ze heet door de wrijving en de druk, geven ze nog vocht af en zijn ze nog relatief zacht van substantie. De pellets moeten dan gekoeld worden om hard te worden en te drogen. In de meeste gevallen gaat het gewoon om luchtkoeling, waardoor het proces van koeling bijna geen energie gebruikt. Wanneer de pellets afgekoeld zijn, zijn ze klaar voor gebruik. Dit hele proces zou uitbesteed kunnen worden, aangezien er voldoende ondernemingen bestaan die dit voor hun rekening zouden kunnen nemen (assumptie: €25/ton gedroogd product). Grafiek 20 geeft de verschillende kostenposten weer om van appelpulp 1 ton pellets te produceren.

Grafiek 20: Rendabiliteit pelletiseren fruitresten



Bron: G. de Bruijne, persoonlijke communicatie, 1 maart, 2016

De volgende stap is het **verkopen** van de pellets aan geïnteresseerde verbrandingsovens. Om de kosten die gemaakt zijn bij de productie van de pellets te kunnen dekken, zullen de pellets, zonder subsidies of andere tussenkomsten van de overheid, minimum €460 moeten opbrengen. De prijs die verbrandingsovens bereid zijn te betalen, hangt af van de hoeveelheid energetische waarde die er in een ton pellets zit. Gaat het dan om puur vet (zeer energierijk) of om appelproduct (weinig energierijk)? Bij het gebruiken van fruitresten als grondstof voor het maken van pellets zullen de pellets nooit veel energetische waarde bevatten (niet veel vet), waardoor het dekken van de indicatieve kost van €460/ton zeer onrealistisch is. Zelfs een zeer energierijk product is zoveel niet waard (G. de Bruijne, persoonlijke communicatie, 1 maart, 2016). Een goede indicatie is de veevoederprijs van gedroogde citrus. Hier is ook sprake van de extra transportkosten, maar in tegenstelling tot bijvoorbeeld appelpulp wordt dit product al gedroogd verkregen, waardoor de hoge drogingskosten uitgespaard kunnen worden. Het gaat dan meestal om sinaasappel- en citroenresten die op een natuurlijke wijze gedroogd zijn in het land van herkomst. Dit product komt niet al te veel voor op de Belgische markt, en de huidige marktprijs voor het gebruiken van deze gedroogde citrus als veevoeding bedraagt ongeveer €140/ton. Dit bedrag zit zo ver van het benodigde bedrag om de extra kosten van het drogen en pelletiseren van fruitresten te dekken, dat het zelfs de moeite niet loont om tijd en energie te steken in onderzoek naar manieren om deze techniek economisch interessanter te maken. Het verschil tussen kostprijs en potentiële opbrengsten is momenteel veel te groot. Alleen als de energieprijzen drastisch zouden gaan stijgen, zou deze techniek interessant kunnen worden. De laatste tijd is er echter een blijvende daling in energieprijzen waarneembaar, en in het geval van een eventuele stijging is het nog maar

de vraag of dit proces dan bij de betere energieopwekkingsmogelijkheden hoort (G. de Bruijne, persoonlijke communicatie, 1 maart, 2016).

Andere fruitsoorten kunnen weliswaar meer energetische waarde en andere waardevolle elementen bevatten dan appelpulp, maar voor fruitresten kan veralgemeend worden dat het aandeel van water altijd zo substantieel is dat bovenstaand beschreven proces momenteel economisch onhaalbaar is.

De enige mogelijkheid om de kosten bij het drogen van fruitresten lager te houden is het gebruik maken van afvalwarmte die nu nog niet gebruikt wordt. Een voorbeeld hiervan zou een schouw kunnen zijn die een warmte van 180 graden genereert. Als dan die restwarmte gebruikt zou worden om de fruitresten te drogen, zou de grootste kost in het proces van het pelletiseren drastisch verminderd kunnen worden. Het probleem met deze redenering is echter dat er zo goed als nergens een dergelijke schouw met onbenutte afvalwarmte te vinden is, aangezien niemand zoveel energie zomaar verloren laat gaan. De afvalwarmte wordt in bijna 100% van de gevallen benut.

#### **4.4 Vergisting**

Uit het gevoerde empirisch onderzoek blijkt dat de enige manier die momenteel in België toegepast wordt om energie op te wekken uit fruitresten, vergisting is. Maar zelfs voor vergisting zijn fruitresten niet de meest ideale voedingsbron. De reden hiervoor is dezelfde die eerder al werd aangehaald: fruitresten bevatten relatief weinig energetische waarde en hebben bovendien een hoge waterkwantiteit (M. Ruysen, persoonlijke communicatie, 23 februari, 2016). Biopower Tongeren nv voegt per maand 35 tot 45 ton fruitconserven toe aan hun vergistingsinstallatie, op een totale hoeveelheid van 4500 ton organisch materiaal dat per maand aan de vergistingsinstallatie gevoed wordt. Bij Group Op De Beek wordt per jaar 300 000 tot 350 000 ton afval verwerkt. Naar schatting is minder dan 20 000 ton van deze totale hoeveelheid fruit. Group Op De Beek verwerkt vooral afgekeurde bananen die niet door de douane geraakt zijn in de haven van Antwerpen (B. Leroy, persoonlijke communicatie, 10 maart, 2016). Maar bij alle vergistingsinstallaties wordt er op dezelfde manier geredeneerd: er wordt niet actief op zoek gegaan naar fruitresten om te gebruiken als grondstof voor vergisting, maar wanneer er zich toch een mogelijkheid voordoet om fruitresten te verkrijgen, wordt er gekeken naar de mogelijkheden om die fruitresten toch op een winstgevende manier te kunnen verwerken. In de volgende sectie zal het vergistingsproces kort toegelicht worden.

##### **4.4.1 Proces**

Alle vergistingsinstallaties in België doen aan natte vergisting. Droge vergisting bestaat ook, maar dan mogen er enkel producten gebruikt worden met een zeer hoog DS gehalte, of moeten de producten die water bevatten eerst gedroogd worden om vervolgens vergist te worden, wat zeer veel energie verbruikt. Zoals eerder vermeld, wordt een vergistingsinstallatie gevoed met een energiemix met een bepaalde samenstelling. Die energiemix bestaat uit de combinatie van alle materialen die aangenomen worden. Het gaat dan bijna altijd over een combinatie van energiegewassen, zoals maïs en snijrogge, en een paar afvalstromen, zoals slibs van

waterzuivering of fruitresten. De samenstelling van de energiemix verschilt niet alleen van vergister tot vergister, maar ook van dag tot dag. De kunst is om altijd dezelfde kwaliteit te bereiken met een steeds fluctuerende samenstelling. De energiemix kan zelf samengesteld worden door de vergistingsinstallatie, maar kan ook gereed aangekocht worden van een gespecialiseerd bedrijf.

Vervolgens wordt de energiemix gevoed aan de vergistingsinstallatie. In die vergistingsinstallatie zitten bacteriën die de energiemix verwerken. Tijdens dit verwerkingsproces scheiden zij biogas af. Biogas is vergelijkbaar met aardgas, maar biogas is minder zuiver. Het waardevolle bestanddeel in zowel biogas als aardgas is methaan ( $\text{CH}_4$ ). Waar aardgas voor ongeveer 82% bestaat uit methaangas, is dat bij biogas ongeveer 52 tot 54% (M. Ruysen, persoonlijke communicatie, 23 februari, 2016). Bijproducten in biogas zijn  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  en  $\text{H}_2$ . Het biogas wordt opgevangen en verbrand in gasmotoren. Deze gasmotoren drijven op hun beurt generatoren aan die zo elektriciteit produceren. Biogas kan in theorie omgezet worden in aardgas. Het resultaat van dit conversieproces wordt natuurgas genoemd. Voor dit proces zijn zuiveringsinstallaties nodig, maar aangezien er in België geen subsidies te verkrijgen zijn om die zuivering toe te passen, is dit proces financieel niet interessant. Biogas opwaarderen tot aardgas zal verder besproken worden in deel 4.5.

Bij het vergistingsproces wordt ook een afvalproduct gegenereerd, digestaat genoemd. De hoeveelheid digestaat die geproduceerd wordt, hangt af van hoeveel van het gevoede materiaal de bacteriën kunnen verteren. De maatstaf die hiervoor gebruikt wordt, is het droge stofgehalte van het product: hoe hoger het droge stofgehalte, hoe groter het aandeel dat de bacteriën kunnen verwerken. Graanresten zijn een populair product om te vergisten. Deze hebben een DS van 80 tot 95%, waarvan bijna 100% organisch materiaal. Graanresten zorgen dus voor weinig digestaat. Appelresten daarentegen hebben een DS van 10 tot 15%, waarvan ook bijna 100% organisch materiaal. Omdat appelresten zoveel water bevatten, is de productie van digestaat aanzienlijk. Waar bij 1 ton graanresten met een DS van 95% 950kg verteerbaar materiaal is, is het verteerbaar materiaal bij 1 ton appelresten met een DS van 15% slechts 150kg. Dit brengt twee gevolgen met zich mee. Ten eerste is de gasproductie uit 950kg graanresten groter dan de gasproductie uit 150kg appelresten. Ten tweede komt van de graanresten maar 50kg vrij als water, terwijl dit bij appelresten 850kg is. Water dat vrijkomt is onmiddellijk vloeibaar digestaat. Deze cijfers zijn gebaseerd op theoretische veronderstellingen, later zal duidelijk worden dat de hoeveelheid digestaat die appelresten genereren aanzienlijk kan fluctueren naargelang de energiemix en andere procesfactoren. Op het moment van schrijven kost digestaat ongeveer €20/ton om af te zetten voor de vergistingsinstallaties. De reden waarom digestaat zo duur is om af te zetten, is de nieuwe regelgeving omtrent het mestactieplan, waardoor digestaat gezien wordt als mest. Aangezien meer water betekent dat er meer digestaat zal moeten afgezet worden, wat hogere kosten met zich meebrengt, moet de vergister al goed betaald worden om fruitresten aan te nemen om de stijging van de kosten te compenseren. Het DS in fruitresten is zo laag dat de opbrengsten niet uit de biogasproductie kunnen komen, maar wel uit de prijs die zij krijgen om de fruitresten te verwerken. Enkel fruitresten vergisten is technisch zeker mogelijk, maar wanneer de opbrengsten van de biogasproductie en overname van de fruitresten vergeleken worden met de



proceskosten en de kosten van de afzet van het digestaat, wordt duidelijk dat de baten niet opwegen tegen de kosten. Dit inzicht zal op de volgende pagina's bewezen worden aan de hand van de nodige gegevens.

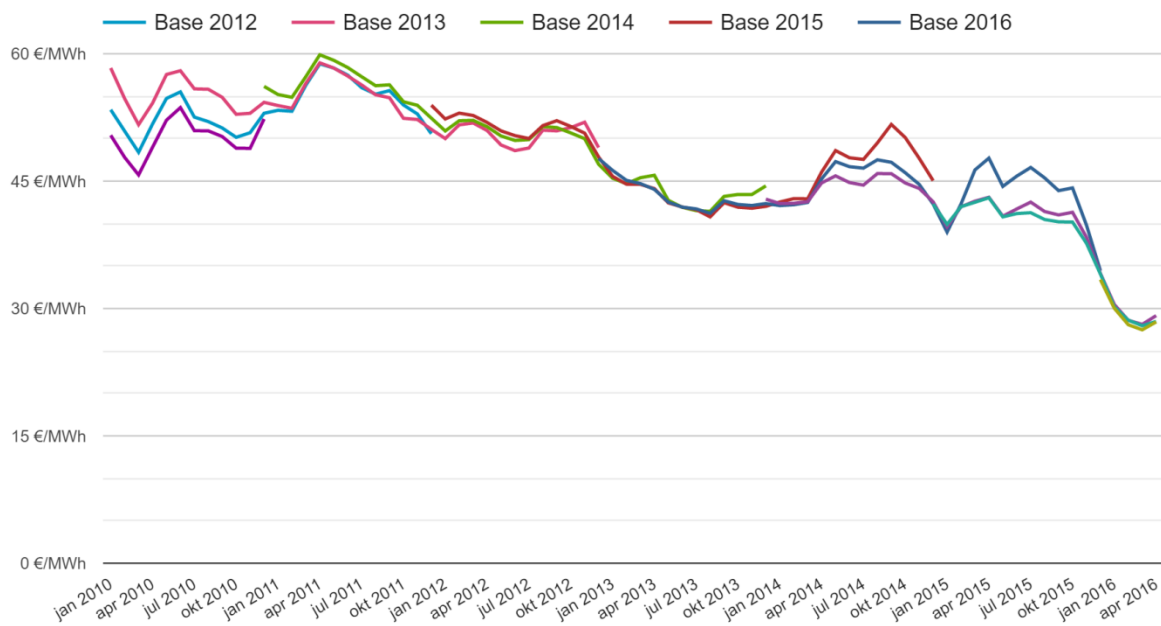
In sommige gevallen gaan vergistingsinstallaties wel net op zoek naar fruitresten omwille van het hoge watergehalte. Wanneer een vergistingsinstallatie bijvoorbeeld veel snijrogge (veel pectine) aan zijn energiemix toevoegt, wordt de mix sterk verdikt. In zo een situatie wordt het om een andere reden wel weer interessant om bijvoorbeeld appelresten te gebruiken. Omdat de energiemix verdund moet worden, is het interessanter om appelresten toe te voegen in de plaats van gewoon water. Appelresten bevatten nog een beetje biogaspotentieel, maar wat vooral belangrijk is, is dat vergisters betaald worden om appelresten te verwerken, terwijl ze voor water zelf zouden moeten betalen.

#### **4.4.2 Cijfers**

##### **a. Opbrengsten**

In 2015 stond de prijs die de vergistingsinstallaties kregen voor hun geproduceerde elektriciteit erg laag, met een gemiddelde prijs van €45/MW. In 2016 zet de dalende prijs zich voorlopig door (<€30/MW), waardoor het voor meer en meer vergisters moeilijker wordt om rendabel te blijven of te worden. Zo zou slechts 25% van de vergistingsinstallaties in België rendabel zijn, en dit ondanks zware subsidiëring. Vergistingsinstallaties hebben ten eerste recht op groene-stroomcertificaten. Dit levert hen €110/MW op. Daarnaast krijgen zij per Megawatt geproduceerde elektriciteit twee warmtekrachtcertificaten, aangezien zij de warmte van de motoren gebruiken om de temperatuur in hun vergistingsinstallatie te onderhouden. Een warmtekrachtcertificaat brengt ongeveer €31/MW op. Zoals eerder vermeld, worden de vergisters soms betaald om afvalstromen te verwerken, maar deze stromen zijn meestal maar een zeer kleine fractie van de energiemix; voor de stromen die veel biogaspotentieel opleveren, moet betaald worden. Veel installaties hebben het met deze subsidies al moeilijk, waardoor het duidelijk is dat een vergistingsinstallatie zonder subsidies niet kan werken in de huidige economische omgeving. Grafiek 21 geeft de evolutie van de prijs die vergistingsinstallaties krijgen voor hun geproduceerde elektriciteit weer, berekend aan de hand van verschillende basisjaren. De ICE Endex is de belangrijkste maatstaf voor de opbrengst van elektriciteit opgewekt uit gas.

Grafiek 21: ICE Endex (elektriciteit) voor België



Bron: Elexys (2016)

#### b. Kosten

Belangrijke kostenposten zijn de kosten van de energiemix die aan de installatie gevoed wordt en het afvoeren van het digestaat (samen €84/MW bij Biopower), afschrijvingen, transportkosten, materiaal, personeel, ... (M. Ruysen, persoonlijke communicatie, 23 februari, 2016) Maar een belangrijke kost die specifiek is aan een vergistingsinstallatie, is de hoge mate van slijtage. Een voorbeeld hiervan is het feit dat maïs, zeer veel gebruikt in vergistingsinstallaties, voor heel veel slijtage zorgt. Maïs vreet bijvoorbeeld de betonnen wanden aan en zorgt voor veel erosie. Daarnaast vallen vergistingsinstallaties onder dezelfde strenge regelgeving als gasbedrijven. Hierdoor worden zij erg frequent gecontroleerd en moeten zij de strenge regelgeving constant opvolgen, wat ook weer extra kosten met zich meebrengt.

#### 4.4.3 Analyse

De fout die veel ondernemingen in de vergistingssector maken, is dat ze vertrekken van de gedachte dat ze stroom willen maken, terwijl de juiste insteek eigenlijk is dat ze aan afvalverwerking willen doen. De ondernemingen die de foute redenering volgen, moeten steeds aan 100% capaciteit werken om rendabel te kunnen zijn. Hier heeft de onderneming die afvalverwerking als doel heeft een competitief voordeel, aangezien die capaciteitsdruk bij hen niet of minder van toepassing is. Daarnaast kan er competitief voordeel behaald worden door alles tot in de puntjes te optimaliseren. Een voorbeeld hiervan is hoe BioEnergy de kosten van hun waterzuiveringsinstallatie heeft kunnen verminderen. Toen de huidige eigenaars de installatie overnamen in 2014 (de installatie zelf stamt uit 2006), verbruikte de waterzuiveringsinstallatie voor €18 000 stadswater per maand. Er werd zelfs stadswater gebruikt voor het koelen van de waterzuivering. De overtuiging was dat het gebruik van stadswater nodig was om de stabiliteit van het proces niet te verstoren. De nieuwe eigenaars hebben hier onderzoek naar laten uitvoeren door

de KULeuven, waaruit bleek dat ander water gebruiken niet alleen veel goedkoper zou zijn, maar ook het proces stabiel zou maken.

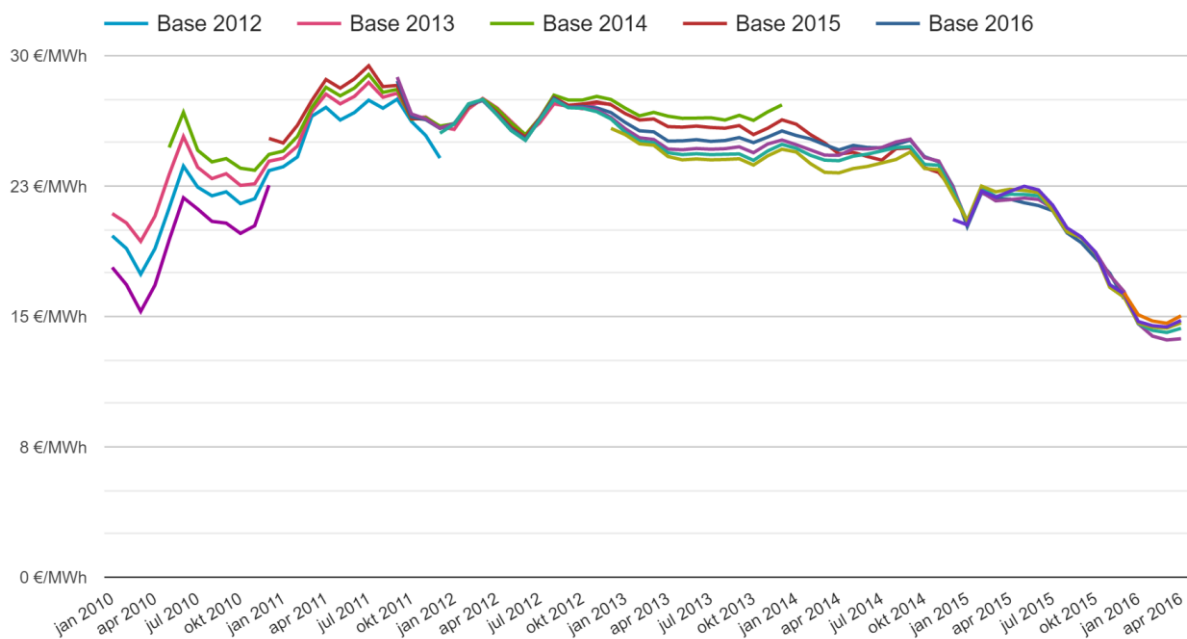
Financiële analyses tonen aan dat er niet enkel geen nieuwe vergistingsinstallaties meer zullen bijkomen in de nabije toekomst, maar de verwachting is dat er zelfs een aantal installaties in België zullen moeten sluiten. De huidige lage stroomprijzen maken het de vergisters bijzonder moeilijk. De verwachting is dan ook dat de huidige principes waarop de vergistingsindustrie gebaseerd is, niet zullen kunnen standhouden. De logische trend zou zijn dat er meer en meer geëvolueerd wordt naar pure afvalvergisting, waar vandaag nog vaak producten gebruikt worden die voor andere doeleinden gebruikt kunnen worden. Een voorbeeld hiervan is dat Belgische boeren hun maïs leveren aan vergistingsinstallaties omdat ze daar de beste prijs krijgen, waardoor er maïs van Brazilië geïmporteerd wordt om aan de overige Belgische maïsvraag te voldoen. Vergistingsinstallaties betalen voor die maïs, terwijl bij pure afvalvergisting elke grondstof een opbrengst zou moeten genereren. Dan zou er dus geld verkregen worden om het afval over te nemen, eventueel subsidies om het te verwerken en opbrengsten uit de verkoop van de geproduceerde elektriciteit. Dit is op lange termijn de enige mogelijke duurzame oplossing.

#### **4.5 Biogas opwaarderen tot aardgas**

Het is ook mogelijk om met reeds bestaande technieken het geproduceerde biogas om te zetten naar aardgas, en gezien de huidige lage elektriciteitsprijzen wordt deze mogelijkheid steeds interessanter. Dit nieuwe product is dan aardgas van hernieuwbare oorsprong, en wordt bio-aardgas of bio-methaan genoemd. Het opwaarderen is in theorie een relatief simpel proces: de fractie CO<sub>2</sub> die aanwezig is in het biogas moet worden verwijderd, om zo het biogas meer hoogcalorisch te maken (Biogas-e, 2016). Een gas is hoogcalorisch wanneer het vrijwel uitsluitend uit koolwaterstoffen bestaat. Het onttrekken van de CO<sub>2</sub> aan het biogas resulteert in een gas met een hoger methaangehalte, vandaar ook de benaming bio-methaan. Daarnaast moet het gas voor en na het proces van CO<sub>2</sub>-onttrekking gereinigd worden. Reiniging is noodzakelijk om de vervuiling van lucht en oppervlaktewater en van installaties van de gasproductie te voorkomen (RVO, 2016).

Na het bewerkingsproces kan het bio-aardgas gebruikt worden voor drie toepassingen. Een eerste mogelijkheid is het injecteren van het bio-aardgas op het aardgasnet. De prijzen die de producenten krijgen voor het injecteren van bio-aardgas op het aardgasnet kunnen gevonden worden in grafiek 22. Wat meteen opvalt, is dat, wanneer grafiek 22 vergeleken wordt met grafiek 21, de opbrengsten voor het omzetten van biogas naar aardgas lager liggen dan de opbrengsten die verkregen kunnen worden voor het produceren van elektriciteit uit biogas. Dit toont meteen aan dat de omzetting van biogas naar aardgas momenteel niet interessant is.

Grafiek 22: ICE Endex (aardgas) voor België



Bron: Elexys (2016)

Ten tweede kan bio-aardgas ook gecompriemd worden tot bio-CNG (Compressed Natural Gas). Dit gebeurt bij een druk van 200-250 bar. CNG is een transportbrandstof met een zeer lage uitstoot wat betreft broeikasgassen, fijn stof, roet en verzurende componenten zoals  $\text{NO}_x$  en  $\text{SO}_x$  (Biogas-e, 2016). De technologieën om motoren die werken met fossiele brandstoffen om te bouwen naar CNG-motoren zijn al beschikbaar en diverse organisaties gebruiken reeds CNG als een alternatief voor de traditionele fossiele brandstoffen. Maar het grote nadeel van CNG, namelijk het beperkt aantal kilometers dat kan afgelegd worden met een tank, zorgt ervoor dat de toepassing op grote schaal uitblijft.

Een derde mogelijkheid is het opwaarderen van biogas tot hoogwaardig bio-LNG (Liquefied Natural Gas). LNG is natuurlijk gas dat geconverteerd is naar een vloeibare vorm, en is vandaag al een gewilde brandstof voor vrachtwagens, locomotieven en binnenvaartschepen (van Kasteren, 2016). Er is nog veel werk voordat bio-LNG effectief op grote schaal zou toegepast kunnen worden, maar de eerste berekeningen laten wel uitschijnen dat er toekomst zit in het gebruik van deze techniek (Zie 4.7.3.c) (van Kasteren, 2016).

#### 4.6 Bio-ethanol

Ook bij de productie van bio-ethanol uit fruitresten vormt het lage droge stofgehalte weer het grootste struikelblok om de techniek op grote schaal toe te passen. Hoewel het technisch gezien relatief eenvoudig is om water en alcohol te scheiden, is het aandeel water in het geval van fruitresten zo groot dat er gigantische hoeveelheden fruitresten nodig zijn om maar een relatief beperkte hoeveelheid bio-ethanol te produceren. Daarnaast is het proces om de fruitresten naar alcohol om te zetten niet eenvoudig, door het gebrek aan consistentie in de samenstelling van de fruitresten, en zijn de proceskosten te hoog om een alternatief te bieden voor de huidige fossiele brandstoffen.

Bovendien zijn er al manieren in ontwikkeling om bio-ethanol te produceren die vele malen efficiënter en goedkoper zijn, zoals bijvoorbeeld de productie van bio-ethanol uit algen. Hierdoor heeft het produceren van bio-ethanol, gezien de nadelen, geen prioriteit om te onderzoeken of toe te passen in de praktijk.

#### **4.7 Voorwaarden voor economische rendabiliteit**

Een interessante analyse om te maken is: wanneer is het nu interessant om een bepaalde verwerkingstechniek op fruitresten toe te passen? Met andere woorden, onder welke voorwaarden wordt het economisch rendabel om toch een techniek toe te passen die vandaag niet gebruikt wordt in de praktijk.

##### **4.7.1 Pelletiseren**

De analyse die volgt, wordt gemaakt met appelpulp als soort fruitrest, maar deze redenering zou uiteraard uitgebreid kunnen worden naar andere soorten fruitresten. Zoals duidelijk werd in grafiek 20, bedragen in deze rendabiliteitsoefening de kosten voor het produceren van 1 ton pellets uit fruitresten €460. Het pelletiseren van fruitresten zou break-even zijn wanneer een verbrandingsinstallatie bereid zou zijn om €460 te betalen voor een ton pellets, waarvan de energetische waarde door gebrek aan onderzoek onbekend is. De conclusie is dat fruitresten simpelweg een veel te laag droge stofgehalte hebben, waardoor er teveel energie gebruikt moet worden om de fruitresten te drogen, waardoor de kosten onverantwoord hoog liggen. Hoewel technisch perfect mogelijk, is het pelletiseren van fruitresten gezien de hoge kosten, geen optie in de praktijk.

##### **4.7.2 Vergisting**

De analyse die volgt, wordt gemaakt met appelpulp als soort fruitrest, maar deze redenering zou uiteraard uitgebreid kunnen worden naar andere soorten fruitresten. Een samenvatting van deze analyse en de veronderstellingen kan gevonden worden in tabel 7.

###### a. Samenstelling

Uit onderzoek van Innolab blijkt dat appelpulp met een DS van 27% een biogaspotentieel van ongeveer 200 Nm<sup>3</sup> biogas/ton heeft. Het methaangehalte is dan 50%. Voor appelpulp met een dergelijk DS- en methaangehalte schommelt de marktprijs op het moment van schrijven rond €20/ton, maar dit bedrag fluctueert wel naargelang de samenstelling van appelpulp en de wetten van vraag en aanbod.

###### b. Verwerkingskosten

Op basis van de samenstelling kan berekend worden wat het aandeel van appelpulp is in de verschillende kostenposten van de vergistingsinstallatie. Zo verbruikt appelpulp een bepaalde hoeveelheid chemicaliën in de waterzuiveringsinstallatie, en moet er residu van dat water geloosd worden. Deze twee kosten komen neer op €10/ton. Daarnaast moet er na het vergistingsproces digestaat afgevoerd worden. Bij appelpulp komt dit in het geval van BioEnergy overeen met een kost van €2/ton gebruikt product. Per ton appelpulp die er in het vergistingsproces wordt gebracht, moet er dus, na het proces, rekening gehouden worden met een kost van €2 om het residu af te

zetten. Daarnaast is er een inschatting gemaakt van de onderhoudskosten en vervangingsinvesteringen die toegewezen kunnen worden aan het aandeel appelpulp in de totale energiemix. Dit komt naar schatting neer op een kostprijs van €4,3/ton.

De globale kostprijs is dan de som van de bovenstaande verwerkingskosten en de aankooprijks van de appelpulp. Dit komt neer op een totaal van €36,3/ton.

c. Opbrengsten

1 Nm<sup>3</sup> biogas levert gemiddeld 1,8 kWh elektrisch op. In het geval van appelpulp, dat 200 Nm<sup>3</sup> biogas/ton oplevert, komt de gemiddelde elektriciteitsproductie bijgevolg neer op 360 kWh elektrisch per ton. Voor deze elektriciteitsproductie worden vergistingsinstallaties twee keer beloofd. Ten eerste verkopen ze de opgewekte elektriciteit tegen de heersende marktprijs. Op het moment van schrijven staat deze uitzonderlijk laag, met €25/MWh elektrisch. De ton appelpulp brengt dus  $\left(0,36 \text{ MWh} \frac{\text{elektrisch}}{\text{ton}}\right) * (\text{€}25 \text{ MWh elektrisch}) = \frac{\text{€}9}{\text{ton}}$  appelpulp op.

Daarnaast hebben de vergistingsinstallaties recht op groene stroomcertificaten (GSC). Een vergistingsinstallatie heeft recht op 1 GSC per geproduceerde MWh elektrisch. Een eenvoudige berekening leert dan dat een ton appelpulp met een elektriciteitsproductie van 360 kWh overeenkomt met €36 aan groene stroomcertificaten. Deze €36 subsidie samen met de €9/ton die verkregen wordt door de elektriciteit te verkopen, vormen samen de totale elektriciteitsopbrengst voor een ton appelpulp: €45/ton.

Tijdens het vergistingsproces wordt niet enkel elektriciteit geproduceerd, maar komt er ook warmte vrij. Uit de cijfergegevens van BioEnergy blijkt dat appelpulp gemiddeld 1,4 kWh thermisch per Nm<sup>3</sup> biogas oplevert. Bij een biogaspotentieel van 200 Nm<sup>3</sup>/ton betekent dit voor appelpulp een gemiddelde warmteopbrengst van 280 kWh/ton. Per GJ thermisch heeft een vergistingsinstallatie recht op 0,3 warmtekrachtcertificaten (WKC). Een warmtekrachtcertificaat levert ongeveer €27 op. De volgende berekening toont aan hoeveel subsidies aan warmtekrachtcertificaten een ton appelpulp oplevert:

$$\left(280 \text{ kWh} \frac{\text{thermisch}}{\text{ton}}\right) * \left(\frac{360 \text{ kWh} \frac{\text{elektrisch}}{\text{ton}}}{1000}\right) * \left(\frac{\text{€}27}{\text{WKC}}\right) * \left(\frac{0,3 \text{ WKC}}{\text{GJ thermisch}}\right) = \frac{\text{€}8,2}{\text{ton}}$$

De totale opbrengst van het vergisten van appelpulp komt dan neer op €45/ton + €8,2/ton = €53,2/ton.

Wat hier meteen opvalt, is dat de opbrengst verkregen door het verkopen van de elektriciteit die geproduceerd werd uit het vergistingsproces, slechts €9 bedraagt. Alle andere opbrengsten zijn afkomstig van een of andere vorm van subsidie. Hier wordt ook meteen duidelijk waarom zoveel vergistingsinstallaties het moeilijk hebben om rendabel te blijven of te worden, en waarom de overgrote meerderheid gedoemd is te mislukken wanneer de subsidies zouden wegvallen of verminderen. Belangrijke opmerking hierbij is, dat in dit scenario de vaste kosten voor verzekering, personeel, administratie en afschrijvingen zelfs niet in rekening zijn gebracht.

#### d. Parameters veranderen

Op lange termijn is het redelijk om te verwachten dat de vergistingssector uiteindelijk zonder subsidies zou moeten kunnen overleven. Dit impliceert dat de groene stroom- en warmtekrachtcertificaten wegvallen, waardoor de enige bron van opbrengsten voor de vergistingsinstallaties het verkopen van de geproduceerde elektriciteit tegen de geldende marktprijs zal zijn. De verwachting is namelijk dat wanneer er aan pure afvalvergisting gedaan wordt, er geen geld meer verkregen zal worden enkel en alleen voor het overnemen van deze afvalstromen. Waar er nu €20/ton appelpulp verdiend wordt bij overname, zal dat naar verwachting op lange termijn evolueren naar €0. Specifiek voor het voorbeeld van appelpulp, dat ook uit te breiden is naar andere soorten fruitresten, betekent dit dat de elektriciteitsopbrengsten de reeds berekende kosten moeten kunnen dekken om minstens break-even te draaien. Zoals eerder beschreven is de globale kostprijs van de vergisting van een ton appelpulp €36,3 (exclusief vaste kosten).

$$\left(0,36 \text{ MWh} \frac{\text{elektrisch}}{\text{ton}}\right) * \text{elektriciteitsopbrengst} \geq \text{€}36,3$$

Om de globale kostprijs te kunnen dekken, moet de elektriciteitsopbrengst minstens €100,83/MWh bedragen. Uit de gegevens van Elexys blijkt het zeer onrealistisch te zijn, om te veronderstellen dat de elektriciteitsopbrengst in de nabije toekomst zo sterk zal stijgen. Sinds 2010 is de marktprijs voor elektriciteit steeds onder de €60 per MWh gebleven. Daarnaast wordt er een dalende trend vastgesteld in de elektriciteitsprijs die nog niet meteen lijkt te stoppen (zie grafiek 21). Elexys schat dat de elektriciteitsprijs in 2019 gemiddeld €28 zal bedragen (Elexys, 2016). Hoewel dit een heel eind zit van de benodigde €100,83, is de verwachting wel dat de huidige subsidieregeling langer aanhoudt dan 2019. Maar omdat de elektriciteitsprijs van veel factoren afhangt en onvoorspelbaar kan fluctueren, is het moeilijk te voorspellen wat er zal gebeuren wanneer de subsidieregeling afgebouwd of volledig gestopt wordt. Gezien de grootte van het verschil tussen de vereiste en de huidige/voorspelde elektriciteitsprijs, is het wel te verwachten dat de sector op lange termijn nooit zal kunnen blijven functioneren zoals dat nu het geval is. Naar alle waarschijnlijkheid zullen veel vergistingsinstallaties moeten sluiten, en zullen de installaties die er wel in slagen om het hoofd boven water te houden, grondige hervormingen moeten doorvoeren om de kosten te verminderen of alternatieve bronnen van opbrengsten te garanderen. Een voorbeeld hiervan zou kunnen zijn dat de vergistingsinstallaties volledig overschakelen op afvalvergisting, waardoor het overnemen van producten opbrengsten genereert, waar er nu vooral betaald wordt door de vergisters om energierijke stromen te kunnen bemachtigen.

Tabel 7: Rendabiliteit vergistingsinstallatie

Veronderstellingen			
(1) Fictieve scenario met enkel appelpulp als input voor de vergister. In de praktijk zijn costumers vereist om te zorgen voor een stabiele voeding met voldoende structuurmateriaal.			
(2) Vaste kosten voor verzekering, personeel, administratie en afschrijvingen zijn in onderstaand overzicht niet in rekening gebracht.			
(3) Prijzen en parameters zoals hieronder vermeld, evenwel gevoelig aan variaties op de markt.			
Input - waarden specifiek voor appelpulp			
Kostprijs	20	EUR/ton	inschatting op basis van ervaring
Biogas	200	Nm <sup>3</sup> biogas/ton	resultaat van een staalname + detail-analyse samenstelling / biogaspotentieel
Methaangehalte	50%		resultaat van een staalname + detail-analyse samenstelling / biogaspotentieel
ODS	27%		resultaat van een staalname + detail-analyse samenstelling / biogaspotentieel
Verwerking - variabele kosten - waarden specifiek voor appelpulp			
Waterzuivering	10	EUR/ton	chemicaliënverbruik, lozing residuwater - berekend op basis van samenstelling appelpulp - waarvan de fractie die terecht komt in de waterzuivering is berekend.
Digestaat	2	EUR/ton	afzet van het eindproduct - berekend op basis van samenstelling appelpulp - waarvan de fractie die terecht komt in het ruw digestaat is bepaald.
Installatie	4,3	EUR/ton	onderhoud, vervangingsinvestering - inschatting op basis van ervaring
Globale kostprijs	36,3	EUR/ton	
Opbrengsten			
Gemiddelde elektriciteitsopbrengst	1,8	kWh el/Nm <sup>3</sup> biogas	el = elektrisch
	360	kWh el/ton	
	45	EUR/ton	
Gemiddelde warmteopbrengst	1,4	kWh th/Nm <sup>3</sup> biogas	th = thermisch
	280	kWh th/ton	
	8,2	EUR/ton	
Globale opbrengst	53,2	EUR/ton	
Parameters			
Elektriciteitsprijs	25	EUR/MWh el	marktprijs: <a href="https://my.elexys.be/MarketInformation/IceEndexPowerBE.aspx">https://my.elexys.be/MarketInformation/IceEndexPowerBE.aspx</a>
Prijs groenestroomcertificaten	100	EUR/GSC	GSC = groenestroomcertificaat, veronderstel 1 GSC/MWh el
Prijs warmtelevering	0	EUR/GJ th	veronderstel dat de warmte nuttig aangewend wordt
Aantal WKC per GJ warmte	0,3	WKC/GJ th	WKC = warmtekrachtcertificaat
Prijs WKK-certificaten	27	EUR/WKC	afhankelijk van het steunniveau
Kost installatie (onderhoud etc.)	12	EUR/MWh el	inschatting op basis van ervaring

Bron: T. De Coster, persoonlijke communicatie, 10 maart, 2016

#### 4.7.3 Opwaarderen

Bij deze analyse wordt er verondersteld dat de kosten voor het opwekken van elektriciteit uit biogas en het omzetten van biogas naar bio-aardgas gelijkaardig zijn.

##### a. Injecteren op het aardgasnet

Injecteren van bio-aardgas op het aardgasnet wordt door de dalende elektriciteitsopbrengsten een steeds interessanter alternatief voor elektriciteitsproductie. Maar wanneer de huidige elektriciteitsopbrengsten (zie grafiek 21) vergeleken worden met de opbrengsten voor het injecteren op het aardgasnet (zie grafiek 22), wordt meteen duidelijk dat er nog een hele prijsevolutie zal moeten plaatsvinden, voordat injecteren op het aardgasnet interessanter wordt dan het produceren van elektriciteit. Op het moment van schrijven brengt elektriciteitsproductie ongeveer €30/MWh op, terwijl de opbrengst bij het verkopen van bio-aardgas slechts 15/MWh bedraagt.

##### b. Bio-CNG

Aangezien CNG geproduceerd wordt door het comprimeren van aardgas onder grote druk (200-250 bar), is de additionele kost van het omzetten van aardgas naar CNG op grote schaal verwaarloosbaar. Hier geldt dus dezelfde redenering als bij het injecteren op het aardgasnet,



namelijk dat elektriciteitsproductie momenteel veel meer opbrengt dan biogas opwaarderen tot bio-CNG, waardoor het voor producenten niet interessant is om op te waarderen (Zie grafiek 21 en 22).

c. Bio-LNG

Het produceren van LNG is een intensief proces waarbij aardgas in verschillende stappen afgekoeld wordt om zo LNG te bekomen. Gezien de extra productiekosten om bio-LNG te produceren uit bio-aardgas wordt deze techniek vooralsnog bijna uitsluitend gebruikt op grote schaal door grote vloten vrachtwagens en schepen. Op kleinere schaal, zoals personenwagens, is de techniek voorlopig niet rendabel doordat transport en opslag vrij omslachtig zijn. Daarnaast zijn er voor het gebruik van LNG specifieke installaties nodig, waardoor de initiële kost van investering om LNG te gebruiken in bijvoorbeeld personenwagens, relatief hoog ligt. Momenteel is de prijs van LNG zelfs aan het dalen door een overaanbod. De vraag naar LNG is nog steeds vrij beperkt, terwijl de productie blijft stijgen (Ministry of Economy, Trade and Industry, 2016).

Het produceren van bio-LNG zou door een gespecialiseerde onderneming moeten gedaan worden, de producent van biogas zou dus bio-aardgas verkopen aan LNG-producenten. LNG-producenten bieden voor bio-aardgas evenveel als voor gewoon aardgas, aangezien de producenten er geen voordeel uit halen om bio-aardgas te gebruiken t.o.v. gewoon aardgas. Hierdoor kan gesteld worden dat de opbrengst voor biogasproducenten vergelijkbaar is met de opbrengst die gegenereerd kan worden door bio-aardgas te injecteren op het aardgasnet. Dit levert dezelfde conclusie op, namelijk dat het verschil in opbrengsten tussen opwaarderen en elektriciteitsproductie te groot is om in opwaarderen van biogas een realistisch alternatief te zien.



## Hoofdstuk 5: Conclusies en aanbevelingen

In deze masterproef werd getracht een antwoord te vinden op de centrale onderzoeksvraag: 'Is het economisch haalbaar om fruitresten te verwerken tot brandstof?'. Om een antwoord te kunnen formuleren op deze centrale onderzoeksvraag werd deze opgesplitst in drie deelvragen, namelijk:

- (1) 'Wat is een brandstof en welke soorten bestaan er?'
- (2) 'Welke zijn de huidige en toekomstige evoluties op het vlak van brandstoffen?' en
- (3) 'Zijn fruitresten een mogelijke grondstof voor brandstofproductie?'

Om een antwoord te formuleren op deze deelvragen werd eerst een literatuurstudie uitgevoerd, die uitgebreid toegelicht is in de hoofdstukken 2 tot en met 4. Het overzicht van de verschillende soorten brandstoffen en hun kenmerken geeft een overzicht van de huidige situatie, maar interessanter is om te bekijken wat de toekomst zou kunnen brengen. Zoals gebleken is in hoofdstuk 2, zal de evolutie in het gebruik van verschillende soorten brandstoffen voor een groot deel afhangen van de nieuwe **regelgevingen** die al dan niet zullen doorgevoerd worden door de bevoegde instanties. De meest ideale evolutie zou deze zijn, waar er gerekend wordt op het doorvoeren van de vereiste beleidsmaatregelen om de concentratie van de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen te stabiliseren op 450 PPM. De meest realistische verwachting daarentegen is deze waarbij er uitgegaan wordt van het doorvoeren van de beleidsmaatregelen die nu op tafel liggen. In het realistischere scenario zal de totale wereldwijde energieconsumptie stijgen van 9 302 Mtoe in 2013 tot naar schatting 12 487 Mtoe in 2040. Het doorvoeren van de beleidsmaatregelen om dit scenario te verwezenlijken zou een stap in de goede richting zijn, maar volstaat niet om de opwarming van de aarde te beperken tot 2°C. Om echt een verschil te maken voor de komende generaties moet er meer bereidheid en opoffering getoond worden om de klimaatverandering door de opwarming van de aarde in te dammen. Als enkel de beleidsmaatregelen doorgevoerd worden die nu op tafel liggen, wordt het probleem enkel doorgeschoven naar volgende generaties en zullen de mogelijke consequenties toenemen. De aarde zal verder opwarmen en het zal moeilijker worden om de bijhorende gevolgen onder controle te houden.

De belangrijkste oorzaak van de opwarming van de aarde en alle negatieve gevolgen van dien is het gebruik van fossiele brandstoffen. Een grote stap in de goede richting zou zijn om fossiele brandstoffen waar mogelijk te vervangen, of op zijn minst het gebruik ervan in te perken. In hoofdstuk 3 werd een overzicht gegeven van de huidige en toekomstige evoluties op het vlak van brandstoffen. Algemeen kan geconcludeerd worden dat er, in theorie, veel mogelijkheden zijn wat alternatieve brandstoffen betreft, en dat alternatieve brandstoffen onderling sterk van elkaar verschillen in mogelijke toepassingen en gebruiksgemak.

Ondanks het feit dat alternatieve brandstoffen een heel aantal voordelen hebben ten opzichte van conventionele brandstoffen (vooral milieu gerelateerde voordelen), hebben ze nog een lange weg te gaan voordat ze beschouwd kunnen worden als economisch levensvatbare alternatieven voor de huidig gebruikte brandstoffen. Om de economische aspecten tussen verschillende soorten brandstof (conventioneel versus alternatief) te kunnen vergelijken, wordt er in de literatuur vooral

aandacht geschonken aan de transportsector, aangezien deze sector beschouwd wordt als een van de meest vervuilende sectoren, wat resulteert in de opwarming van de aarde.

Uit een grondig onderzoek van de literatuur blijkt dat bio-ethanol, methanol, waterstof, biomassa, biodiesel en CTL (Coal To Liquid) momenteel de meest realistische alternatieven voor fossiele brandstoffen zijn.

**Bio-ethanol** is een van de belangrijkste alternatieve brandstoffen voor de transportsector, omdat bio-ethanol makkelijk te mengen is met benzine, en omdat dit mengsel vele voordelen biedt (Mielenz, 2001). Het nadeel is dat de productiekost van bio-ethanol veel hoger is dan die van benzine (USDA, 2003). Er wordt wel verwacht dat verdere technologische ontwikkelingen dit verschil in kost zullen kunnen verminderen en misschien zelfs helemaal teniet doen.

**Methanol** wordt algemeen beschouwd als een van de meest realistische mogelijkheden om fossiele brandstoffen in motoren te vervangen. Zowel de vraag als het aanbod stijgen sterk, en de verwachting is dat beide in de toekomst alleen maar zullen toenemen. Het nadeel van methanol is dat het voornamelijk geproduceerd wordt uit natuurlijk gas, een fossiele brandstof. Methanol zou dus enkel een realistisch en duurzaam alternatief zijn wanneer de productie uitsluitend gebeurt met duurzamere grondstoffen.

**Waterstof** is een van de meest geschikte alternatieve brandstoffen op lange termijn vanwege de geringe uitstoot en mate van vervuiling. De verwachting is dat waterstof vooral in de transportsector enorm aan populariteit zal winnen, aangezien waterstof nagenoeg geen schadelijke stoffen uitstoot bij gebruik. Daarnaast is de grote beschikbaarheid van waterstof een enorme troef ten opzichte van andere alternatieve brandstoffen en zelfs ten opzichte van de uitputbare fossiele brandstoffen: waterstof bevindt zich in meer dan 75% van de materie in het universum. Huidige technologieën maken het al mogelijk om waterstof te ontginnen, maar verder onderzoek is nodig om dit proces nog efficiënter te laten verlopen, om zo gebruik op grote schaal mogelijk te maken.

**Biomassa** is een bron van hernieuwbare energie die in theorie in oneindige hoeveelheden beschikbaar is, zolang er vruchtbare bodem en water bestaan. De mogelijkheden lijken eindeloos, maar de problemen zijn enerzijds het feit dat biomassa vruchtbaar land gebruikt dat dan niet gebruikt kan worden voor voedselproductie, en anderzijds de verschillen in samenstelling van de soorten biomassa. De verschillen in samenstelling zorgen ervoor dat een optimale manier om alle soorten biomassa te gebruiken uitblijft, aangezien elke soort een andere techniek vereist om verwerkt te worden. Bij biomassa is het dus zaak om de meest optimale soort (of soorten) te vinden en daar vol op in te zetten wat productie- en gebruikstoepassingen betreft. Dat is vooralsnog niet gebeurd, aangezien onderzoek naar verschillende soorten blijft voortgaan.

**Biodiesel** is geleidelijk aan terrein aan het winnen in termen van gebruik ten opzichte van conventionele diesel en petroleum. Toch moet biodiesel zijn volledig commercieel potentieel nog benutten, zeker in de ontwikkelingslanden. Groente oliën zijn de belangrijkste bronnen voor de productie van biodiesel, en zijn dus ook de belangrijkste kostendrijver binnen de productiekosten

(Araujo, Hamacher, & Scavarda, 2010). De biodieselproductie is wereldwijd gestegen van 8.4 miljoen ton in 2007 tot 20 miljoen ton in 2010. Verwacht wordt dat de productie verder zal stijgen tot 150 miljoen tegen 2020 (Ong, et al., 2012). Het grootste struikelblok voor biodiesel om de conventionele brandstoffen te kunnen vervangen, is het feit dat de productie van biodiesel vruchtbaar land nodig heeft, dat anders gebruikt zou kunnen worden voor de productie van voedselgewassen. Hieromtrent wordt onderzoek gedaan naar het gebruik van bijvoorbeeld algen in plaats van groente oliën, maar verdere technologische ontwikkeling is dus noodzakelijk om biodiesel op grote schaal economisch levensvatbaar te maken (Torres, et al., 2013).

Het grootste probleem met **CTL** (Coal To Liquid) -technologieën is de grote hoeveelheid CO<sub>2</sub> die uitgestoten wordt, wat nog bijdraagt aan de bestaande uitstootgassen-problematiek, veroorzaakt door conventionele brandstoffen. Hierdoor zijn bijkomende technologieën zoals de in hoofdstuk 3 besproken CSS (Carbon Capture en Storage) -technologie noodzakelijk. Voorlopig blijkt uit onderzoek dat CTL-centrales naast de negatieve impact op het milieu, ook financiële risico's met zich meebrengen. Vooral de hoge initiële investerings- en kapitaalkosten vormen een probleem. Op korte termijn zijn CTL-technologieën dus niet economisch levensvatbaar (Mantripragada & Rubin, 2011) (Bassano, Deiana, & Girardi, 2014).

Hoewel de alternatieve brandstoffen momenteel niet vergelijkbaar lijken met de conventionele brandstoffen wat de economische levensvatbaarheid betreft, wordt verwacht dat door het vele onderzoek op dit gebied, het verschil in economische levensvatbaarheid snel kleiner en uiteindelijk verwaarloosbaar zal worden. Vooral de mogelijke lagere negatieve effecten voor het milieu zorgen voor een sterke drijfveer om ook de economische kosten te doen dalen (Sangeeta, et al., 2014).

De belangrijkste conclusie die uit het empirisch onderzoek getrokken kan worden is de volgende: **het is zeker technisch mogelijk om fruitresten te gebruiken als brandstof, maar omwille van verschillende factoren is het economisch niet haalbaar.** Uit de interviews met experts en de literatuurstudie is gebleken dat er in België momenteel en in de nabije toekomst drie mogelijkheden zijn om fruitresten als brandstof te gebruiken.

Ten eerste kunnen fruitresten technisch gezien gebruikt worden in de productie van **pellets**. Aangezien dit proces niet al te moeilijk is, staat de technische haalbaarheid hiervan niet ter discussie. De fruitresten moeten gedroogd en gepelletiseerd worden, zoals beschreven in hoofdstuk 4.3. Door het lage droge stofgehalte van fruitresten is het drogingsproces echter vrij kostelijk. Daarnaast bevatten fruitresten ook niet genoeg energetische waarde (bijvoorbeeld vetten) om alle proceskosten van het pelletiseren te dekken; de opbrengst verkregen uit de opgewekte energie door de verbranding van de pellets, is momenteel verre van voldoende om de vereiste proceskosten te dekken. Hierdoor worden de limieten van deze techniek meteen duidelijk. Zonder eventuele subsidiëring zal deze techniek ook in de nabije toekomst economisch onhaalbaar blijven, en de vraag is natuurlijk of het subsidiëren van deze techniek verantwoord is. Om deze vraag te beantwoorden is er verder onderzoek nodig naar de energetische efficiëntie van het pelletiseren en verbranden van fruitresten. Het zou bijvoorbeeld niet onrealistisch zijn om te denken dat het hele

proces meer energie kost dan dat het oplevert, waardoor het uiteindelijke doel van het creëren van een hernieuwbare bron van energie uit het oog verloren wordt.

Ten tweede blijkt uit het gevoerde empirisch onderzoek, dat de enige manier die momenteel in België toegepast wordt om energie op te wekken uit fruitresten, **vergisting** is. Het gaat dan weliswaar niet enkel over het vergisten van fruitresten, maar wel over het vergisten van een energiemix die bestaat uit verschillende componenten, waar fruitresten er slechts een van is. Door de lage energetische waarde in vergelijking met andere producten (zoals bijvoorbeeld maïs) en het lage droge stofgehalte, wordt er door vergisters niet actief op zoek gegaan naar fruitresten om te gebruiken in hun proces van gasproductie. Uit de interviews met experts is gebleken dat er twee gevallen zijn waarin het interessant wordt om fruitresten te gebruiken in het vergistingsproces. Ten eerste wanneer de vergister een bedrag verkrijgt voor het verwerken van de fruitresten, dat de kosten die het vergisten van fruitresten met zich meebrengt, compenseert. De vergister gebruikt namelijk een deel van zijn capaciteit om fruitresten te vergisten, terwijl hij die capaciteit ook zou kunnen gebruiken om stromen te vergisten die meer biogas genereren, en dus voor meer opbrengsten zorgen. Naast dit inkomstenverlies moet de prijs ook de hogere kosten voor het verwerken compenseren: fruitresten bevatten veel water, wat resulteert in een grotere hoeveelheid digestaat. Aangezien er betaald moet worden om digestaat af te zetten, moet de prijs voor het verwerken van fruitresten ook hiervoor compenseren.

Het tweede geval waarin het interessant wordt om fruitresten te gebruiken in het vergistingsproces, is wanneer de energiemix te droog is en er water aan toegevoegd moet worden om een optimale samenstelling te bekomen. De meest voor de hand liggende optie is om water toe te voegen aan de energiemix, maar aangezien er betaald moet worden voor stadswater, kan het in dit geval interessant zijn om fruitresten aan de energiemix toe te voegen. Die beslissing is dan niet gebaseerd op de potentiële biogasproductie van de fruitresten, maar wel op het lage droge stofgehalte.

In beide bovenstaande gevallen is de beslissing om fruitresten te vergisten niet gebaseerd op de argumenten die de noodzaak van alternatieve brandstoffen aantonen. De fruitresten worden dan niet vergist omwille van hun energetische waarde en dus de groene energie die zij genereren, maar wel omwille van de economische beloning. Hierbij kan dus de vraag gesteld worden of dit dan wel echt een vorm van hernieuwbare energiecreatie is, of dat het hier slechts gaat om economisch opportunisme.

Daarnaast is dankzij het empirisch onderzoek een rendabiliteitsanalyse voor het vergisten van fruitresten opgesteld. Uit de interviews is gebleken dat voor de vergistingsinstallaties de enige duurzame oplossing op lange termijn, **pure afvalvergisting** is. De belangrijkste reden hiervoor is het feit dat het gebruik van land om energie- in plaats van voedselgewassen te kweken, op lange termijn niet houdbaar is. Vanaf het moment dat er ook maar het minste tekort aan landbouwgrond zich voordoet, zal er een omschakeling plaatsvinden naar voedselproductie. Daarnaast zijn vergistingsinstallaties nu enkel rendabel dankzij de zware subsidiëring door de overheid. Ook deze subsidiëring zal niet eindeloos blijven doorlopen. Wanneer die stopgezet of afgebouwd wordt, zal er

naar alternatieve bronnen van inkomsten moeten gekeken worden. Die kunnen gevonden worden door afvalstromen te vergisten. De verwachting is echter dat, door de agressieve concurrentie als gevolg van het wegvallen van de subsidiëring, de opbrengsten die verkregen worden om afvalstromen te vergisten, zullen verminderen tot €0. Hierdoor zullen heel wat vergistingsinstallaties moeten sluiten, maar deze die overblijven zullen wel rendabel kunnen zijn op lange termijn, zonder de nodige hulpmiddelen van de overheid. Hoeveel vergistingsinstallaties zullen overblijven en in welke mate die rendabel zullen zijn, hangt voor een groot deel af van de evolutie in de prijs die zij krijgen voor hun geproduceerde elektriciteit. Volgens de berekeningen uit hoofdstuk 4.7 zou de elektriciteitsopbrengst voor vergistingsinstallaties €100,83/MWh moeten bedragen om het vergisten van enkel fruitresten rendabel te maken. Gezien de huidige opbrengsten en de verwachte evoluties, lijkt dit bedrag zelfs op langere termijn onhaalbaar, maar wanneer er andere energiekere afvalstromen dan fruitresten aan de energiemix zouden toegevoegd worden die meer biogas opleveren, zouden de kosten per geproduceerde MWh elektrisch lager liggen en zou rendabiliteit bijgevolg bereikt kunnen worden bij een lagere elektriciteitsopbrengst. Voor welk bedrag die rendabiliteit juist bereikt zou worden hangt af van verschillende parameters, zoals het biogaspotentieel van de energiemix en de evolutie in de kosten van de installatie, waardoor het onmogelijk is om daar nu voorspellingen over te doen. De conclusie hier is dat het mogelijk is om zonder subsidiëring aan pure afvalvergisting te doen, maar wel onder bepaalde voorwaarden en gegeven bepaalde evoluties, zoals een stijging in de elektriciteitsopbrengst.

Het biogas dat geproduceerd wordt door het vergisten van fruitresten (en eventueel andere stromen), kan ook opgewaardeerd worden tot aardgas in plaats van het te gebruiken voor elektriciteitsproductie. Deze techniek wordt in België niet toegepast om de simpele reden dat geen enkele van de drie opwaarderingsmogelijkheden (injecteren op het aardgasnet, bio-CNG en bio-LNG) hetzelfde oplevert als elektriciteitsopwekking. Dit is voor een groot deel toe te schrijven aan de subsidiëring die verkregen wordt door elektriciteit op te wekken uit het geproduceerde biogas. Wanneer die subsidies zouden wegvallen, zou opwaarderen in aanmerking komen als alternatief voor elektriciteitsproductie, maar tot dan is opwaardering van biogas simpelweg niet de beste optie.

De derde meest realistische optie om fruitresten als brandstof te gebruiken, is het produceren van **bio-ethanol**. Maar ook hier weer vormt het lage droge stofgehalte van fruitresten het grootste struikelblok. Het aandeel water is zo groot dat er gigantische hoeveelheden fruitresten nodig zijn om maar een relatief beperkte hoeveelheid bio-ethanol te produceren. Een ander nadeel is de variërende samenstelling van fruitresten, wat als gevolg heeft dat het zeer moeilijk wordt om een eenduidig productieproces op te richten. Door het feit dat er al andere, betere manieren zijn om bio-ethanol te ontwikkelen, zoals uit algen, is het produceren van bio-ethanol uit fruitresten geen prioriteit.

Het is dus duidelijk dat het grootste probleem met fruitresten het lage droge stofgehalte is. Om dit op te lossen kunnen de fruitresten gedroogd worden, maar door de hoeveelheid energie die hiervoor nodig is, is dit geen interessante techniek. Als er een manier zou zijn om gedroogde

fruitresten te bekomen zonder de grote drogingskosten die dat met zich meebrengt, zouden de beschreven technieken heel wat dichterbij praktische toepasbaarheid komen. Een mogelijkheid kan zijn om fruitresten te laten **drogen op een natuurlijke manier**. De nadelen zijn dan weer dat er tijd voor nodig is, en dat er onderzoek moet gedaan worden naar hoe biologische processen als schimmelvorming en natuurlijke vergisting dit drogingsproces zouden beïnvloeden. De voordelen zijn dan dat die gedroogde fruitresten veel meer energetische waarde zouden bevatten per ton, wat zowel voor pelletiseren, vergisten, als het produceren van bio-ethanol, een belangrijk gegeven is. Daarnaast impliceert minder water minder digestaat-afzet in het vergistingsproces. De vraag die dit met zich meebrengt is: zou het wel rendabel zijn om fruitresten als brandstof te gebruiken wanneer de hoge drogingskosten substantieel verminderen of zelfs helemaal verdwijnen? Om deze vraag te kunnen beantwoorden zal er verder onderzoek vereist zijn.

Deze masterproef heeft een overzicht gegeven van de verschillende mogelijke technieken om fruitresten te gebruiken als brandstof, en heeft daarbij de economische haalbaarheid concreet kunnen becijferen op basis van kostprijzen en opbrengsten. Deze analyse heeft duidelijk gemaakt waarom bepaalde technieken wel worden toegepast in België, terwijl andere, op het eerste gezicht evenwaardige mogelijkheden, niet voorkomen. Daarnaast geeft deze masterproef een beschrijving van wat de toekomstige verwachtingen zijn op het vlak van het gebruik van fruitresten als brandstof, en wat de nodige voorwaarden zijn om verschillende technieken economisch levensvatbaar te maken naar de toekomst toe. Deze masterproef kan een leidraad zijn voor de sector om de verschillende toepassingen met elkaar te vergelijken, en kan daarnaast een aanleiding zijn voor verder onderzoek naar andere toekomstmogelijkheden. Dit toekomstig onderzoek zou vooral moeten focussen op het laag houden van de kosten bij het drogen van de fruitresten, aangezien hier de meeste stappen vooruit kunnen gezet worden. Daarnaast zullen huidige en nieuwe technieken om fruitresten te gebruiken als brandstoffen in de toekomst (opnieuw) onderzocht moeten worden, aangezien technologische ontwikkelingen nieuwe mogelijkheden en inzichten met zich zullen meebrengen.



## Bibliografie

- Abdel-Rahman, A. A., & Osman, M. M. (1997). EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON VARYING THE COMPRESSION RATIO OF SI ENGINE WORKING UNDER DIFFERENT ETHANOL–GASOLINE FUEL BLENDS. *International Journal of Energy Research*, 31-40.
- Agbor, V. B., Cicek, N., Sparling, R., Berlin, A., & Levin, D. B. (2011). Biomass pretreatment: Fundamentals toward application. *Biotechnology Advances*, 675-685.
- Agrawal, A. K. (2007). Biofuels (alcohols and biodiesels) applications as fuels for internal combustion engines. *Science*, 233-271.
- Araujo, V. K., Hamacher, S., & Scavarda, L. F. (2010). Economic assessment of biodiesel production from waste frying oils. *Bioresource Technology*, 4415-4422.
- Armbruster, W. J., & Coyle, W. T. (2006). *Pacific food system outlook 2006-2007: the future role of biofuels*. Singapore: Pacific Economic Cooperation Council.
- Arvanitoyannis, I. S., Ladas, D., & Mavromatis, A. (2006). Potential uses and applications of treated wine waste: a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 475-487.
- Astbury, G. (2008). A review of the properties and hazards of some alternative fuels. *Process Safety and Environment Protection* 86, 397-414.
- Bassano, C., Deiana, P., & Girardi, G. (2014). Modeling and economic evaluation of the integration of carbon capture and storage technologies into coal to liquids plants. *Fuel*, 850-860.
- Biogas-e. (2016, april 12). Opgehaald van <http://www.biogas-e.be/vergisting/eindproducten>
- Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae - a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable Sustainable Energy Review*, 557-577.
- British Petroleum. (2007). *BP Statistical Review of World Energy 2007*. British Petroleum.
- British Petroleum. (2013). *BP Statistical Review of World Energy 2013*. British Petroleum.
- British Petroleum. (2014). *BP Statistical Review of World Energy 2014*. British Petroleum.
- Canakci, M., Ozsezen, A. N., & Turkcan, A. (2009). Combustion analysis of preheated crude sunflower oil in an IDI diesel engine. *Biomass and Bioenergy*, 760-767.
- Cardona, C. A., & Sanchez, O. J. (2007). Fuel ethanol production: Process design trends and integration opportunities. *Bioresource Technology*, 2415-2457.
- Crookes, R. J., Kiannajad, F., & Nazha, M. A. (1993). Performance and emissions of a 2.5 l multi-cylinder direction-injection automotive diesel engine with alternative diesel fuels and emulsions. *Fuels for automotive and industrial diesel engines* (pp. 151-159). London: IMechE seminar.

- Crookes, R. J., Kiannejad, F., Sivalingam, G., & Nazha, M. A. (1994). Effects of using vegetable oil fuels and their emulsions on the performance and emissions of single- and multi-cylinder diesel engines. *Arch Combust*, 57-74.
- Cucek, L., Varbanov, P. S., Klemes, J. J., & Kravanja, Z. (2012). Total footprints-based multi-criteria optimisation of regional biomass energy supply chains. *Energy*, 135-145.
- Das, L. M., Gulati, R., & Gupta, P. K. (2000). A comparative evaluation of the performance characteristics of a spark ignition engine using hydrogen and compressed natural gas as alternative fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 783-793.
- Demirbas, A. (2009). Biofuels securing the planet's future energy needs. *Energy Conversion and Management*, 2239-2249.
- Demirbas, M. F. (2011). Biofuels from algae for sustainable development. *Applied Energy*, 3473-3480.
- Egebäck, K.-E., & Westerholm, R. (1997). *Environmental Potential of the Alternative Fuels; Biogas, Ethanol, Methanol, Natural Gas, RME and DME*. Baveno, Italy: Swedish Transport and Communications Research Board.
- Elexys. (2016, april 12). Opgehaald van <https://my.elexys.be/MarketInformation/IceEndexPowerBE.aspx>
- Elexys. (2016, april 12). Opgehaald van <https://my.elexys.be/MarketInformation/IceEndexTtfGas.aspx>
- Escobar, J. C., Lora, E. S., Venturini, O. J., Yanez, E. E., Castillo, E. F., & Almazan, O. (2009). Biofuels: Environment, technology and food security. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1275-1287.
- Espadafor, F. J., Garcia, M. T., Villanueva, J. B., & Gutiérrez, J. M. (2009). The viability of pure vegetable oil as an alternative fuel for large ships. *Transportation Research*, 461-469.
- EU. (2009). *Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of The Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC*. Off. J European Union.
- Europese Commissie. (2010). *Preparatory Study on Food Waste across EU 27, Technical Report*. Europese Commissie.
- Galanakis, C. M. (2012). Recovery of high added-value components from food wastes: Conventional, emerging technologies and commercialized applications. *Trends in Food Science & Technology*, 68-87.
- Ghatak, H. R. (2011). Biorefineries from the perspective of sustainability: Feedstocks, products, and processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4042-4052.
- Glaser, B. G., & Strauss, A. L. (1967). *The Discovery of Grounded Theory: Strategies for Qualitative Research*. New Brunswick and London: Aldine Transaction.

- Gordon, D. (1991). *Steering a New Course: Transportation, Energy and the Environment*. Island Press, 75-76.
- Gullison, R. E., Frumhoff, P. C., Canadell, J. G., Field, C. B., Nepstad, D. C., & Hayhoe, K. (2007). Tropical forests and climate policy. *Science*, 985-986.
- Haas, H. (1977). *Electrostatic Hazards - Their Evaluation and Control*. Verlag Chemie.
- Hammond, G. P., Kallu, S., & McManus, M. C. (2008). Development of biofuels for the UK automotive market. *Applied Energy*, 506-515.
- Hansen, E. R. (1992). *Tire Power is Fire Power*.
- Harun, R., Singh, M., Forde, G. M., & Danquah, M. K. (2010). Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1037-1047.
- Holma, A., Koponen, K., Antikainen, R., Lardon, L., Leskinen, P., & Roux, P. (2013). Current limits of life cycle assessment framework in evaluating environmental sustainability – case of two evolving biofuel technologies. *Journal of Cleaner Production*, 215-228.
- Hsieh, W.-D., Chen, R.-H., Wu, T.-L., & Lin, T.-H. (2002). Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuels. *Atmospheric Environment*, 403-410.
- Hubbert, M. K. (1956). Nuclear energy and the fossil fuels. *Drilling and Production Practice*.
- International Energy Agency. (2012). *Key World Energy Statistics 2012*. International Energy Agency.
- International Energy Agency. (2013). *Key World Energy Statistics 2013*. International Energy Agency.
- International Energy Agency. (2015). *Key World Energy Statistics 2015*. International Energy Agency.
- IPCC. (2011). *Bioenergy IN IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Johnson, D. (2012). *Global Methanol Market Review*.
- Kamm, B., & Kamm, M. (2004). Principles of biorefineries. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 137-145.
- Kassarjian, H. H. (1977). Content-analysis in consumer research. *Journal of Consumer Research*, 8-18.
- Khan, M. I., Yasmin, T., & Shakoor, A. (2015). Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 785-797.
- Koçar, G., & Civas, N. (2013). An overview of biofuels from energy crops: Current status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 900-916.
- La Rovere, E. L. (2004). The Brazilian Ethanol Program Biofuels for Transport. *International Conference for Renewable Energies*, (pp. 1-4). Bonn.

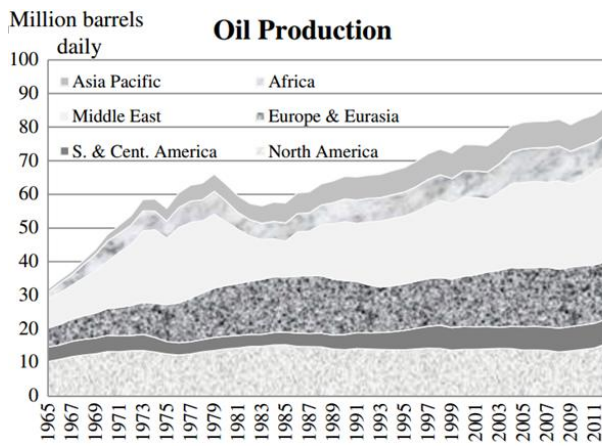
- Lam, M. K., Lee, K. T., & Mohamed, A. R. (2010). Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review. *Biotechnology Advances*, 500-518.
- Lange, J.-P. (2001). Methanol synthesis: a short review of technology improvements. *Catalysis Today*, 3-8.
- Laufenberg, G., Kunz, B., & Nystroem, M. (2003). Transformation of vegetable waste into value added products: (A) the upgrading concept; (B) practical implementations. *Bioresource Technology*, 167-198.
- Licht, F. O. (2008). *World ethanol & biofuels report*. Kent: Agra Informa Ltd.
- Liew, W. H., Hassim, M. H., & Ng, D. K. (2014). Review of evolution, technology and sustainability assessments of biofuel production. *Journal of Cleaner Production* 71, 11-29.
- Lif, A., & Holmberg, K. (2006). Water-in-diesel emulsions and related systems. *Advances in Colloid and Interface Science*, 231-239.
- Lü, J., Sheahan, C., & Fu, P. (2011). Metabolic engineering of algae for fourth generation biofuels production. *Energy & Environmental Science*, 2451-2466.
- Luo, Y., Ahmed, I., Kubatova, A., Stavova, J., Aulich, T., Sadrameli, S. M., & Seames, W. S. (2010). The thermal cracking of soybean/canola oils and their methyl esters. *Fuel Processing Technology*, 613-617.
- Mantripragada, H. C., & Rubin, E. S. (2011). Techno-economic evaluation of coal-to-liquids (CTL) plants with carbon capture and sequestration. *Energy Policy*, 2808-2816.
- Menon, V., & Rao, M. (2012). Trends in bioconversion of lignocellulose: Biofuels, platform chemicals & biorefinery concept. *Progress in Energy and Combustion Science*, 522-550.
- Michigan State. (2007). *Alcohol Fuels*.
- Mielenz, J. R. (2001). Ethanol production from biomass: technology and commercialization status. *Current Opinion in Microbiology*, 324-329.
- Miles, M. B., & Huberman, A. M. (1994). *Qualitative Data Analysis*. Sage: Thousand Oaks.
- Ministry of Economy, Trade and Industry. (2016). *Spot LNG Price Statistics*. Opgehaald van <http://www.meti.go.jp/english/statistics/sho/slng/>
- Mirabella, N., Castellani, V., & Sala, S. (2014). Current options for the valorization of food manufacturing waste: a review. *Journal of Cleaner Production*, 28-41.
- Misi, S. N., & Forster, C. F. (2002). Semi-Continuous Anaerobic Co-Digestion of Agro-Wastes. *Environmental Technology*, 445-451.
- Murray, D. (2005). *Ethanol's potential: looking beyond corn*. Washington DC: Earth Policy Institute.

- Naik, S. N., Goud, V. V., Rout, P. K., & Dalai, A. K. (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 578-597.
- NFPA . (1986). *National Fire Protection Association Guide on Hazardous Materials*. Quincy: NFPA.
- Nigam, P. S., & Singh, A. (2011). Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in Energy and Combustion Science*, 52-68.
- Nishiyama, Y. (1991). Catalytic gasification of coals — Features and possibilities. *Fuel Processing Technology*, 31-42.
- Nyambuu, U., & Semmler, W. (2014). Trends in the extraction of non-renewable resources: The case of fossil energy. *Economic Modelling* 37, 271-279.
- Ong, H. C., Mahlia, T. M., Masjuki, H. H., & Honnery, D. (2012). Life cycle cost and sensitivity analysis of palm biodiesel production. *Fuel*, 131-139.
- Palmer, F. H. (1986). Vehicle performance of gasoline containing oxygenates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers conference publications* (pp. 33-46). London: MEP.
- Pellegrini, L. A., Soave, G., Gamba, S., & Langè, S. (2011). Economic analysis of a combined energy–methanol production plant. *Applied Energy*, 4891-4897.
- Périneau, S. (2009). *Coal-To-liquids: a global Outlook*. Houston: CERA Week.
- Rashad, S. M., & Hammad, F. H. (2000). Nuclear power and the environment: comparative assessment of environmental and health impacts of electricity-generating systems. *Applied Energy* , 211-229.
- Rosentrater, K. A. (2004). Strategic methodology for advancing food manufacturing waste management paradigms. *Environmentally Conscious Manufacturing IV*, 274.
- RVO. (2016, april 12). *Van biogas naar groen gas*. Opgehaald van <http://www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/Van%20Biogas%20naar%20Groen%20Gas%20-%20Opwaarderingstechnieken%20en%20leveranciers.pdf>
- Sangeeta, Moka, S., Pande, M., Rani, M., Gakhar, R., Sharma, M., . . . Bhaskarwar, A. N. (2014). Alternative fuels: An overview of current trends and scope for future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 697-712.
- Sekaran, U., & Bougie, R. (2013). *Research Methods for Business*. Chichester, UK: Wiley.
- Speirs, J., McGlade, C., & Slade, R. (2015). Uncertainty in the availability of natural resources: Fossil fuels, critical metals and biomass. *Energy Policy*, 654-664.
- Stevens, D. J., Worgetten, M., & Saddler, J. (2004). *Biofuels for transportation: an examination of policy and technical issues*. Canada: IEA.
- Tan, K. T., Lee, K. T., Mohamed, A. R., & Bhatia, S. (2009). Palm oil: Addressing issues and towards sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 420-427.

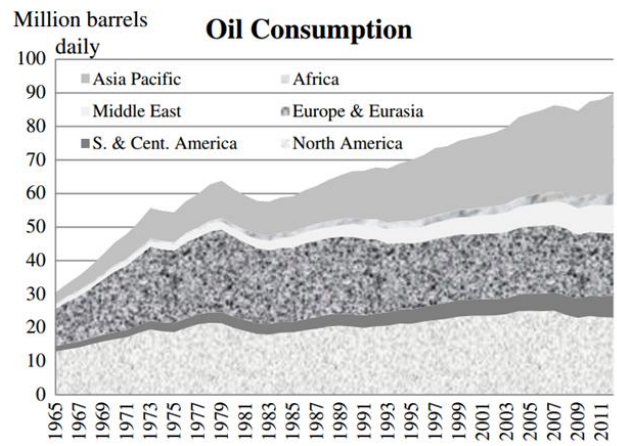
- Torres, C. M., Rios, S. D., Torras, C., Salvado, J., Mateo-Sanz, J. M., & Jiménez, L. (2013). Microalgae-based biodiesel: A multicriteria analysis of the production process using realistic scenarios. *Bioresource Technology*, 7-16.
- United Utilities. (2007). *Energy Generation*.
- USDA (United States Department of Agriculture). (2003). *Production estimates and crop assessment division of foreign agricultural service*. USDA.
- Van Dyk, J. S., Gama, R., Morrison, D., Swart, S., & Pletschke, B. I. (2013). Food processing waste: Problems, current management and prospects for utilisation of the lignocellulose component through enzyme synergistic degradation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 521-531.
- van Kasteren, J. (2016, april 12). *Biogas opwaarderen tot bio LNG*. Opgehaald van <http://bioenergy-nw.eu/wp-content/uploads/2015/06/Biogas-opwaarderen-tot-bio-LNG.pdf>
- Warwick, S. I., Beckie, H. J., & Hall, L. M. (2009). Gene Flow, Invasiveness, and Ecological Impact of Genetically Modified Crops. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 72-99.
- Zhen, X., & Wang, Y. (2015). An overview of methanol as an internal combustion engine fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 477-493.

# Bijlagen

## Bijlage 1

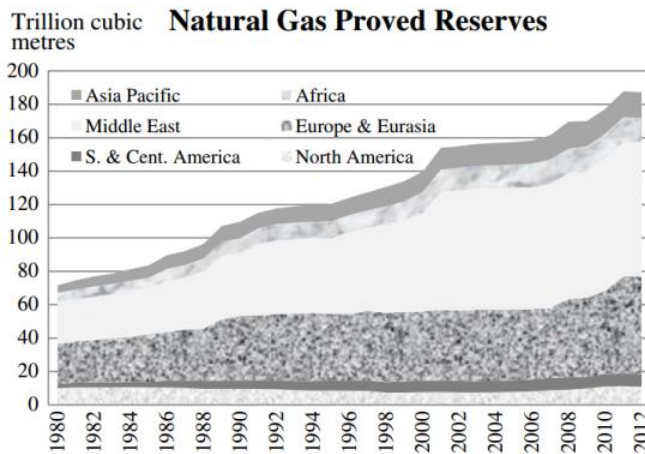


Source: BP (2013); Own calculations.

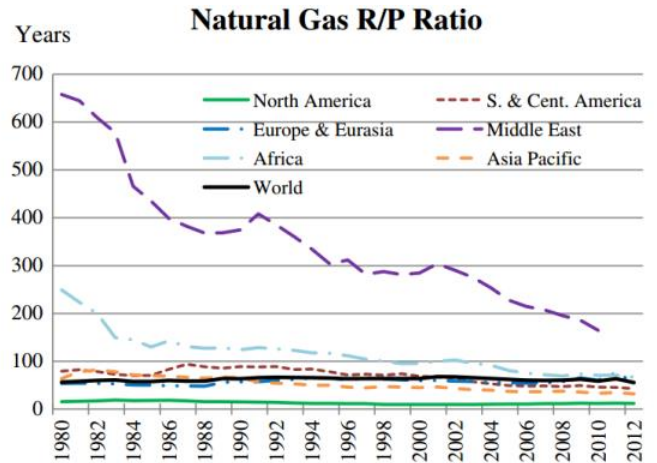


Source: BP (2013); Own calculations.

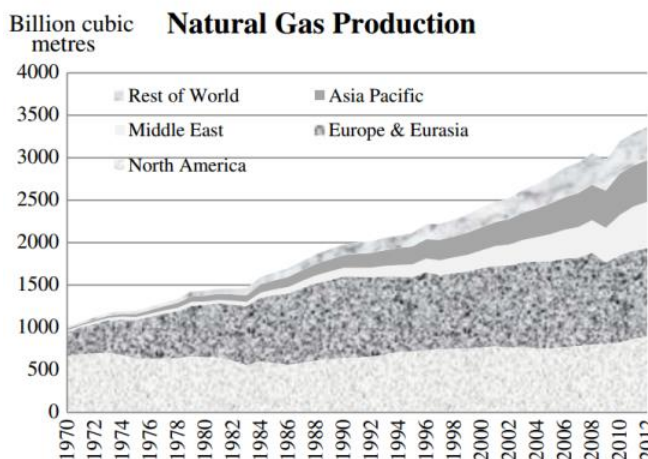
Fig. 1. Oil discovery, reserves, production and consumption.



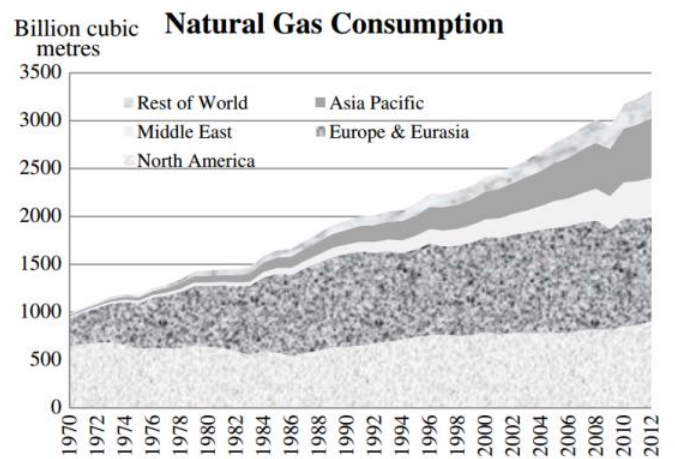
Source: BP (2013); Own calculations.



Source: BP (2013); Own calculations.

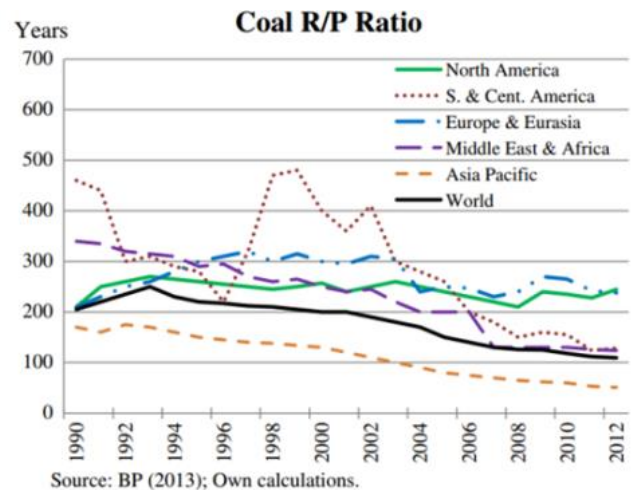
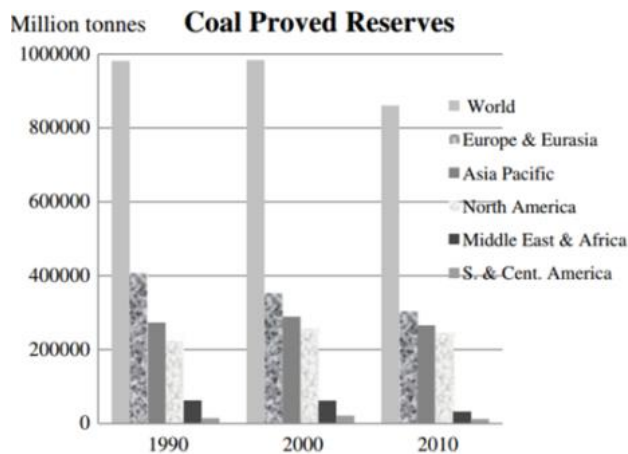


Source: BP (2013); Own calculations.



Source: BP (2013); Own calculations.

Fig. 3. Natural gas reserves, production and consumption.



## Bijlage 2

	21/09- 28/10	14/10- 01/12	15/11- 01/04	01/02- 29/02	01/04- 20/05	20/05- 01/07
<b>Opzoeken literatuur en schrijven aan onderzoeksplan</b>						
<b>Opzoeken literatuur en schrijven aan literatuurstudie</b>						
<b>Empirisch gedeelte uitwerken</b>						
<b>Masterproefseminarie voorbereiden</b>						
<b>Laatste aanpassingen doorvoeren</b>						
<b>Vorbereiden verdediging</b>						

## Bijlage 3

Lijst van geïnterviewde experts

<b>Naam</b>	<b>Organisatie</b>	<b>Functie</b>	<b>Datum</b>
Wim Vandeput	Konings nv	Plant Manager	22 februari 2016
Maarten Ruysen	Biopower Tongeren nv	Plant Manager	23 februari 2016
Gerwin de Bruijne	Van Vulpen BV	Manager bedrijfsvoering en ontwikkeling	1 maart 2016
Thomas Anné	SEDE Benelux	Commercieel en Reglementair Verantwoordelijke	4 maart 2016
Tom De Coster	BioEnergy nv	Zaakvoerder	10 maart 2016
Ben Leroy	Group Op de Beeck	Manager Biogas Solutions	10 maart 2016



## Bijlage 4

**Table 2 – Selected ignition and combustion properties of alternative fuels**

Material	Gross calorific value (MJ/kg)	Gross calorific value (MJ/m <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>	Octane number	Flash point (°C)	Flammable limits (% v/v)	Autoignition temperature (°C)	Resistivity (Ωm)	M.I.E. (mJ)
Ethanol	29.73 <sup>b</sup>	23,667 <sup>b</sup>	100 <sup>c</sup>	13 <sup>d</sup>	3.3–19 <sup>d</sup>	363 <sup>d</sup>	7.4 × 10 <sup>6</sup> <sup>e</sup>	f
Methanol	22.72 <sup>b</sup>	18,085 <sup>b</sup>	99 <sup>c</sup>	11 <sup>d</sup>	6–36 <sup>d</sup>	385 <sup>d</sup>	3 × 10 <sup>3</sup> <sup>e</sup>	0.14 <sup>g</sup>
LNG	19.98 <sup>b</sup>	12.79 <sup>b</sup>	>100 <sup>b</sup>	f	5–15 <sup>d</sup>	537 <sup>d</sup>	Gas <sup>h</sup>	0.28 <sup>g</sup>
CNG	19.98 <sup>b</sup>	12.79 <sup>b</sup>	120 <sup>c</sup>	Gas	5–15 <sup>d</sup>	537 <sup>d</sup>	i	0.28 <sup>g</sup>
LPG (propane)	50.49 <sup>b</sup>	24.66 <sup>b</sup>	>104 <sup>c</sup>	Gas	2.1–9.5 <sup>d</sup>	450 <sup>d</sup>	Gas <sup>h</sup>	0.25 <sup>g</sup>
Hydrogen	158.9 <sup>b</sup>	12.71 <sup>b</sup>	f	Gas	4–75 <sup>d</sup>	500 <sup>l</sup>	i	0.017 <sup>k</sup>
LH <sub>2</sub>	158.9 <sup>b</sup>	12.71 <sup>b</sup>	f	Gas	4–75 <sup>d</sup>	500 <sup>l</sup>	10 <sup>17</sup> <sup>j</sup>	0.017 <sup>k</sup>
Waste solvents <sup>l</sup>	m	m	f	n	m	m	h	o
Chem-fuel <sup>l</sup>	m	m	f	n	m	m	h	o
Rubber crumb <sup>l</sup>	m	m	i	i	i	m	i	f
Waste oils <sup>l</sup>	m	m	f	n	m	m	h	o
Biomass <sup>l</sup>	m	m	i	i	i	m	i	f
Wood gas <sup>l</sup>	m	m	f	i	f	m	i	o
Coke gas <sup>l</sup>	4.92 <sup>b</sup>	3.94 <sup>b</sup>	f	i	35–74 <sup>b</sup>	609 <sup>m,p,f</sup>	i	o
Blue water gas <sup>l</sup>	11.0 <sup>b</sup>	8.80 <sup>b</sup>	f	i	7.5–62.5 <sup>q,b</sup>	500 <sup>m,r,j</sup>	i	s
Sewage sludge <sup>l</sup>	m	m	i	i	i	>350 <sup>t,u</sup>	i	>250 <sup>t</sup>
Petrol (gasoline) <sup>l</sup>	47.32 <sup>b</sup>	34,949 <sup>b</sup>	95 min <sup>v</sup>	–38 <sup>d</sup>	1.4–7.4 <sup>d</sup>	450 <sup>m,d</sup>	2 × 10 <sup>12</sup> <sup>e</sup>	o
Diesel (gas oil) <sup>l</sup>	47.97 <sup>b</sup>	39,996 <sup>b</sup>	i	66 <sup>d</sup>	0.5–5.0 <sup>d</sup>	338 <sup>m,d</sup>	3 × 10 <sup>10</sup> <sup>w</sup>	o

<sup>a</sup> At 273 K and standard atmospheric pressure.

<sup>b</sup> Spiers (1943).

<sup>c</sup> Gordon (1991).

<sup>d</sup> NFPA (1986).

<sup>e</sup> Astbury (2000).

<sup>f</sup> No data available.

<sup>g</sup> Haas (1977).

<sup>h</sup> Liquid form likely to be high resistivity.

<sup>i</sup> Not applicable.

<sup>j</sup> NASA (1997).

<sup>k</sup> ISO (2000).

<sup>l</sup> Variable composition.

<sup>m</sup> Depends on composition.

<sup>n</sup> Depends on concentration of volatiles present.

<sup>o</sup> Typically ~0.2 mJ.

<sup>p</sup> Ignition temperature for pure carbon monoxide.

<sup>q</sup> Quoted as lower limit 6–9%, upper limit 55–70%.

<sup>r</sup> Ignition temperature for pure hydrogen.

<sup>s</sup> Likely to approach that of hydrogen.

<sup>t</sup> Dust cloud ignition temperature.

<sup>u</sup> Manchester (2001).

<sup>v</sup> BSI (1988).

<sup>w</sup> Bustin et al. (1957).

# Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

**Nagaan economische haalbaarheid verwerking fruitresten tot brandstof**

Richting: **master in de toegepaste economische wetenschappen-innovatie en ondernemerschap**

Jaar: **2016**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

**Van Looy, Marnix**

Datum: **27/05/2016**