

2011
2012

BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

*master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur: technologie-, innovatie- en
milieumanagement*

Masterproef

*Een verkennend onderzoek naar de economische waarde van
pyrolyseolie uit korteomloophout*

Promotor :
Prof. dr. Theo THEWYS

Copromotor :
De heer Tom KUPPENS

Maarten Christis

*Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van master in de toegepaste
economische wetenschappen: handelsingenieur, afstudeerrichting technologie-, innovatie-
en milieumanagement*

2011
2012

BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN

*master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur: technologie-, innovatie- en
milieumanagement*

Masterproef

*Een verkennend onderzoek naar de economische waarde van
pyrolyseolie uit korteomloophout*

Promotor :
Prof. dr. Theo THEWYS

Copromotor :
De heer Tom KUPPENS

Maarten Christis

*Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van master in de toegepaste
economische wetenschappen: handelsingenieur, afstudeerrichting technologie-, innovatie-
en milieumanagement*

WOORD VOORAF

Deze masterproef vormt het sluitstuk van mijn opleiding tot handelsingenieur met als afstudeerrichting technologie-, innovatie- en milieumanagement en optie operationeel management en logistiek aan de Universiteit Hasselt. Gezien mijn interesse in economie en technische onderwerpen, heb ik ervoor gekozen om een verkennend onderzoek te doen naar de waarde van pyrolyseolie. Deze masterproef is niet alleen tot stand gekomen door mijn eigen inspanningen. Ook anderen hebben hun bijdrage geleverd. Daarom mijn wens om hen dan ook oprecht te bedanken.

In de eerste plaats wil ik mijn promotor, Prof. dr. Theo Thewys bedanken voor het opnemen van mijn promotorschap.

Ook wil ik mijn co-promotor Tom Kuppens uitdrukkelijk bedanken voor zijn begeleiding tijdens de uitwerking van deze masterproef. Hij heeft me steeds op een vlotte en vriendelijke wijze met raad en daad bijgestaan. Zijn grote bereidheid tot medewerking, zijn gedetailleerde feedback en zijn deskundige uitleg hebben absoluut voor een meerwaarde van deze masterproef gezorgd.

Vervolgens bedank ik mijn ouders, omdat zij me de kans gaven om deze universitaire studies te volgen. Mijn vrienden en medestudenten hebben de afgelopen vijf jaar onvergetelijk gemaakt, dus ook aan hen een bijzonder woord van dank. Tot slot wil ik graag mijn vriendin bedanken, omdat ik steeds op haar onvoorwaardelijke steun en vertrouwen heb kunnen rekenen.

Maarten Christis

Mei, 2012

SAMENVATTING

Deze masterproef biedt de lezer een verkennend onderzoek naar de economische waarde van pyrolyseolie. De kostprijs van pyrolyseolie wordt op basis van verschillende bronnen vastgelegd op 259,32 EUR per ton pyrolyseolie. De waarde van pyrolyseolie op basis van zijn substituten (aardgas, kolen, pellets en stookolie) bedraagt slechts 172,10 EUR per ton. Deze masterproef voert een onderzoek uit naar toepassingen voor pyrolyseolie die mogelijk een hogere economische waarde kunnen opleveren.

Met als doel de valorisatie van pyrolyseolie werden meer dan 150 artikels geanalyseerd om een synthese te kunnen maken van de reeds verschenen economische data over de toepassingen van pyrolyseolie. Dit werk geeft een beeld van de waarde van pyrolyseolie in zijn verschillende toepassingsdomeinen ervan. Deze domeinen hebben breed uiteenlopende toepassingen met elk hun eigen technische en vaak chemisch specifieke moeilijkheden. Verschillende voorbeelden worden uitgewerkt, aangepast aan de mogelijkheden in de Noorderkempen (België).

Hoewel er zeer weinig bestaande uitgewerkte toepassingen zijn voor pyrolyseolie, kan het toch voor verschillende doeleinden gebruikt worden. In deze masterproef zijn de toepassingen opgedeeld in drie categorieën: de toepassing als energiebron, de toepassing als grondstof voor chemicaliën en de toepassing als transportbrandstof. De drie toepassingen leveren op verschillende aspecten (haalbaarheid, marge, vereiste investering, termijn, mate van gedetailleerde literatuur en potentieel) sterk verschillende resultaten op.

De toepassing als energiebron (hoofdstuk II) beschrijft de mogelijkheden van pyrolyseolie als energiebron van warmte en/of elektriciteit. De toepassing van pyrolyseolie als energiebron is reeds veelvuldig in de literatuur besproken. Pyrolyseolie kan als input dienen van een proces waarbij het verbrand wordt voor de productie van warmte en/of elektriciteit. Het voorbeeld van een WKK-installatie is uitgewerkt in deze masterproef. Indien in de Noorderkempen gekozen wordt voor een WKK-installatie met een input van 13.650 ton pyrolyseolie per jaar (of 21.000 ton biomassa per jaar), kan een installatie gebouwd worden met een elektrische capaciteit van 4,17 MW en met een thermische capaciteit van 3,41 MW. Jaarlijks kan er 29 GWh elektriciteit geproduceerd worden samen met 24 GWh warmte. Deze installatie vergt een investering van 3,5 miljoen EUR. Indien rekening wordt gehouden met een aankoopprijs van pyrolyseolie van 259,32 EUR per ton, bedraagt de netto contante waarde gemiddeld 4 miljoen EUR. Echter dient er rekening gehouden te worden dat 9,71 % van de simulaties (Monte Carlo simulatie) een negatieve NCW oplevert. Indien een investering een NCW groter dan nul vereist met 95% zekerheid, ligt de waarde van pyrolyseolie volgens het 95%-BI tussen [244,20-259,72] EUR per ton.

De toepassing als grondstof voor chemicaliën (hoofdstuk III) geeft de toepassing van pyrolyseolie weer als grondstof voor de productie van chemicaliën. De toepassing is in drie delen besproken. Een eerste deel omvat een waardebepaling aan de hand van de componenten van pyrolyseolie. Via

de waarde van de verschillende componenten en de bijhorende concentratie, wordt op basis van een sensitiviteitsanalyse de waarde (zonder rekening te houden met de kosten) van pyrolyseolie bepaald. Het 95%-BI, dat de waarde van pyrolyseolie weergeeft, wordt berekend op [183,25-11.817,15] EUR per ton. Het tweede deel bevat de bijna-commerciële toepassingen: industriële chemische grondstoffen, selectieve fast pyrolyseolie en hernieuwbare waterstofproductie. Pyrolyseolie kan dienen als grondstof voor de productie van industriële chemische grondstoffen. De waarde van pyrolyseolie wordt bepaald aan de hand van de waarde van de grondstoffen die uit pyrolyseolie gehaald kunnen worden. De waarde van pyrolyseolie wordt geschat op [197,01-324,84] EUR per ton (95%-BI). De mogelijkheid bestaat om enkel WSBO als input te gebruiken. De waarde van pyrolyseolie (zonder de waarde van WIBO) is dan [184,27-498,47] EUR per ton (95%-BI). De kost van dit proces is niet bepaald, enkel de inputkost van waterstof. Deze kost is afhankelijk van het proces en de input en bedraagt per ton pyrolyseolie maximaal 418,22 EUR. Selectieve fast pyrolyse is een techniek die inspeelt op het proces van fast pyrolyse. Hierbij wordt de concentratie van bepaalde economisch waardevolle componenten verhoogd door het aanpassen van procesparameters. Als gevolg hiervan stijgt de waarde van pyrolyseolie tot 581,03 EUR per ton (voor het voorbeeld van licht aromatische waterkoolstoffen). Bij hernieuwbare waterstofproductie wordt pyrolyseolie gebruikt om waterstof te produceren. De waarde van pyrolyseolie schommelt hierbij tussen 123,67 en 1.466,90 EUR per ton, terwijl de kosten schommelen tussen 132,16 en 343,66 EUR per ton. Het derde deel omvat de bestaande commerciële toepassingen. Twee bestaande technieken zijn besproken: natuurlijke harsen en voedseladditieven. Uit pyrolyseolie kunnen natuurlijke harsen geproduceerd worden die verder verwerkt kunnen worden in de houtindustrie. Pyrolyseolie heeft dan een waarde tot 716,50 EUR per ton. De kostprijs van dit proces is niet bepaald. Over voedseladditieven is geweten dat de waarde ervan hoog is, waardoor de waarde van pyrolyseolie ook hoog kan zijn. De informatie ontbreekt echter om een exacte waardebepaling van pyrolyseolie uit te voeren en de kosten van het proces te bepalen.

De toepassing als transportbrandstoffen (hoofdstuk IV) geeft de mogelijkheid weer om pyrolyseolie om te vormen tot transportbrandstoffen. Pyrolyseolie kan op voorwaarde dat het een aantal processtappen ondergaat als transportbrandstof inzetbaar zijn. Indien in de Noorderkempen gekozen wordt voor een vergassingsinstallatie voor de productie van transportbrandstoffen met als input 13.650 ton pyrolyseolie per jaar (of 21.000 ton biomassa per jaar) heeft de installatie het potentieel om jaarlijks 4 miljoen liter benzine equivalenten te produceren. De initiële investering bedraagt 27 miljoen EUR. De waarde van pyrolyseolie bij een installatie in de Noorderkempen met een NCW=0 is negatief en dus onrealistisch. Indien de schaal wordt vergroot, verhoogt ook de waarde van pyrolyseolie. Echter is een schaalvergroting van 20 maal tot 70 maal de initiële waarden vereist vooraleer pyrolyseolie een waarde van 259,32 EUR per ton bereikt. Daarnaast is berekend dat bij de initiële waarden en met een waarde van pyrolyseolie van 259,32 EUR per ton er een verkoopprijs van benzine moet zijn van [1,94-3,90] EUR per ton (95%-BI).

Een aantal bevindingen worden gekoppeld aan de verschillende resultaten die een beeld scheppen over de waarde van pyrolyseolie. Een eerste bevinding is dat de duidelijkheid en de mate van detail van de resultaten gelinkt kan worden aan de hoeveelheid economische data die beschikbaar is in de literatuur over een toepassing. Een tweede bevinding is dat er in de Noorderkempen weinig potentieel is voor een vergassingsinstallatie voor de productie van transportbrandstoffen. Het potentieel voor een WKK-installatie bestaat, maar is niet groot. Het potentieel om in de Noorderkempen uit pyrolyseolie chemicaliën te halen is onduidelijk, omdat gedetailleerde data ontbreekt. De derde bevinding is dat de marge bovenop de kostprijs van pyrolyseolie klein is bij een WKK-installatie en groot kan zijn bij de toepassing als chemicaliën. Bij de toepassing als transportbrandstoffen is de marge op pyrolyseolie afhankelijk van de schaal. Berekend is dat de schaal toegepast op de Noorderkempen geen marge oplevert. De vierde bevinding betreft de vereiste investeringen. Bij de toepassing als chemicaliën is hierover geen informatie terug te vinden. Bij de toepassing als energiebron (WKK-installatie) is de vereiste investering een pak kleiner als bij de toepassing als transportbrandstoffen (3,5 miljoen EUR vs. 27 miljoen EUR). De vijfde bevinding is dat de haalbaarheid van een WKK-installatie in de Noorderkempen groot is, terwijl de haalbaarheid van een vergassingsinstallatie voor de productie van transportbrandstoffen zeer klein is (wegens een te kleine schaal). De haalbaarheid om in de Noorderkempen pyrolyseolie te gebruiken om er chemicaliën uit te halen is onduidelijk, omdat de technologische aspecten (nog) niet uitgewerkt zijn. De zesde bevinding ten slotte betreft de termijn waarop de toepassingen haalbaar zijn. Deze haalbaarheidstermijn neemt toe van de toepassingen als energiebron naar de toepassing als transportbrandstof en chemicaliën. Het verschil in verband met haalbaarheid tussen de toepassingen als transportbrandstof en chemicaliën is onduidelijk.

Als conclusie kan gesteld worden dat de waarde van pyrolyseolie [246,70-262,14] EUR per ton (95%-BI) bedraagt op basis van een WKK-installatie. Deze waarde kan echter oplopen tot enkele duizenden euro's per ton, indien technologische vooruitgang wordt geboekt bij de scheidingsmethoden (inclusief zuiverheid) van economisch waardevolle chemische componenten uit pyrolyseolie. De productie van transportbrandstoffen uit pyrolyseolie in de Noorderkempen is op basis van de huidige data onmogelijk concurrentieel met conventionele transportbrandstoffen.

Op alle bedragen in deze masterproef is een inflatiecorrectie uitgevoerd. De bedragen zijn uitgedrukt in euro aangepast voor 2011. De berekeningswijze is samengevat in bijlage 1.

INHOUDSOPGAVE

Woord vooraf	blz.
Samenvatting	
Hoofdstuk I: Probleemstelling	1
1.1 Vervuiling van bodems met zware metalen	1
1.2 Inkomen van de landbouwer tijdens fytoremediatie	2
1.3 Hernieuwbare energie	4
1.4 Onderzoeksvragen	6
1.5 Onderzoeksopzet/onderzoeksmethoden	7
1.5.1 Toepassing als energiebron	9
1.5.2 Toepassing als grondstof voor chemicaliën	14
1.5.3 Toepassing als transportbrandstof	15
1.6 Bioplex	17
Hoofdstuk II: Toepassing als energiebron	21
2.1 Technologie	23
2.2 Investering	24
2.2.1 Initiële investering	28
2.2.2 Subsidies	30
2.2.3 Netto initiële investering	30
2.3 Inkomsten	30
2.4 Uitgaven	34
2.4.1 Vaste kosten	34
2.4.2 Variabele kosten	37
2.5 Netto contante waarde (NCW)	37
2.6 Sensitiviteitsanalyse	41
2.7 Waarde pyrolyseolie	46
2.8 Deelconclusie	51
Hoofdstuk III: Toepassing als grondstof voor chemicaliën	53

3.1	Waardebepaling per component	55
3.1.1	Beperkingen en onzekerheden	56
3.1.2	Beschrijving van de methode	57
3.1.3	Berekening waarde pyrolyseolie	57
3.1.4	Berekening kosten	67
3.1.5	Conclusie	68
3.2	Bijna commerciële toepassingen	68
3.2.1	Industriële chemische grondstoffen	69
3.2.2	Selectieve fast pyrolyse	76
3.2.3	Hernieuwbare waterstofproductie	78
3.3	Bestaande commerciële toepassingen	81
3.3.1	Natuurlijke harsen	81
3.3.2	Model gebaseerd op voedseladditieven	85
3.4	Deelconclusie	86
	Hoofdstuk IV: Toepassing als transportbrandstof	89
4.1	Hydroprocessing	91
4.2	Katalytisch kraken	96
4.2.1	Geïntegreerde katalytische pyrolyse	97
4.2.2	Ontkoppeld katalytisch upgraden van pyrolyseolie	100
4.3	Vergassing	101
4.4	Deelconclusie	103
4.4.1	Berekening kapitaalkosten	104
4.4.2	Berekening jaarlijkse operationele kosten	106
4.4.3	Berekening jaarlijkse opbrengsten	106
4.4.4	Uitvoeren NCW berekening	107
4.4.5	Sensitiviteitsanalyse	108
4.4.6	Schaalvergroting	112
4.4.7	Waarde pyrolyseolie	117
	Hoofdstuk V: Eindconclusie	123

Lijst van de geraadpleegde werken	129
Figurenlijst	141
Tabellenlijst	145
Bijlagen	147
Bijlage 1: Gehanteerde wisselkoersen en inflatiecorrecties	147
Bijlage 2: Primaire opdeling	148
Bijlage 3: Technologiën energiebronnen	149
Bijlage 4: Kostprijs productie pyrolyseolie	152
Bijlage 5: NCW investering WKK-installatie (bij 50% warmteverkoop)	154
Bijlage 6: Gehanteerde verdelingen sensitiviteitsanalyses	157
Bijlage 7: Simulatievoorbeelden WKK-installatie	159
Bijlage 8: Chemische componenten van pyrolyseolie	164
Bijlage 9: Waardebepaling chemische componenten pyrolyseolie	167
Bijlage 10: Waarde van chemische componenten uit pyrolyseolie	170
Bijlage 11: H/C _{eff} ratio	172
Bijlage 12: Hernieuwbare waterstofproductie	176
Bijlage 13: Technologiën waterstofproductie	178
Bijlage 14: Technische achtergrond transportbrandstoffen	183
Bijlage 15: Schaalvergroting transportbrandstoffen	187

HOOFDSTUK I: PROBLEEMSTELLING

Vanaf het einde van de 19^e eeuw tot midden 1970 werd in de Noorderkempen zink en lood geproduceerd door het verhitten van ertsen. Hiervoor werden ertsen en steenkool verhit tot 1.400 °C. Metaaldampen werden gecondenseerd, verzameld en overgebracht in gietvormen. Het afval werd gebruikt bij het verharden van wegen en industrieterreinen (490 km wegen in Antwerpen en Limburg; 833 km in Nederland). Deze wegen bevatten zink en/of loodhoudende afvalstoffen. Metalen die niet werden tegengehouden in de condensor, condenseerden op stofdeeltjes en werden via de schouw uitgestoten. Als gevolg van deze uitstoot is een groot gebied in de Noorderkempen verontreinigd met lood, zink, arseen en cadmium. Lozing van afvalwater van die bedrijfsactiviteit heeft ook waterbodems vervuild. (Medisch Milieukundigen, 2006)

Landbouwgronden (700km²) die zich in de Noorderkempen situeren, zijn uiteraard ook vervuild met zware metalen. De gewaskeuze van landbouwers wordt hierdoor sterk beperkt, waardoor de waarde van de landbouwgrond daalt (Meers, et al., 2010). Deze masterproef kadert in het onderzoek naar een economisch verantwoorde manier om deze landbouwgronden te zuiveren. Fytoremediatie is een techniek om zware metalen via planten uit de bodems te halen. Vervolgens kan dit plantenmateriaal omgezet worden naar olie, gas en char door middel van pyrolyse. De marktwaarde/verkoopwaarde van deze olie wordt in deze masterproef onderzocht.

Alvorens dit onderzoek te voeren, wordt eerst het algemeen kader verduidelijkt aan de hand van drie aan elkaar gerelateerde thema's:

- Vervuiling van bodems met zware metalen;
- Inkomen van een landbouwer tijdens fytoremediatie; en
- Hernieuwbare energie.

1.1 VERVUILING VAN BODEMS MET ZWARE METALEN

Zware metalen zijn chemische elementen met een hoog atoomgewicht en/of een hoge dichtheid. De belangrijkste zware metalen zijn: lood (Pb), arseen (As), cadmium (Cd), chroom (Cr), kwik (Hg), antimoon (Sb), nikkel (Ni) en koper (Cu) (Verbinnen, Van Caneghem, Vandecasteele, Block, & Van Hooste, 2010). Hiervan vormen in de Noorderkempen enkel cadmium, zink, lood, arseen en koper een probleem.

Aan de hand van een oriënterend bodemonderzoek kan worden bepaald of een bodem verontreinigd is. Met zware metalen vervuilde bodems verliezen hun multifunctionaliteit, maar moeten niet noodzakelijk gesaneerd worden. Factoren die bepalen of sanering verplicht is, zijn: de ernst van de vervuiling, de periode van vervuiling (historische of nieuwe vervuiling) en de kenmerken en functies van de bodem (Verbinnen, Van Caneghem, Vandecasteele, Block, & Van

Hooste, 2010). In de Kempen is er sprake van historische vervuiling, vooral afkomstig van de uitstoot van vroegere zinkfabrieken. De vervuiling ontstond na uitstoot naar lucht, lozing in beken en rivieren en het gebruik van restproducten voor verharding van wegen en erven. De meeste verontreiniging vond plaats vanaf 1892 en duurde tot 1973. (Oomen, Janssen, van Eijkeren, Bakker, & Baars, 2006)

Zware metalen kunnen schadelijk zijn voor de menselijke gezondheid en kunnen negatieve effecten hebben op het ecosysteem. Zo bioaccumuleert cadmium in de lever en nieren. Het verzwakt op lange termijn de werking ervan en kan voor beenderweekheid zorgen. Lood kan door langdurige blootstelling bloedarmoede veroorzaken, de werking van de nieren verstoren en de vruchtbaarheid aantasten. Een remmende werking op intelligentie bij kinderen kan ook een gevolg zijn van langdurige blootstelling aan lood. Al deze zware metalen worden eveneens aan een grotere kans op de ontwikkeling van kanker gekoppeld. (Medisch Milieukundigen, 2011) (Nawrot, et al., 2006) (Staessen, et al., 2009)

Het actieplan cadmium van de Vlaamse Overheid beschrijft de situatie en geeft oplossingsmogelijkheden rond de cadmiumproblematiek in de Kempen weer. Voor vervuilde landbouwgronden wordt o.a. fytoremediatie voorgesteld (Vlaamse Overheid, 2006). Fytoremediatie is een alternatieve saneringstechniek die gebruikt maakt van de natuurlijke capaciteit van planten om metalen en andere toxische contaminanten op te nemen uit vervuilde gronden en water. Planten kunnen zorgen voor het verwijderen, afbreken of immobiliseren van schadelijke stoffen uit bodems en water. De plant zorgt voor een verbetering van de groeiomstandigheden voor micro-organismen. Het zijn deze micro-organismen (plantgeassocieerde bacteriën en mycorrhiza) die eigenlijk aan fytoremediatie doen. Verschillende vormen van fytoremediatie ontstaan door de verschillende rol die planten bij het proces invullen. Het is hoofdzakelijk fytoextractie waarbij de vervuiling door de plant wordt opgenomen die de basis vormt in deze masterproef, omdat hierbij de vervuiling effectief uit de bodem wordt verwijderd. (Centrum voor Milieukunde) (Meiresonne, 2006) (Vangronsveld, Herzig, Weyens, Boulet, Adriaensen, & Ruttens, 2009)

1.2 INKOMEN VAN DE LANDBOUWER TIJDENS FYTOREMEDIATIE

De vervuiling in het gebied van de Kempen houdt voor de landbouwsector beperkingen in. Landbouwers zijn niet vrij in hun gewaskeuze, omdat vele gewassoorten na oogst niet voldoen aan de voedselnormen. Traditionele bodemsanering van deze bodems verontreinigd met zware metalen is een zeer dure operatie. Ontgraving en isolatie kunnen op korte termijn uitgevoerd worden, maar zijn economisch gezien niet haalbaar. Eventuele oplossingen (in situ) voor landbouwgronden zijn pH-correctie en fytoremediatie. (Verbinnen, Van Caneghem, Vandecasteele, Block, & Van Hooste, 2010) Bij pH-correctie worden de relaties tussen bodem, gewas en vervuiling gebruikt. Een

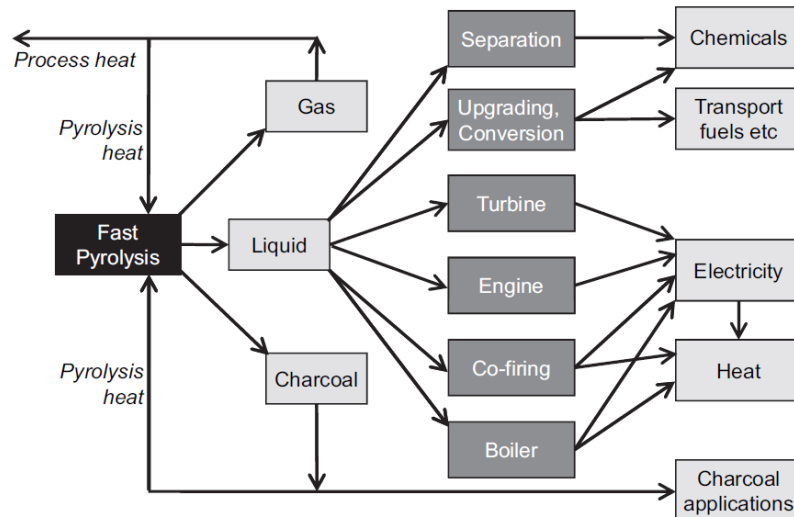
belangrijke relatie is dat de opname van cadmium door het gewas sterk beïnvloed wordt door de pH van de bodem: hoe hoger de pH, hoe lager de opname van cadmium door de plant. Door de pH op het juiste peil te houden (door kalk over landbouwgronden uit te strooien), kan in de Kempen aan gewasteelt worden gedaan. Er blijven echter problemen bij gevoelige gewassen zoals bijvoorbeeld spinazie (Informatie Projectbureau Actief Bodembeheer de Kempen (ABdK), 2008). Zoals hierboven reeds vermeld, zal in deze masterproef fytoremediatie gebruikt worden als saneringstechniek. (Kuppens & Thewys, 2010)

Hoewel fytoremediatie een goedkope techniek is om bodems te saneren, is de tijdsduur ervan lang (meer dan 50 jaar). De landbouwer zal zijn gronden enkel willen saneren als het vervangend inkomen voldoende hoog is. (Wins, 2008) Doordat sanering pas op zeer lange termijn een herwaardering van de landbouwgrond oplevert (terugwinnen van multifunctionaliteit), is de druk op het vervangingsinkomen tijdens de periode van fytoremediatie hoog. De huidige en volgende generaties landbouwers zullen zelf weinig profijt halen uit de sanering, wegens de lange duur van fytoremediatie.

Hieruit komt de noodzaak voort voor de valorisatie van biomassa afkomstig uit fytoremediatie. Indien een landbouwer kiest voor kortetoomloophout, lijkt pyrolyse de aangewezen conversietechniek. Pyrolyse maakt gebruik van biomassa afkomstig van fytoremediatie. Deze biomassa wordt tijdens pyrolyse omgezet in olie, char en gas. In deze masterproef worden de mogelijkheden van olie onderzocht en gevaloriseerd om zo een hoger vervangingsinkomen voor de landbouwer te realiseren. De 3 groepen toepassingen voor pyrolyseolie zijn:

- Elektriciteit- en/of warmteproductie;
- Scheidingsmethoden voor chemicaliën; en
- Olie opwaarderen tot transportbrandstof.

Figuur 1 geeft deze groepen schematisch weer.



Figuur 1: Toepassingen pyrolyseproducten (Bridgwater A. , 2011)

Hoe meer de olie kan opbrengen (rekening houdend met de kosten), hoe groter de verkoopwaarde van biomassa kan zijn, hoe groter het vervangingsinkomen van de landbouwer tijdens fytoremediatie kan zijn. (Balat, Balat, Kirtay, & Balat, 2009)

1.3 HERNIEUWBARE ENERGIE

Energiebeveerzingszekerheid is essentieel voor onze economie en welvaart. Aangezien Europa en vooral ook België sterk afhankelijk zijn van de import van energie, is beveerzingszekerheid een belangrijke kwestie. Zo was België in 2009 voor 76,4% afhankelijk van import van energie. Dit percentage (energy dependence rate) is het gedeelte van de bruto consumptie (som van de primaire productie en de netto energie-import) van energie, dat netto geïmporteerd wordt. Netto import is berekend door de totale import van energie te verminderen met de export van energie. Voor de 27 lidstaten van de Europese Unie ligt dit percentage gemiddeld op 54,7%. (Keenan, 2010)

De problematiek rond energie is niet enkel gesitueerd rond energievoorziening, stabiliteit en continuïteit, maar ook rond duurzaamheid van het huidige en toekomstige energieverbruik. Enerzijds is er bezorgdheid over de duurzaamheid van de huidige energiemarkt. De energiemarkt is een belangrijke factor voor de economie en het welzijn van burgers. De energiemarkt bestaat voor België hoofdzakelijk uit fossiele brandstoffen (olie en gas) en kernenergie (tabel 1). Deze energiemarkt bepaalt de samenleving, de manier waarop we (kunnen) leven. Anderzijds is er bezorgdheid over de toekomst. Opkomende technologieën rond hernieuwbare energie zullen nu en in de nabije toekomst aan belang winnen. De reden hiervoor zijn dat fossiele voorraden eindig en

sterk vervuילend zijn. Ook maakt de stijgende kostprijs van fossiele brandstoffen hernieuwbare substituten economisch interessanter. (Groep Gemix, 2009) (Groep Gemix, 2010)

Tabel 1: Marktaandeel van de energiebronnen in België (2009) (Federale Overheidsdienst Economie, K.M.O., Middenstand en Energie, 2011)

Energiebronnen	Marktaandeel
Vaste brandstoffen	5,6%
Aardolie	42,2%
Aardgas	26,1%
Kernenergie	21,2%
Hernieuwbare energie en uit afval gewonnen energie	4,7%

Dreigende problemen rond de continuïteit en stabiliteit van energievoorziening en klimaatveranderingen hebben ervoor gezorgd dat energie hoog op de politieke agenda komt te staan. De doelstellingen van het Europese energiebeleid zijn concurrentie, duurzaamheid en stabiliteit van het aanbod. Deze doelstellingen zijn vastgelegd in 'Europe 2020 initiative - Energy 2020' (European Union, 2010). Aangezien informatie en analyses essentieel zijn bij een degelijke besluitvorming op nationaal en internationaal vlak, richtte Europa 'The Market Observatory for Energy' op met als belangrijkste doelstelling het leveren van duidelijke informatie en correcte analyses in verband met energiezaken om zo het beleid te ondersteunen. (European Union)

Sinds het Brundtland-rapport uit 1987 is het energiethema onlosmakelijk verbonden met duurzame ontwikkeling. De definitie van duurzame ontwikkeling is volgens het rapport: "het tegemoetkomen aan de noden van de huidige generatie zonder de behoeftevoorziening van de komende generaties in het gedrang te brengen". Het principe van duurzame ontwikkeling staat sinds 2007 in de Belgische Grondwet ingeschreven (FOD Economie, K.M.O., Middenstand en Energie). In artikel 7bis (algemene beleidsdoelstellingen) van de Belgische Grondwet staat: "Bij de uitoefening van hun respectieve bevoegdheden streven de federale Staat, de gemeenschappen en de gewesten de doelstellingen na van een duurzame ontwikkeling in haar sociale, economische en milieugebonden aspecten, rekening houdend met de solidariteit tussen de generaties". (De Senate, 2009)

Energie en klimaat zijn sterk gekoppeld aan elkaar. Fossiele energiebronnen zorgen voor een massale extra uitstoot aan broeikasgassen, omdat ze deel uitmaken van de lange koolstofcyclus (geologische tijdschaal). Deze uitstoot zal, volgens wetenschappelijke studies, klimaatveranderingen in de hand werken door het broeikaseffect (European Commission, 2010). Ook op politiek vlak is klimaatverandering een thema dat hoog op de agenda staat (European Commission, 2010) (Portaal belgium.be, 2011). Een voorbeeld hiervan is dat de Vlaamse overheid het Vlaams Klimaatbeleidsplan heeft opgesteld met hierin binnenlandse maatregelen waardoor men zelf tot 80% van de afstand tot de Kyotodoelstellingen kan overbruggen. (Vlaamse overheid Departement Leefmilieu, Natuur & Energie, 2006)

Als conclusie kan gesteld worden dat de problematiek rond energie hoog op de nationale en internationale agenda staat. Vooral het afbouwen van de groei van energieafhankelijkheid van het buitenland en duurzaamheid zijn belangrijke thema's. Een oplossing naar minder afhankelijkheid is een verandering naar een nieuwe, duurzame energiemix bestaande uit hernieuwbare energiebronnen (zon, wind, biomassa, geothermaal, hydro-elektrisch en getijden). Deze vernieuwing is ook nodig om nefaste klimaatveranderingen in te perken (Bond Beter Leefmilieu). Biomassa is een van de onderwerpen hierbij en kadert in het onderwerp van deze masterproef.

Een belangrijke opmerking hierbij is dat er bij fyto-remediatie gebruik gemaakt wordt van marginale gronden. Er worden met andere woorden geen voedselteelten opgeofferd voor de productie van hernieuwbare energie. Bijgevolg is de problematiek rond de concurrentie tussen voedingsgewassen en energieteelten hier niet aan de orde.

1.4 ONDERZOEKSVRAGEN

Het doel van deze masterproef is het uitvoeren van een verkennende studie naar de valorisatie van pyrolyseolie uit korteomloophout. De centrale onderzoeksvraag van deze masterproef is:

“Welke toepassingen voor pyrolyseolie optimaliseren de economische valorisatie van biomassa uit korteomloophout?”

De centrale onderzoeksvraag wordt beantwoord aan de hand van volgende deelvragen:

- Welke toepassingen als transportbrandstof bestaan er voor pyrolyseolie uit korteomloophout?
- Welke toepassingen hebben chemicaliën uit pyrolyseolie uit korteomloophout?
- Welke bewerkingen moet pyrolyseolie uit korteomloophout ondergaan om als transportbrandstof te dienen?
- Welke bewerkingen (scheidingstechnieken) moet pyrolyseolie uit korteomloophout ondergaan om zuivere chemicaliën eruit te halen?
- Wat is de kostprijs van de bewerkingen om transportbrandstoffen of chemicaliën te bekomen?
- Welke is de verkoopwaarde van transportbrandstoffen of chemicaliën?
- Welke zijn de kosten en opbrengsten bij het gebruik van pyrolyseolie als energiebron?

1.5 ONDERZOEKSOPZET/ONDERZOEKSMETHODEN

In deze masterproef zijn verschillende technieken gehanteerd voor de valorisatie van pyrolyseolie. Kosten-batenanalyse worden in de mate van het mogelijke uitgevoerd. Bij deze analyse worden opbrengsten en kosten naast elkaar gezet. Belangrijk is dat de analyse grenzen kent, waardoor het duidelijk is welke baten/kosten opgenomen moeten worden. Een kosten-batenanalyse geeft een beeld als de baten de kosten kunnen overstijgen. Indien de mogelijkheid er zich toe verleent worden de kosten en baten opgesplitst per jaar en teruggebracht naar het jaar van beslissing (de investering; jaar 0). Door rekening te houden met de tijds waarde van het geld, kan achterhaald worden wat de huidige waarde is van bijvoorbeeld een investering. Dit is een netto contante waarde berekening (NCW). Aangezien bepaalde kasstromen een onzekerheid met zich meedragen, wordt een sensitiviteitsanalyse toegevoegd. Sensitiviteitsanalyses onderzoeken de mogelijke waarden van parameters en de bijhorende verdeling ervan. Door per parameter uit deze verdeling een mogelijke waarde te trekken kunnen simulaties (Monte Carlo simulaties) uitgevoerd worden. Deze geven een nauwkeuriger beeld (bij een groot aantal simulaties) over de huidige waarde van bijvoorbeeld een investering. Deze technieken worden gehanteerd om de valorisatie van pyrolyseolie op een wetenschappelijk verantwoorde manier uit te voeren.

Pyrolyse is een proces waarbij biomassa wordt omgezet in gas, char en olie. De opbrengstverdeling en samenstelling varieert met de voorbehandeling van de biomassa, de verblijftijd van de biomassa in de reactor, het reactortype en procesomstandigheden (vb. druk en temperatuur). Volgens een artikel van W. Prins dat zich baseert op artikels van Bridgwater, Freel en Piskorz is de gemiddelde verdeling bij fast pyrolyse van houtachtige biomassa 65,8 wt% olie, 12,2 wt% water, 7,7 wt% char en 10,8 wt% gas wanneer men vertrekt van droge biomassa (Prins, 1998). Fast pyrolyse wordt gekenmerkt door de hoge olieopbrengst in vergelijking met andere processen. Voor meer informatie over fast pyrolyseolie kan verwezen worden naar Bridgwater et al. (1999), Bridgwater (2004) en Bridgwater (2011). In deze masterproef wordt in de berekening een **biomassa naar pyrolyseolie conversiepercentage van 65%** gehanteerd, hoewel Stals M. et al. (2010) dit conversiepercentage nuanceert tot 42-52% afhankelijk van het type biomassa. (Bridgwater, 2004) (Stals, Thijssen, Vangronsveld, Carleer, Schreurs, & Yperman, 2010)

De pyrolyseolie is een mengeling van moleculen met een verschillende grootte die ontstaan door depolymerisatie en fragmentatie van cellulose, hemicellulose en lignine. De pyrolyseolie bevat gemiddeld 15-30 wt% water en bestaat uit koolstof, waterstof, zuurstof en ook beperkt zwavel, stikstof en zware metalen (Zhang, Chang, Wang, & Xu, 2007) (Stals, Carleer, Reggers, Schreurs, & Yperman, 2010). Het is de complexe samenstelling die bekeken zal worden om zo de mogelijke toepassingen te kunnen onderzoeken. Synoniemen voor pyrolyseolie zijn bio-oil, bio-crude-oil, bio-fuel-oil, wood liquids, wood oil, liquid smoke, wood distillates, pyroligneous tar, pyroligneous acid en liquid wood. (Bridgwater, 2004)

De economische valorisatie van de toepassingen van pyrolyseolie wordt vergeleken met de marktwaarde van pyrolyseolie (=vergelijkingsbasis). Pyrolyseolie kan gebruikt worden als substituuat voor stookolie, aardgas, kolen of pellets (Bradley, 2006). Een substituuat wordt hier omschreven als een grondstof met dezelfde en gedeeltelijk dezelfde toepassingen. Hieruit kan worden afgeleid (zie tabel 3) dat de marktwaarde van pyrolyseolie gemiddeld **9,83 EUR per GJ of 0,21 EUR per liter of 172,10 EUR per ton is**. Het gemiddelde wordt berekend op basis van de gemiddelde waarde van alle substituten vermeld in onderstaande tabel. Zonder rekening te houden met kolen als substituuat is de gemiddelde marktwaarde 207,81 EUR per ton.

Tabel 2: Marktwaarde pyrolyse-substituten

	EUR/GJ	Bron
Aardgas	8,58 ¹ -12,69 ²	(European commison, 2011)
Kolen	1,67	(The European Wind Energy Association, 2010)
Pellets	13,35	(Olsson, Vinterbäck, & Porsö, 2010)
Stookolie	12,88	(Energie Observatorium, 2011)

Tabel 3: Marktwaarde pyrolyseolie (vergelijkingsbasis)

	Minimum	Gemiddelde	Maximum
Pyrolyseolie³(in EUR/liter)	0,04	0,21	0,28
Pyrolyseolie (in EUR/GJ)	1,67	9,83	13,35
Pyrolyseolie (in EUR/ton)	29,25	172,10	233,63

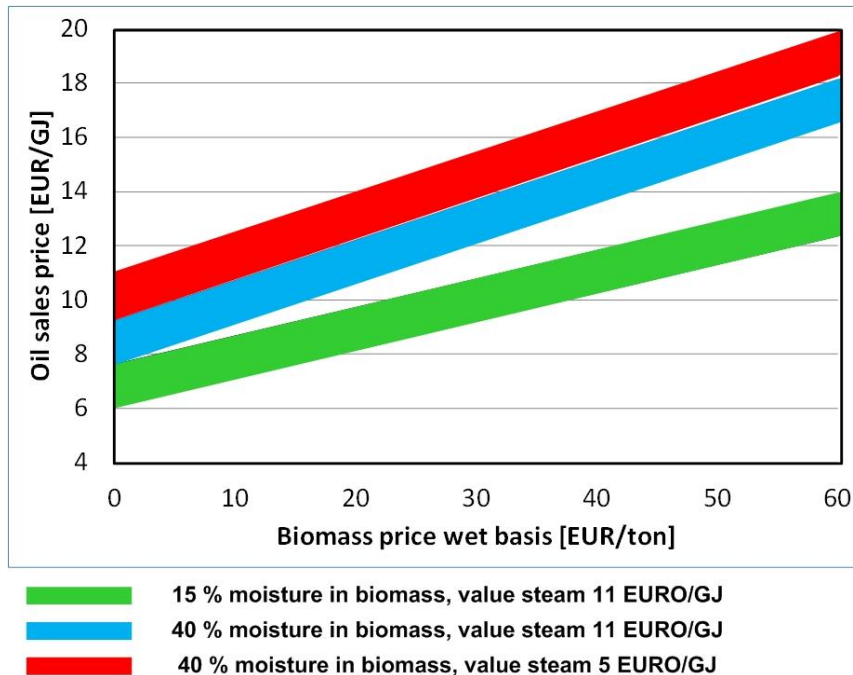
Vergelijkbare resultaten voor de waarde van pyrolyseolie zijn terug te vinden in de literatuur. Zo haalt Verykios, X. (2004) in zijn presentatie een waarde tussen 6,92 en 11,25 EUR/GJ aan. (Verykios, 2004)

BTG-BTL vermeldt op zijn website ook de prijs van pyrolyseolie. Ze halen aan dat de prijs sterk afhangt van de productiekosten die op hun beurt sterk afhangen van de investeringskost en de operationele kosten. Ze maken de berekening voor een installatie met een conversiepercentage van biomassa naar pyrolyseolie van 65% en een input van 37.500 ton per jaar (7.500 operationele uren). De prijs van pyrolyseolie is volgens hun ook afhankelijk van de kost van biomassa. Indien de kost 50 EUR per ton ds biomassa bedraagt, ligt de prijs van pyrolyseolie tussen 11 en 13 EUR/GJ. Onderstaande figuur vat hun resultaten samen. (BTG-BTL, 2012)

¹ Marktwaarde voor de industrie

² Marktwaarde voor de consument

³ Met 1,2 kg/liter en 17,5 MJ/kg (Bridgwater A. , 2011)



Figuur 2: De prijs van pyrolyseolie (BTG-BTL, 2012)

Het doel van de masterproef is de verschillende toepassingen te onderzoeken die het verschil tussen deze vergelijkingsbasis en de toepassingsmogelijkheden maximaliseren door te zoeken naar de hoogst mogelijke verkoopwaarde.

1.5.1 TOEPASSING ALS ENERGIEBRON

Pyrolyseolie kan als energiebron dienen. Hierbij wordt de olie door middel van een motor (gas, diesel of stoom) of turbine (stoom of gas) omgezet in elektriciteit, warmte of beide (warmtekrachtkoppeling). Onderzoek en ontwikkeling hebben ervoor gezorgd dat deze techniek sterk ontwikkeld is en de meest voor de hand liggende toepassing voor bio-olie is. Hoewel de samenstelling van de pyrolyseolie sterk verschilt van conventionele dieselbrandstoffen, toch verbrandt pyrolyseolie goed in motoren. Sommige bronnen vermelden dat enkel bij de ontsteking dient men gebruik te maken van hulpbrandstoffen. (Bridgwater, Toft, & Brammer, 2002) (VITO & ODE Vlaanderen, 2006)

Van negatief belang bij de verbranding is de aanwezigheid van partikels (particular matter (PM), fijn stof en roet) en alkalimetalen in de pyrolyseolie. Dit is vooral belangrijk als ook sulfaat aanwezig is, omdat dan alkalisulfaat wordt gevormd tijdens de verbranding. Alkalisulfaat zal zich hechten op turbinebladen en zo ernstige corrosieschade veroorzaken. Biomassa bevat weinig sulfaat, maar bevat wel kalium, natrium, cadmium en magnesium, zeker als deze afkomstig is van

fyto-remediërende gewassen. Deze zijn aanwezig in char, waarvan zich typisch ook delen in de pyrolyseolie bevinden. Uit pyrolyseolie moet het char effectief gezuiverd worden. De zure natuur, lage verbrandingswaarden en hoge viscositeit van pyrolyseolie zijn eigenschappen die door middel van aanpassingen aan de verbrandingsmotoren en -turbines opgelost kunnen worden. Pyrolyseolie kan tijdelijk opgeslagen worden (weken tot enkele maanden), afhankelijk van de eigenschappen van de olie, voordat de eigenschappen veranderen. Sterk veranderende eigenschappen zoals een toename in viscositeit, toename in moleculair gewicht, enz. kunnen de verbranding bemoeilijken. De reden voor veranderingen is dat pyrolyse op thermodynamisch vlak geen evenwichtsproces is. (Ringer, Putsche, & Scahill, 2006)

De verbranding van pyrolyseolie wordt in deze masterproef economisch gevaloriseerd. Vervolgens wordt dit resultaat vergeleken met de vergelijkingsbasis. De economische valorisatie van pyrolyseolie gebeurt aan de hand van een analyse van de kosten en de baten van de investering, een NCW analyse en een sensitiviteitsanalyse. De berekening start bij de aankoop van ruwe pyrolyseolie en eindigt bij de verkoop van elektriciteit en warmte. De productiekostprijs van ruwe pyrolyseolie kan berekend worden aan de hand van verschillende bronnen. Een ervan is deze van Bridgwater (2011):

$$\text{Productiekost pyrolyseolie (in } \frac{\text{EUR}}{\text{ton}}) = 1,1 * [(B + (H * 16.935 * F^{-0,33})) Y^{-1}]$$

Met:

B = kost van biomassa (EUR/ton ds);

H = kapitaal en kapitaal gerelateerde financiële lasten (standaardwaarde = 0,18);

F = toevoerstrom biomassa (ton ds/jaar); en

Y = fractionele olieopbrengst (standaardwaarde voor houtachtige biomassa = 0,75).

Op basis van deze formule en met de veronderstelling dat biomassa 50 EUR/ton ds kost (Kuppens, 2012), de kapitaallasten en kapitaal gerelateerde financiële lasten de standaardwaarde 0,18 aannemen, de fractionele olieopbrengst 0,65 bedraagt en er een jaarlijkse toevoerstrom aan biomassa is van 21.000 ton (Kuppens, 2012), bedraagt de kostprijs per ton pyrolyseolie 277,90 EUR. Deze kostprijs geeft een indicatie van de werkelijke kostprijs op basis van de gekozen parameters.

De parameters zijn gekozen op basis van mondelinge communicatie of op basis van literatuur met als studiegebied de Noorderkempen. Op basis van een kritische reflectie is geweten dat deze parameters de werkelijke waarde ervan slechts zullen benaderen. Enerzijds omdat de werkelijkheid moeilijk in modellen is weer te geven zonder assumpties te maken en anderzijds omdat werkelijke waarde fluctueren in de tijd door oncontroleerbare invloeden van buitenaf. Bijvoorbeeld de samenstelling van biomassa is afhankelijk van bodem specifieke parameters en

weersomstandigheden. Deze samenstelling heeft op zijn beurt invloed op de samenstelling van pyrolyseolie.

Om toch het effect van schommelingen in de parameters weer te geven, krijgen de parameters een verdeling opgelegd. Door ze te laten fluctueren in simulaties kan een beter beeld gegeven worden over de werkelijke productiekost van pyrolyseolie. Onderstaande tabel bevat de parameters, hun verdeling en kengetallen van de specifieke verdeling.

Tabel 4: Sensitieve parameters bij bepaling productiekost pyrolyseolie

Parameters	Verdeling	Kengetallen
Aankoopprijs van biomassa	Uniform	Minimum: 37,5 EUR/ton Maximum: 62,5 EUR/ton
Toevoerstroom van biomassa	triangulair	Minimum: 21.000 ton per jaar Maximum: 57.600 ton per jaar
Fractionele olieopbrengst	Uniform	Minimum: 60%; Maximum: 70%

De aankoopprijs van biomassa met als initiële waarde 50 EUR/ton (de waarde die doorheen deze masterproef zal gebruikt worden) wordt in deze sensitiviteitsanalyse opgenomen in een uniforme verdeling met als minimum de initiële waarde -25% en als maximum de initiële waarde +25%. In deze verdeling hebben alle waarde een even grote kans om gekozen te worden in een simulatie. De jaarlijkse toevoerstroom van biomassa wordt initieel vastgelegd op 21.000 ton per jaar (Kuppens, 2012). Deze waarde wordt als minimale en gemiddelde waarde aangehouden in een triangulaire verdeling, omdat de initiële waarde het meest waarschijnlijk is in de Noorderkempen. Een lagere waarde dan 21.000 ton per jaar wordt als economisch onrealistisch bestempeld. Eventueel kunnen alternatieve inputstromen aangesproken worden om deze hoeveelheid te bekomen. De maximale waarde van de triangulaire verdeling bedraagt 57.600 ton per jaar (Kuppens & Thewys, 2009). Het vergroten van de aanvoer van biomassa kan door de totale oppervlakte van biomassateelt te vergroten of andere inputstromen te zoeken. De fractionele olieopbrengst tenslotte krijgt een uniforme verdeling opgelegd waarbij het maximum en het minimum gekozen worden op basis van het artikel van Kuppens en Thewys (2009). Aangezien de verschillende processen zich toespitsen op de verwerking van pyrolyseolie, kan verondersteld worden dat de conversie van biomassa naar pyrolyseolie geoptimaliseerd zal worden. Een lager conversiepercentage dan 60% wordt dan ook als economisch onrealistisch beschouwd.

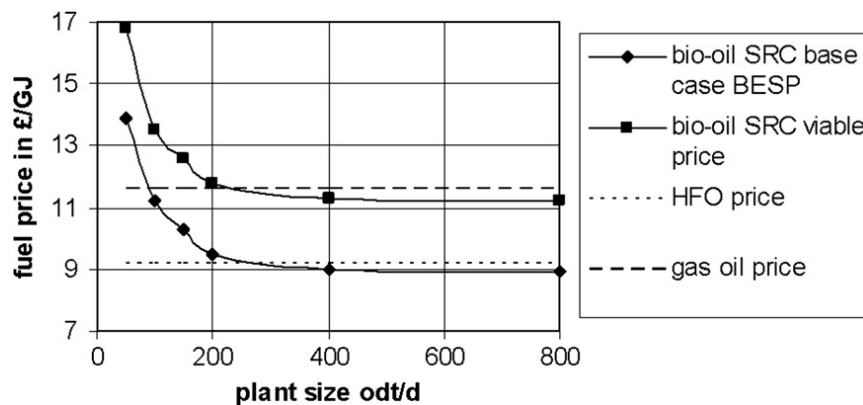
De sensitiviteitsanalyse wordt uitgevoerd op basis van de formule van Bridgwater (2011):

$$\text{Productiekost pyrolyseolie} \left(\text{in } \frac{\text{EUR}}{\text{ton}} \right) = 1,1 * [(B + (H * 16.935 * F^{-0,33})) Y^{-1}$$

Door de parameters willekeurig te laten fluctueren binnen de vooraf bepaalde range van waarden wordt een verdeling van de productiekost van pyrolyseolie bekomen. Deze verdeling levert een 95%-betrouwbaarheidsinterval (95%-BI) dat de productiekost van pyrolyseolie weergeeft op basis

van deze formule en deze verdeling van parameters. Het 95%-BI bedraagt [211,13-295,45] EUR per ton. Dit wil zeggen dat in 95% van de op deze manier berekende intervallen de werkelijke waarde van de productiekost van pyrolyseolie zullen bevatten. De volledige resultaten van deze simulatie (N = 1.000) zijn terug te vinden in **bijlage 4**.

Rogers en Brammer (2012) bepalen in hun artikel de productiekost van pyrolyseolie. Onderstaande figuur geeft de conclusie weer. Wanneer de veronderstelling wordt gemaakt dat er een input droge stof biomassa is per dag van 70 ton (realistisch in het scenario van de Noorderkempen), bekomen we een kostprijs van ongeveer 17,17 EUR/GJ of 0,36 EUR/liter⁴ of 300,44 EUR/ton (haalbare prijs) of 246,00 EUR/ton (break-even scenario) (biomassa met een kostprijs van 64,53 EUR/ton ds). In deze context wordt een haalbare prijs gezien als een prijs die rekening houdt met bedrijfsrisico's. (Rogers & Brammer, 2012)



Figuur 3: Verkooprij pyrolyseolie (met wilg als input) (Rogers & Brammer, 2012)

Rogers en Brammer (2012) geven ook een verkooprij weer bij een kostrij van biomassa van 50,70 EUR/ton. De break-even rij is 12,91 EUR/GJ of 0,27 EUR/liter of 225,84 EUR/ton en de haalbare rij is 15,67 EUR/GJ of 0,33 EUR/liter of 274,23 EUR/ton.

Rekening houdend met de specifieke kenmerken van de Noorderkempen waarmee deze masterproef rekening houdt, dient een gemiddelde productiekost bepaald te worden. Deze kost zal in verdere berekeningen in deze masterproef gebruikt worden. Indien ervan uitgegaan wordt dat de aankoop van biomassa 50 EUR per ton ds bedraagt (Kuppens, 2012), is de gemiddelde productiekost op basis van deze hierboven opgesomde bronnen **259,32 EUR/ton**. Deze productiekost is bepaald door het gemiddelde te nemen van enerzijds het resultaat van de formule van Brigdwater (2011) met de initiële parameters (277,90 EUR/ton) en anderzijds de twee kostrijzen van Rogers en Brammer (2012) van 225,84 EUR/ton en 274,23 EUR/ton. Deze drie waarden leveren de gemiddelde productiekost van pyrolyseolie van 259,32 EUR/ton op. De keuze om de beide rijzen (haalbare en break-even rij) op te nemen wordt verklaard doordat het risico van de productie van pyrolyseolie gedeeltelijk zal moeten worden gedragen door de

⁴ Met 1,2 kg/liter en 17,5 MJ/kg (Bridgwater A. , 2011)

pyrolysecentrale en gedeeltelijk door andere bedrijven in het bioplex. Aan het einde van dit hoofdstuk wordt aandacht besteed aan het begrip bioplex.



Figuur 4: Processtappen energieproductie *(Balat, Balat, Kirtay, & Balat, 2009) **(VITO & ODE Vlaanderen, 2006) *(Bridgwater, Toft, & Brammer, 2002)**

In bovenstaande figuur worden de belangrijkste stappen van de elektriciteit- en warmteproductie weergegeven. In de kaders staan opmerkingen vermeld die tijdens de procesbespreking aan bod komen. Bij de aankoop van pyrolyseolie wordt gezocht naar de maximale aankoopprijs. De voorbehandeling van pyrolyseolie houdt de zuivering, voorverwarming en controle van de samenstelling in. De opwekking van energie via WKK kan op basis van verschillende technologieën. Belangrijke parameters zijn het vermogen (>1MWe omdat we niet op microschaal werken) en het elektrisch rendement $\approx [20-45\%]$. Naast de voor- en nadelen van elke technologie (o.a. benutting van warmtewinsten) spelen de proceskosten, input en eventuele emissies ook een rol. De opgewekte elektriciteit dient voor eigen gebruik en het overige wordt verkocht, hierbij wordt de elektriciteit op het elektriciteitsnet afgezet en de warmte wordt verondersteld geleverd te worden aan omliggende ondernemingen. De kosten hiervan zijn gerelateerd aan de aansluiting op het net. Tot slot moeten steunmaatregelen onderzocht worden. Hierbij horen bijvoorbeeld vergunningen (vb. emissiereglementering) en subsidies. Al de kosten en opbrengsten worden op gelijke basis (vb. EUR/ton pyrolyseolie of EUR/GJ) gebracht en vervolgens vergeleken. Een compleet beeld wordt weergegeven in een NCW analyse. De sensitiviteitsanalyse geeft aan welke parameters een sterke invloed hebben op de resultaten en bijgevolg ook hoe variabel de resultaten zijn.

1.5.2 TOEPASSING ALS GRONDSTOF VOOR CHEMICALIËN

Ook al komen bepaalde chemicaliën slechts in zeer kleine concentraties voor en zijn scheidingsmethoden ingewikkeld en duur, toch zorgt de hoge verkoopwaarde ervan voor potentieel (Bridgwater, Meier, & Radlein, 1999). De chemische samenstelling van pyrolyseolie varieert, maar dezelfde componenten komen meestal terug (Guo, Wang, Guo, Liu, Luo, & Cen, 2010). In hoofdstuk III: toepassingen als grondstof voor chemicaliën wordt een gedetailleerde samenstelling weergegeven.

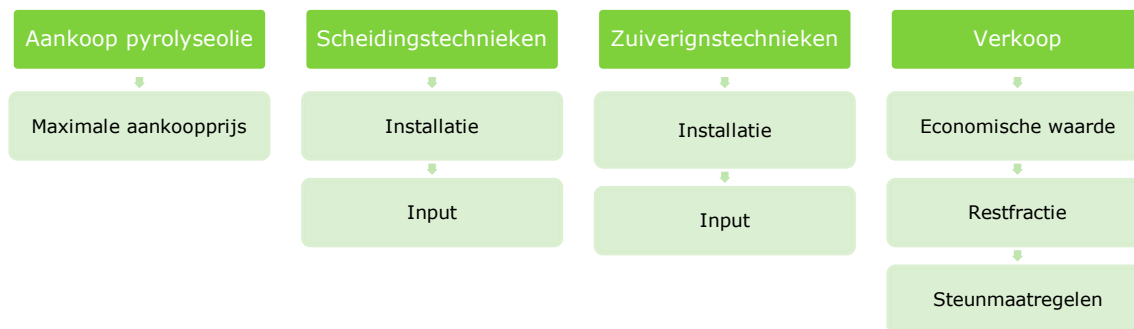
De chemische componenten die potentieel hebben zijn: fenolen, derivaten van suikers (vb. levoglucosan), formaldehyde, furfural alcohol en hydroxyacetyldehyde (Prins, 1998). Deze chemicaliën kunnen toepassingen vinden in de hars- (binder in spaanplaat en multiplex), farmaceutische, vezelsynthese- of smaakindustrie.

Voorbeeld. Levoglucosan is een potentiële bouwsteen voor de synthese van polymeren, farmaceutische stoffen, pesticiden en surfactanten. Er bestaan micro-organismen die levoglucosan kunnen omzetten in citroenzuur en itaconzuur. (Zhang, Chang, Wang, & Xu, 2007) (Brown, 2003)

Het is onmogelijk om alle chemische componenten op hun mogelijkheden te onderzoeken en deze te valoriseren, daarom beperkt deze masterproef zich tot enkele chemische toepassingen. Aangezien voedseladditieven vaak terugkomen als beloftevolle toepassing zal deze in de masterproef onderzocht worden (Bennett, Helle, & Duff, 2009) (Helle, Bennett, Lau, Matsui, & Duff, 2007). Ook fenol met zijn toepassingsmogelijkheden zal onderzocht worden. Deze vindt onder andere toepassingsmogelijkheden als binder (natuurlijk hars) in de spaanplaatindustrie (Effendi, Gerhauser, & Bridgwater, 2008) (Prins, 1998) (Patel, Bandyopadhyay, & Ganesh, 2011). Daarnaast wordt de economische haalbaarheid om industriële chemische grondstoffen uit pyrolyseolie te scheiden onderzocht, net als de economische haalbaarheid van selectieve fast pyrolyse en hernieuwbare waterstofproductie. Ook wordt pyrolyseolie gevaloriseerd aan de hand van de waarde van de chemische componenten die het bevat.

Deze chemische toepassingen zullen worden onderzocht op hun toepassingsmogelijkheden door middel van een literatuurstudie. De berekening start bij de aankoop van ruwe pyrolyseolie en eindigt bij de verkoop van de chemicaliën. In de masterproef wordt, indien mogelijk, een beschrijving gegeven van de nodige technieken/handelingen om de chemicaliën uit de pyrolyseolie te halen. Hierbij maakt men gebruik van installaties/machines, bijvoorbeeld een voorverwarmingsinstallatie. Extra chemicaliën worden toegevoegd om fysische eigenschappen van de pyrolyseolie aan te passen om betere scheiding te verkrijgen. Ze vervullen hier de functie van katalysator (Patel, Bandyopadhyay, & Ganesh, 2011). Ook de meerkosten en meeropbrengsten van een eventuele upgrade dienen in rekening te worden gebracht. Een upgrade is nodig om zuivere chemicaliën te verkrijgen en zo een hogere verkoopwaarde te krijgen. Ook moet de mogelijkheid van combinaties van toepassingsmogelijkheden bekeken worden en welke de

mogelijkheden voor de restfractie zijn. De restfractie kan in sommige gevallen gebruikt worden als energiebron (Patel, Bandyopadhyay, & Ganesh, 2011). Alle kosten en opbrengsten worden op gelijke basis gebracht (vb. EUR/ton pyrolyseolie) en vergeleken. Een sensitiviteitsanalyse leert ons hoe variabel de resultaten zijn. Ten slotte zal een vergelijkende studie tussen de toepassingsmogelijkheden ons leren welke toepassing/combinatie van toepassingen de grootste valorisatie van biomassa oplevert. Deze stappen zijn samengevat in figuur 3.



Figuur 5: Processtappen chemicaliën

Het doel van de studie is namelijk om een zo hoog mogelijke prijs te kunnen betalen aan landbouwers voor de biomassa, zodat zij overtuigd kunnen worden om fyto-remediatie toe te passen (door een voldoende hoog vervangingsinkomen).

Een opmerking bij de toepassing als chemicaliën is de beperkte economische informatie die terug te vinden is in de literatuur. De resultaten van dit deel zullen bijgevolg minder gedetailleerd zijn als in de andere delen van deze masterproef. Toch is er zoveel mogelijk relevante economische informatie opgenomen om een zo goed mogelijk beeld te krijgen over de mogelijkheden van deze toepassing.

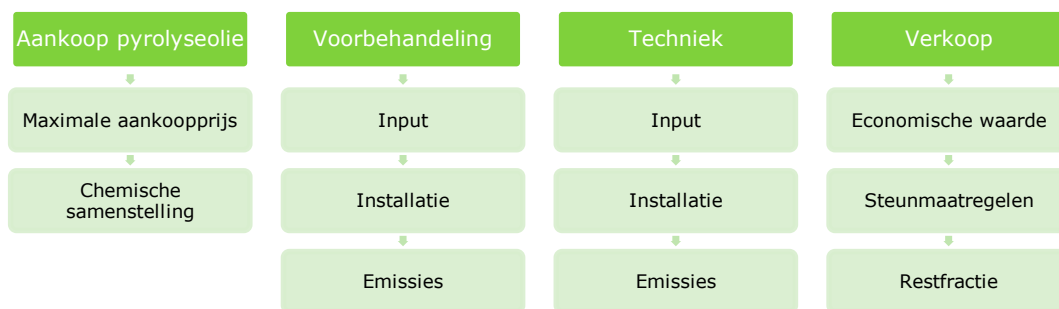
1.5.3 TOEPASSING ALS TRANSPORTBRANDSTOF

Energietoepassingen van biomassa na bijvoorbeeld verbranding van geüpgradede pyrolyseolie zijn in de literatuur veelvuldig beschreven. Wanneer pyrolyseolie geüpgraded wordt om als transportbrandstof te dienen, blijkt er in verhouding veel minder onderzoek naar gedaan te zijn. De conversie brengt kosten met zich mee (Wright, Daugaard, Satrio, & Brown, 2010). Deze worden in deze masterproef indien mogelijk gedetailleerd onderzocht om zo tot een concrete kostprijsbepaling te komen. De literatuurstudie brengt duidelijkheid in de stappen nodig om van pyrolyseolie tot een transportbrandstof te komen. De berekening start bij de aankoop van ruwe pyrolyseolie en eindigt bij de verkoop van de transportbrandstof.

Om als transportbrandstof te kunnen dienen, moet pyrolyseolie geüpgraded worden om de eigenschappen van pyrolyseolie aan te passen. De eigenschappen die aangepast moeten worden, zijn de: (Ringer, Putsche, & Scahill, 2006):

- Onzuiverheden;
- Lage verbrandingswaarden;
- Korte levensduur;
- Hoge zuurtegraad; en
- Lange koolwaterstofketens.

De voorbehandeling bestaat uit het verwijderen van onzuiverheden. De vaste deeltjes kunnen motoronderdelen beschadigen en voor opstoppingen zorgen. Ook andere componenten (zware metalen, zuurstof, enz.) moeten verwijderd worden (Wright, Daugaard, Satrio, & Brown, 2010) (Holmgren, Marinangeli, Nair, Elliott, & Bain, 2008). Eventuele opslagkosten worden ook in rekening gebracht. Het upgraden kan op basis van verschillende processen: hydroprocessing, katalytisch kraken en vergassing. De verschillende processen bestaan dan weer uit verschillende stappen. De verschillende stappen om uit pyrolyseolie transportbrandstoffen te produceren, zijn weergegeven in onderstaande figuur. (Wright, Satrio, Brown, Daugaard, & Hsu, 2010)



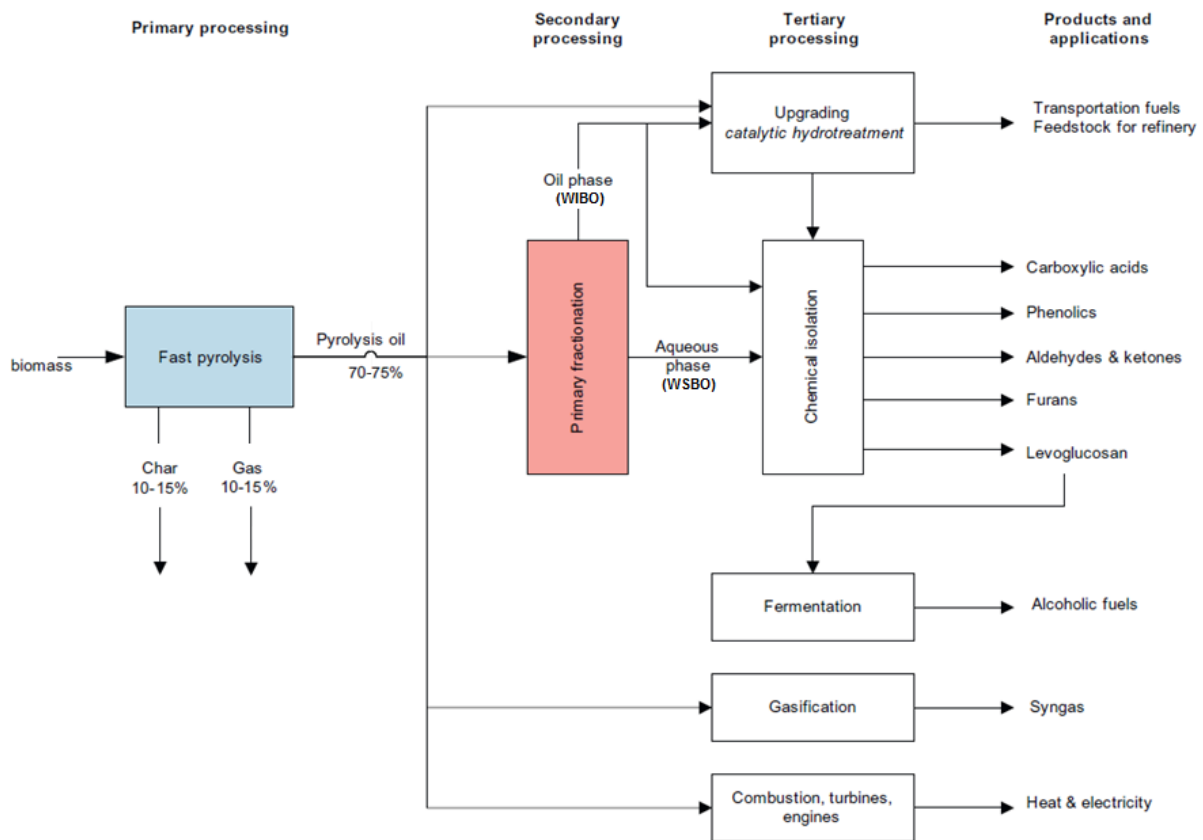
Figuur 6: Processtappen transportbrandstoffen

De verschillende proceskosten worden op gelijke basis (vb. EUR/ton pyrolyseolie) gebracht. Vervolgens worden de opbrengsten (verkoopwaarde) en kosten op deze basis gebracht en met elkaar vergeleken. Met behulp van de vergelijkingsbasis, een NCW analyse en de sensitiviteitsanalyse wordt het potentieel van de toepassing aangetoond.

De focus van de masterproef ligt op economische aspecten van de valorisatie van pyrolyseolie. De technologische achtergrond is slechts een hulpmiddel om tot een meer gedetailleerde en meer correcte valorisatie te komen.

1.6 BIOPLEX

Het concept waarop deze masterproef steunt is dat van een bioplex. Pyrolyseolie afkomstig van fyto-remediatie en/of andere biomassaoverschotten (vb. bermmaaisels) worden er verwerkt tot verschillende categorieën eindproducten. De drie grote categorieën zijn warmte en elektriciteit, chemicaliën en transportbrandstoffen. Het hart van dit concept is een bio-raffinaderij. Het hart van een bioplex kan schematisch als volgt worden weergegeven. (Vitasari, Meindersma, & de Haan, 2011) (New Hampshire Office of Energy & Planning, 2004)



Figuur 7: Concept van een bio-raffinaderij. (Vitasari, Meindersma, & de Haan, 2011)

De processtap *primary fractionation* (zie roze kader) is geen verplichte processtap, maar vergemakkelijkt het verdere scheidingsproces omdat de complexiteit van de pyrolyseolie afneemt. In de waterige fase (WSBO: water soluble bio-oil) zitten vooral waardevolle chemicaliën. De olie fase (WIBO: water insoluble bio-oil) kan verder geüpgraded worden naar transportbrandstoffen of gedeeltelijk geüpgraded en verkocht worden aan een conventionele raffinaderij voor verdere verwerking tot transportbrandstoffen. Daarnaast kan de pyrolyseolie gebruikt worden in de

productie van syngas⁵ en verbrand worden voor de productie van warmte en elektriciteit. **Bijlage 2** bevat meer informatie over de primary fractionation van pyrolyseolie. (Vitasari, Meindersma, & de Haan, 2011)

Pyrolyseolie uit biomassa afkomstig van fyto-remediatie dient een voorbehandeling te ondergaan. Metalen kunnen uit de pyrolyseolie verwijderd worden door middel van ion uitwisseling of door gebruik te maken van de methode: 'guard beds'. Het verwijderen van metalen is aangewezen, omdat deze materialen katalysatoren kunnen vernietigen. Ook is deze stap zeer belangrijk bij toepassingen van vervuilde pyrolyseolie in de voedingsindustrie. (Marker, et al., 2005)

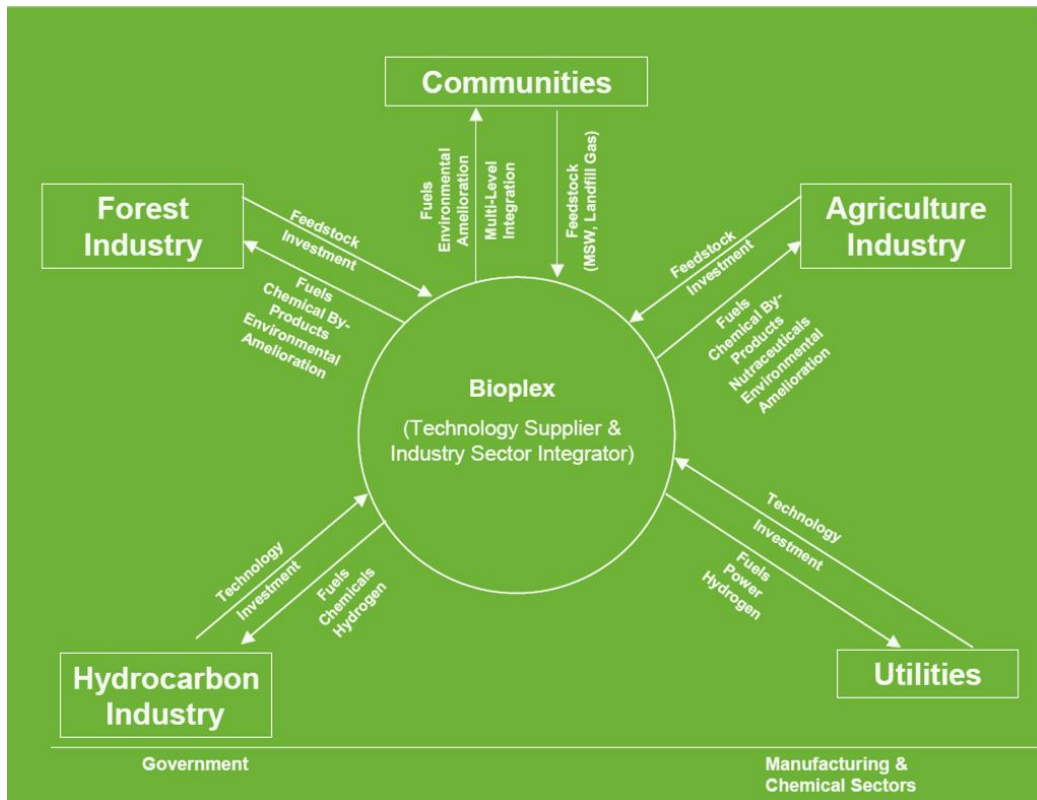
Tijdens de zuivering worden vaste deeltjes uit de pyrolyseolie verwijderd, zodat de concentratie ervan kleiner is dan 0,1 wt%. De voorverwarming tot 345-355 K zorgt voor een verlaging van de viscositeit (optimale range = [10-20cSt]). De eenheid cSt staat voor centistoke en is de kinematische viscositeit van een vloeistof. Hoe hoger de kinematische viscositeit hoe viskeuzer de vloeistof (Tribolox). Ook geldt een maximale range in andere fysische en chemische eigenschappen van de pyrolyseolie.

Het probleem van de pyrolyseolie in het algemeen is de hoge zuurtegraad (pH tussen 2,5 en 3,5) en het hoge zuurstofgehalte (~40%). Conventionele raffinaderijen zijn niet ontworpen om producten te verwerken met een hoge zuurtegraad en een hoog zuurstofgehalte. Alvorens de olie verder te laten verwerken in een conventionele raffinaderij moeten de zuren geneutraliseerd en de olie gestabiliseerd worden in een aangepaste installatie. Bijvoorbeeld een voorbehandeling in proceseenheden ontworpen in 317 roestvrij staal. Dit proces heet het upgraden van pyrolyseolie door middel van chemische modificatie. (Marker, et al., 2005) (Moens, 2009)

Wanneer pyrolyseolie deze voorbehandeling ondergaat, kan het als input dienen voor een bioplex. Een bioplex is een geïntegreerd complex waarin op een economisch verantwoorde manier energie, chemicaliën en materialen geproduceerd kunnen worden. De bosbouw (eventueel agrarische sector) voorziet een bioplex van de input, samen met eventueel andere bedrijven die in hun processen biomassa als restfractie hebben. De producten van het proces kunnen in het complex verwerkt worden tot eindproducten (voorbeeld: zie OSB model hoofdstuk III-3.3.1)). De energiesector en de nutsbedrijven kunnen voor investeringen, infrastructuur en distributie zorgen. De overheid en industrie spelen een secundaire rol. De overheid kan door wetgeving en via subsidies voor ondersteuning zorgen; de industrie kan voor de ontwikkeling van nieuwe markten zorgen. De idee van een bioplex wordt in onderstaande figuur weergegeven. (New Hampshire Office of Energy & Planning, 2004)

Er is sprake van een ontkoppeld systeem, omdat de productie van pyrolyseolie en elektriciteit op een verschillende plaats en verschillend tijdstip kunnen plaatsvinden (Peacocke, Bridgwater, & Brammer, 2006).

⁵ Syngas is een gasmengsel van koolstofmonoxide en waterstofgas.



Figuur 8: Bioplex (Hogen, 2002)

Het hart van een bioplex is de bio-raffinaderij. Deze moet zo worden ontwikkeld dat het een continue stroom aan eindproducten levert, zodat het een stabiele afnemer en toeleverancier is voor de andere bedrijven in het complex. Vele voordelen van een bioplex vloeien voort uit het feit dat bedrijven in het complex geografisch kort bij elkaar liggen. Zo kunnen logistieke kosten tussen bedrijven sterk verlaagd worden. Een volgend belangrijk ecologisch voordeel is dat energie (vooral warmte en elektriciteit), opgewekt door een bio-raffinaderij, zonder grote investeringen aan de andere bedrijven in het complex geleverd kan worden. Daarnaast kunnen bedrijven nauwer samenwerken wat innovatie ten goede moet komen. Het wordt gemakkelijker om infrastructuur te delen en joint ventures aan te gaan. Het nauwer samenwerken kan ook kostenreducties opleveren en kan marktontwikkeling bevorderen. Een voordeel voor de overheid is dat het complex nauw opgevolgd kan worden wat de ondersteuning voor de sector moet bevorderen, omdat de sector zich concentreert in één of meerdere bioplexen. Het verhoogt de zichtbaarheid en de geloofwaardigheid van een sector gebaseerd op biomassa. Het laatste voordeel dat hier besproken wordt, is de marktaanpasbaarheid. Met slechts één grondstof kan een range van producten geproduceerd worden. De range kan aangepast worden aan de behoeften van de markt of wat economisch het meest voordelig is voor een bioplex. (Hogen, 2002)

Voordat een bioplex kan ontstaan, zullen nog verschillende moeilijkheden overwonnen moeten worden. Eerst en vooral moet de werking van deze 'groene industrie' aangetoond worden. Hierbij is vooral de stabiliteit van groot belang. Zo zullen er samenwerkingen opgestart moeten worden voor het onderzoek en de ontwikkeling van economisch haalbare producten. De bestaande toepassingen zijn nog onvolledig en/of te beperkt in hun mogelijkheden. De overheid moet meer ondersteuning bieden aan de ontwikkeling van dit concept. Het moet de voordelen ervan inzien. Daarnaast moet er een platform ontwikkeld worden, wat het bewustzijn en marketing van een bioplex moet ondersteunen. Tenslotte is het duidelijk dat voor de realisatie van een bioplex grote investeringen noodzakelijk zijn.

Er bestaan reeds een tweetal ondernemingen die samen het concept van een bioplex benaderen: Red Arrow⁶ en Ensyn⁷. Red Arrow (Wisconsin, VS) is een onderneming die zich richt op het omzetten van pyrolyseoliën in voedseladditieven. Volgens hun website produceren ze gecondenseerde natuurlijke rook smaakstoffen die smaken benaderen van gerookt, gegrild, geroosterd, gesauteerd, gebakken, gekarameliseerd en gefrituurd voedsel. Hun belangrijke productiestappen zijn gepatenteerd. Ensyn (Delaware, VS) is een onderneming die hernieuwbare vloeibare brandstoffen en chemicaliën produceert. Ze produceren (naast ruwe pyrolyseolie) elektriciteit, transportbrandstoffen, brandstoffen, voedseladditieven en hernieuwbare chemicaliën. Het eerste commerciële product van Ensyn waren natuurlijke harsen. Opvallend aan Ensyn is dat ze een groot aantal allianties aangaan (o.a. met Red Arrow) om voldoende instroom aan investeringen te krijgen om aan onderzoek en ontwikkeling te doen. (Red Arrow Products Company LLC, 2010) (Ensyn, 2011)

⁶ <http://www.redarrowusa.com/>

⁷ <http://www.ensyn.com/>

HOOFDSTUK II: TOEPASSING ALS ENERGIEBRON

In deze masterproef worden drie algemene toepassingen van pyrolyseolie besproken. In hoofdstuk III worden technieken besproken die bepaalde waardevolle chemicaliën uit pyrolyseolie halen en in hoofdstuk IV worden technieken besproken die pyrolyseolie omzetten in transportbrandstoffen. Deze masterproef richt zich op de economische aspecten van de verschillende toepassingen. De twee toepassingen leveren producten op met een grote tot zeer grote toegevoegde waarde. Het potentieel van deze toepassingen is veel groter als bij deze toepassing die pyrolyseolie omzet in elektriciteit en warmte. Hiertegenover staat wel dat deze techniek minder investeringen vergt. Zolang de andere toepassingen commercieel niet op punt staan, kan de toepassing als energiebron economisch interessant zijn. Ook voor de verwerking van restfracties is deze toepassing beloftevol.

Echter nu de ontwikkelingen voor de toepassingen als chemicaliën en transportbrandstoffen in een verder stadium komen (bijvoorbeeld de toepassing als transportbrandstof kan commercieel zijn vanaf 2012 volgens Ensyn (2010)), blijft de toepassing als energiebron interessant voor de verwerking van restfracties. Venderbosch en Prins (2010) omschrijven dit als een end-of-pipe techniek die gebruik maakt van goedkope grondstoffen die voor geen andere toepassingen meer gebruikt kunnen worden.

Pyrolyseolie heeft een energie-inhoud van 17,5 MJ/kg afhankelijk van de gebruikte biomassa. (Bridgwater A. , 2011). Deze energie-inhoud is veel lager dan deze van fossiele brandstoffen. Aardgas heeft bijvoorbeeld een energie-inhoud van 47,14 MJ/kg (Essom CO. LTD). De redenen voor de lagere energie-inhoud van pyrolyseolie zijn het hoge watergehalte van 25% en het hoge zuurstofgehalte van 38% (Bridgwater A. , 2011) (Venderbosch & Prins, 2010).

Echter hebben verbrandingstesten aangetoond dat pyrolyseolie een substituut kan zijn van fossiele grondstoffen voor de opwekking van elektriciteit en warmte. Hoewel de karakteristieken van de olie sterk verschillen, kunnen de gevolgen hiervan in praktijk beperkt worden. Venderbosch en Prins (2010) halen in hun artikel vier modificaties aan die noodzakelijk zijn als pyrolyseolie als input gebruikt wordt om elektriciteit en/of warmte te produceren. Deze zijn:

- Een compleet lage druk toevoersysteem van pyrolyseolie inclusief voorverwarming en filtratie;
- Een verbeterd design van de pyrolyseolie-sproeier die een grotere doorstroom aan olie toelaat en/of een duale brandstoftoevoer toelaat (vb. bij het bevorderen van de ontsteking);
- Een herontwerp van het hete gedeelte van de turbine inclusief de wieken en schoepen; en
- Een gedeeltelijk ontwerp in roestvrij staal en een herontwerp van de polymere onderdelen.

Ensyn (2010) is een onderneming die inzet op de verwerking van pyrolyseolie. In een van hun presentaties tonen ze aan dat groene elektriciteit uit pyrolyseolie geproduceerd kan worden aan

een tarief van 0,08 EUR/kWh. Dit is 40% goedkoper dan elektriciteit opgewekt uit fossiele brandstoffen. Hierbij wordt pyrolyseolie wel vermengd met een fossiele brandstof om technische redenen. Ze geven aan dat een proces mogelijk is waarbij met 100% pyrolyseolie gewerkt wordt. (Ensyn, 2010)

Het ecologische voordeel van de productie van elektriciteit en warmte op basis van biomassa is dat het een daling in emissies teweeg brengt. Zo daalt de uitstoot van broeikasgassen met 70 tot 90% in vergelijking met de opwekking van elektriciteit en warmte met fossiele brandstoffen als input. Ook daalt de uitstoot aan NO_x en SO_x. (Ensyn, 2010)

Er kunnen ook een aantal redenen worden aangehaald waarom biomassa eerst via fast pyrolyse moet worden omgezet in pyrolyseolie en vervolgens via een turbine of motor in elektriciteit en/of warmte en niet onmiddellijk biomassa verbranden voor de opwekking van elektriciteit en/of warmte. De belangrijkste reden is dat de energiedichtheid van biomassa in verhouding veel lager is, waardoor er te veel energie verloren gaat bij de verbranding ervan (Thane, 2010). Ook kan de productie van pyrolyseolie gescheiden worden van de productie van elektriciteit en/of warmte. Daarnaast is het transport van pyrolyseolie economisch gezien gunstiger dan het transport van biomassa, omdat de energiedichtheid van pyrolyseolie groter is. (Brammer, Lauer, & Bridgwater, 2006)

De opwekking van elektriciteit en/of warmte uit biomassa kan op basis van verschillende routes waarvan fast pyrolyse er een van is. In vergelijking met vergassing blijkt fast pyrolyse interessant te zijn voor relatief kleine toepassingen (tot ongeveer 20 MW). (Voets, Kuppens, Cornelissen, & Thewys, 2011)

De toepassing als energiebron zoals in deze masterproef besproken zal worden, levert een combinatie van elektriciteit en warmte (warmtekrachtkoppeling of WKK). De assumpties die hierbij gemaakt worden, zijn dat de elektriciteit afgezet kan worden op het elektriciteitsnet en dat de warmte geleverd kan worden aan bedrijven en woningen in de nabije omgeving (idee van een bioplex).

De toepassing van pyrolyseolie als energiebron wordt geëvalueerd aan de hand van een netto contante waarde berekening. De maximale waarde van pyrolyseolie wordt berekend door alle parameters een range van waarden op te leggen met bijhorende verdeling. Op basis van simulaties (Monte Carlo simulaties) wordt de waarde van pyrolyseolie bepaald waarbij de kans dat de NCW berekening gelijk aan of groter is dan nul, 95% is. In formulevorm levert dit twee formules op: (Voets, Kuppens, Cornelissen, & Thewys, 2011) (Kuppens, 2012)

$$P(NCW \geq 0) = 0,95$$

en

$$NCW = \sum_{n=1}^n \frac{CF_n}{(1+i)^n} - I_0$$

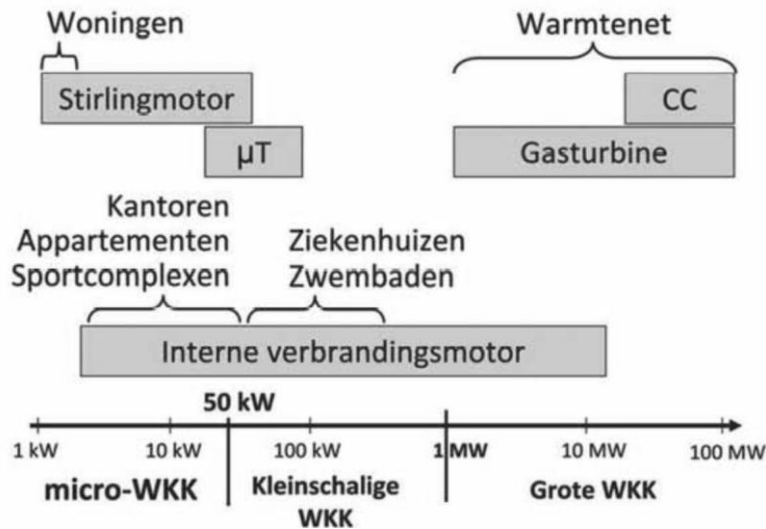
met:

- n: levensduur van de installatie;
- i: discontovoet;
- I_0 : netto initiële investering (in jaar 0); en
- CF_n : jaarlijkse kasstroom (opbrengsten – kosten).

Alvorens over te gaan naar de netto contante waarde berekening, wordt eerst de technologie bondig toegelicht. Daarna worden achtereenvolgens de investering, de opbrengsten en de kosten besproken. Deze zijn de belangrijkste onderdelen van de netto contante waarde berekening. Vervolgens worden deze bij elkaar gevoegd in de berekening zelf. Sensitieve variabelen worden gedefinieerd en hun effect op de NCW wordt aangetoond door middel van een Monte Carlo simulatie. Tot slot volgt de waardebepaling van pyrolyseolie.

2.1 TECHNOLOGIE

De opwekking van energie uit pyrolyseolie kan gebruik maken van verschillende beschikbare technologieën. In onderstaande tabel zijn deze technologieën samengevat. Allemaal zijn ze in staat om elektriciteit en warmte op te wekken (WKK). In dit hoofdstuk wordt de pyrolyseolie niet aangepast aan de motor, maar wordt de motor aangepast aan de eigenschappen van pyrolyseolie. In deze context wordt enkel gesproken over motoren met een relatief groot vermogen (grote WKK). Ook gaat het hier enkel om statische toepassingen. Deze masterproef spreekt over motoren met een relatief groot vermogen. Volgens COGEN Vlaanderen is de toepassing die in deze masterproef besproken zal worden een grote WKK (zie onderstaande figuur). (Voets, Kuppens, Cornelissen, & Thewys, 2011)



Figuur 9: Schaal WKK-installatie (COGEN Vlaanderen, 2010)

Tabel 5: Beschikbare technologieën voor de omzetting van pyrolyseolie in energie (elektriciteit en warmte) (Brammer, Lauer, & Bridgwater, 2006)

Technologie	Elektrische output	Warmte output
Bio-olie motor (duale brandstof diesel)	1 of 5 MW _e	2 of 10 MW _{th}
Bio-olie gas turbine	5 of 15 MW _e	10 of 25 MW _{th}
Bio-olie gas turbine (Combined cycle)	15 MW _e	25 MW _{th}
Bio-olie boiler (Rankine cycle)	15 MW _e	25 MW _{th}

Op basis van de gegevens uit bovenstaande figuur kan afhankelijk van de grootte van de installatie de beschikbare technologie aangeduid worden. Deze lijst van toepassingen is niet exhaustief. Zo zijn er nog andere technologieën die bijvoorbeeld op zeer kleine schaal opereren. Een voorbeeld hiervan is een hete lucht- of stirlingmotor. (Bridgwater A. V., 2004)

Bijlage 3 gaat dieper in op drie types motoren (boiler, motor en de turbine) die geschikt zijn om pyrolyseolie te verbranden voor de productie van elektriciteit en warmte.

2.2 INVESTERING

De netto initiële investering kan opgesplitst worden in twee delen. Enerzijds is er de initiële investeringsuitgave in jaar 0. Dit is de eigenlijke investering in het kapitaal dat noodzakelijk is voor de gekozen techniek. Anderzijds zijn er de verkregen subsidies. Door de initiële investering te verminderen met deze subsidies kan de netto initiële investering bekomen worden. (Voets, Kuppens, Cornelissen, & Thewys, 2011)

$$I_0 = I - U_{inv}$$

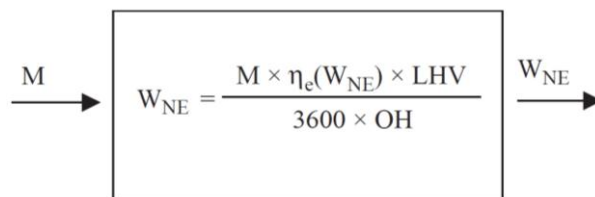
met:

- I_0 : netto initiële investering;
- I : initiële investeringsuitgave; en
- U_{inv} : subsidies op de investering.

De initiële investering (I) heeft in deze masterproef betrekking op het ontvangen van pyrolyseolie, de voorbehandeling, de eigenlijke vergassing in motor of turbine en de aansluiting op het net van elektriciteit en warmte. Daarnaast wordt ook rekening gehouden met rookgasreiniging. De subsidies omvatten de steunmaatregelen van de verschillende overheden. Indien het totale bedrag van de subsidies van de initiële investering wordt afgetrokken, blijft de netto initiële investering over.

Alvorens het investeringsbedrag berekend kan worden, dient de capaciteit van de installatie berekend te worden. In deze masterproef is de limiterende factor de jaarlijkse input aan biomassa. Er wordt vanuit gegaan dat de schaalgrootte van de installatie aangepast kan worden aan de vastgelegde jaarlijkse input. Deze jaarlijkse input bedraagt 21.000 ton biomassa of 13.650 ton pyrolyseolie (gehanteerde conversiepercentage in deze masterproef bedraagt 65%).

Indien de installatie als geheel bekeken wordt, kunnen de economische prestaties veralgemeend worden voor de volledige installatie. Het proces zelf wordt als een 'zwarte doos' beschouwd. Er dient enkel rekening gehouden te worden met wat de input en wat de output is van het totale proces. Deze assumptie is voldoende voor de berekeningen in deze masterproef. Op basis van deze veronderstellingen ontwikkelde Caputo et al. (2005) een model waarbij de output berekend kan worden op basis van de input en enkele algemene parameters. Het model is in onderstaande figuur weergegeven. (Caputo, Palumbo, Pelaggage, & Scacchia, 2005)



Figuur 10: Model voor berekening output op basis van input (Caputo, Palumbo, Pelaggage, & Scacchia, 2005)

In deze figuur staat: (Caputo, Palumbo, Pelaggage, & Scacchia, 2005)

- M voor de jaarlijkse input aan biomassa (ton/jaar). Aangezien in deze masterproef pyrolyseolie als input gebruikt wordt, kan dit omgerekend worden op basis van het conversiepercentage (65%) naar een input aan pyrolyseolie per jaar;
- W_{NE} voor de netto elektrische output van de installatie in MW;

- η_e voor de efficiëntie van de energieconversie van de installatie. Deze efficiëntie is afhankelijk van de gebruikte technologie en de grootte van de installatie;
- LHV voor de lage verbrandingswaarde van biomassa/pyrolyseolie. In deze masterproef wordt een waarde van 15.000 kJ/kg gehanteerd voor biomassa en 17.500 kJ/kg voor pyrolyseolie (Indian Office of Energy and Economic Development) (Bridgwater A. , 2011); en
- OH voor het totaal aantal uren dat de installatie actief is (aantal operationele uren). In deze masterproef stellen we deze parameter vast op 7.000 uren per jaar (Voets, Kuppens, Cornelissen, & Thewys, 2011) (Kuppens, 2012).

Het model geeft een direct proportionele relatie weer tussen enerzijds de netto elektrische output en anderzijds de jaarlijkse input aan biomassa, de verbrandingswaarde van biomassa en het energieconversie efficiëntiepercentage. De netto elektrische output is invers proportioneel gerelateerd aan het aantal uren dat de installatie actief is. (Caputo, Palumbo, Pelaggage, & Scacchia, 2005)

Op basis van bovenstaand model ('zwarte doos') kan de capaciteit van de installatie berekend worden voor de Noorderkempen. Uit de eerste berekeningen blijkt dat de grootte van de input relatief laag is in vergelijking met andere installaties in de literatuur, waardoor ook de capaciteit van de centrale vrij laag is (circa 4-5 MW elektrische output). Deze lage capaciteit zal een negatief effect hebben op de efficiëntie van de installatie. Deze wordt op basis van data van COGEN Vlaanderen geschat op 44% (bij een capaciteit van 5 MW). In de sensitiviteitsanalyse zal rekening gehouden worden dat deze parameter slechts bij benadering is. (COGEN Vlaanderen, 2006)

Door het schatten van deze parameter kan de vergelijking van Caputo et al. (2005) ingevuld worden.

$$W_{NE} = \frac{M * \eta_e(W_{NE}) * LHV}{3600 * OH}$$
$$W_{NE} = \frac{21.000 \frac{ton}{jaar} * 0,65 * 0,44 * 17.500 \frac{MJ}{ton}}{3600 * 7.000 \frac{uren}{jaar}} = 4,171 MW$$

In de Noorderkempen wordt een installatie met een outputcapaciteit van 4,17 MW verwacht bij een input van 21.000 ton biomassa per jaar. Deze waarde ligt net onder het interval van 5 tot 20 MW dat verondersteld wordt voor de Noorderkempen in het artikel van Voets et al. (2011). In de sensitiviteitsanalyse zal geen vaste waarde voor de capaciteit aangehouden worden, maar een range van waarden.

Naast de opwekking van elektriciteit, wordt in het model verondersteld in deze masterproef, ook warmte gerecupereerd. De thermische efficiëntie van een installatie die via warmtewisselaars warmte recupereert uit de vergassingsinstallatie bedraagt 36%. (COGEN Vlaanderen, 2006)

Een installatie in de Noorderkempen met een capaciteit van 4,17 MW die opereert met een jaarlijkse input van 21.000 ton biomassa kan op basis van deze gegevens volgende output voorzien:

- Elektriciteit: jaarlijks kan deze installatie 105,109 TJ elektriciteit produceren.

$$4,171 \text{ MW} = 4,171 \frac{\text{MJ}}{\text{s}} * 7000 \frac{\text{uren actief}}{\text{jaar}} * 60 \frac{\text{minuten}}{\text{uur}} * 60 \frac{\text{seconden}}{\text{minuut}} = 105,109 \frac{\text{TJ}}{\text{jaar}} = 29.197 \text{ MWh}$$

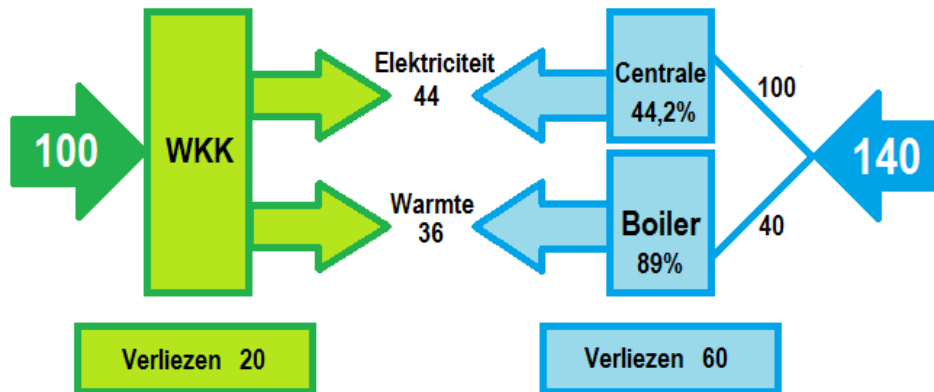
- Warmte: jaarlijks kan deze installatie 86,01 TJ warmte produceren.

$$W_{NE} = \frac{M * \eta_e(W_{NW}) * LHV}{3600 * OH} = \frac{21.000 \frac{\text{ton}}{\text{jaar}} * 0,65 * 0,36 * 17.500 \frac{\text{MJ}}{\text{ton}}}{3600 * 7.000 \frac{\text{uren}}{\text{jaar}}} = 3,413 \text{ MW}$$

met W_{NW} de netto warmte output voor de installatie uitgedrukt in MW (thermische capaciteit van de installatie).

$$3,413 \text{ MW} = 3,413 \frac{\text{MJ}}{\text{s}} * 7000 \frac{\text{uren actief}}{\text{jaar}} * 60 \frac{\text{minuten}}{\text{uur}} * 60 \frac{\text{seconden}}{\text{minuut}} = 86,008 \frac{\text{TJ}}{\text{jaar}} = 23.891 \text{ MWh}$$

De rendementen van een WKK lijken op het eerste zicht erg laag te liggen in vergelijking met een gescheiden opwekking, maar wanneer deze samen bekeken en vergeleken worden in een standaard situatie, is duidelijk te zien dat met een WKK veel grondstoffen bespaard kunnen worden. Onderstaande figuur verduidelijkt dit principe: (Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt, 2012)



Figuur 11: Vergelijking WKK en gescheiden opwekking

De figuur is opgedeeld in twee zijden. Aan de linkerzijde is WKK weergegeven. Als voorbeeld wordt voor de WKK een input gegeven van 100 kWh brandstof (vb. pyrolyseolie). Hiermee kan de WKK 44 kWh elektriciteit en 36 kWh warmte produceren. In het proces zelf gaat dus 20 kWh energie verloren. Aan de rechterzijde staat de 'standardsituatie' van de gescheiden opwekking

weergegeven. Om dezelfde hoeveelheid energie te produceren (36 kWh warmte en 44 kWh elektriciteit) is 140 kWh aan input nodig. De vergelijking toont aan dat een WKK minder brandstof nodig heeft om dezelfde energie op te wekken en dus efficiënter gebruik maakt van deze grondstoffen dan gescheiden opwekking. (Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt, 2012)

2.2.1 INITIËLE INVESTERING

De data in verband met de investering werd overgenomen uit COGEN Vlaanderen en Bridgwater et al. (2002), omdat deze data gedetailleerd beschikbaar is en vaak geciteerd wordt in de literatuur. De aangekochte pyrolyseolie wordt verbrand in een bio-olietmotor. Uiteindelijk wordt de geproduceerde energie afgezet op het net. Deze kosten worden eveneens opgenomen in de berekeningen.

De investering betreft het ontvangen van pyrolyseolie, de opslag van pyrolyseolie, de bio-olietmotor en warmtewisselaars. Daarnaast dient rekening gehouden te worden met de aansluiting op het net voor de afzetting van de opgewekte energie en een installatie voor gasreiniging. (Bridgwater, Toft, & Brammer, 2002) (COGEN Vlaanderen, 2006)

Het investeringsbedrag wordt op basis van Strooband (COGEN Vlaanderen) berekend:

$$Investering \text{ bio} - \text{olietmotor} = \max[(-93,709 * \ln(W_{NE}) + 991,53) * 2; 600] * W_{NE} * 1.000$$

$$Investering \text{ DeNOx} - \text{installatie} = \frac{110.000}{1.500} * W_{NE} * 1,05 * 1.000$$

De investering in een bio-olietmotor (4,171 MW) bedraagt 2.502.600,00 EUR. Dit bedrag wordt verhoogd met 10% om de investering in warmtewisselaars voor de opwekking van warmte te dekken (Voets, Kuppens, Cornelissen, & Thewys, 2011). Daarnaast is er nog de investering in DeNOx (rookgaszuivering) en bedraagt 321.167,00 EUR. Via een DeNOx installatie worden stikstofoxiden via katalysatoren omgezet in stikstof. De installatie is noodzakelijk om te voldoen aan Europese emissienormen. (Kuppens, 2012) (COGEN Vlaanderen, 2006) (Sleco, 2012)

In deze masterproef is er sprake van een ontkoppeld systeem. Het proces van fast pyrolyse voor de productie van pyrolyseolie en de opwekking van energie vinden op een verschillende locatie en een verschillend tijdstip plaats. Dit is een van de voordelen van een bioplex (zie hoofdstuk I). Om de kost van de opslag op middellange termijn van pyrolyseolie (en hulpbrandstoffen) te integreren wordt gebruik gemaakt van volgende formule: (Bridgwater, Toft, & Brammer, 2002)

$$TIK_{opslag} = \left[119 * \left(\frac{M}{OH} \right)^{0,4045} \right] * 1,25 * 1.000$$

De investering van de opslag voorziet een opslag tank en een systeem van pompen en leidingen om de pyrolyseolie te ontvangen en te leveren aan de installatie (Bridgwater, Toft, & Brammer, 2002). De factor 1,25 omvat een verhoging van 25% om de formule van Bridgwater et al. (2002) die uitgedrukt is in EUR voor het jaar 2000 om te rekenen naar een uitkomst die uitgedrukt is in eveneens EUR maar voor het jaar 2011 (**bijlage 1**).

In de aansluiting op het net dient ook geïnvesteerd te worden. De motor die de energie opwekt, verbruikt zelf ook elektriciteit. De bruto geproduceerde elektriciteit wordt verminderd met dit verbruik om de netto elektriciteitsproductie (W_{NE}) te verkrijgen. Deze wordt afgezet op het net. De afzet dient veilig en volgens bepaalde afspraken te gebeuren. De investering betreft elektrische controle-eenheden, beschermingseenheden, omvormers en schakelaars. Deze investering bevat een grote onzekerheid, omdat ze locatie specifiek is. Hiermee wordt in de sensitiviteitsanalyse rekening gehouden. De formule volgens Bridgwater et al. (2002) van de berekening van de investering is:

$$TIK_{aansluiting} = [282 * W_{NE}^{0,537}] * 1,25 * 1.000$$

De totale investering (I) kan op basis van deze gegevens berekend worden door de som te nemen van alle totale investeringskosten.

$$I_{WKK-installatie} = TIK_{bio-olie\ motor} + TIK_{warmtewisselaars} + TIK_{DeNOx\ installatie} + TIK_{opslag} + TIK_{aansluiting}$$

De totale investering op basis van de verschillende assumpties bedraagt 4.027.747,89 EUR. Het is onduidelijk als de kost van de aansluiting op het net reeds vervat zit in de data van COGEN Vlaanderen. Zonder deze investeringen bedraagt de initiële investering 3.268.788,07 EUR.

In het artikel van Thewys en Kuppens (2008) wordt eveneens op basis van COGEN Vlaanderen (2006) en Bridgwater (2002) een formule afgeleid voor de investering in een WKK-installatie. Deze formule is: (Thewys & Kuppens, 2008)

$$I_{WKK-installatie} = 1.126.200 * P_e^{0,7813} + TIK_{opslag} + TIK_{aansluiting}$$

Met $P_e (=W_{NE})$ de elektrische capaciteit van de installatie. De kosten van opslag en aansluiting zijn hier met zekerheid niet inbegrepen. (Kuppens, 2012)

Voor een WKK-installatie bedraagt de investering volgens deze formule 4.390.971,08 EUR. Aangezien er een verschil is met de eigen berekening, wordt gekozen om een gemiddelde waarde voor de investering te nemen. **De investering in een WKK-installatie van 4,171 MW bedraagt 3.895.835,68 EUR.** Deze waarde wordt gekozen als initiële investering. In de sensitiviteitsanalyse wordt gekozen voor een range van waarden.

2.2.2 SUBSIDIES

Deze investering komt in aanmerking voor een investeringsaftrek voor milieuvriendelijke investeringen, maar niet (meer) voor een ecologiepremie. Volgens artikel 17 van het besluit van de Vlaamse Regering van 17 december 2010 kunnen investeringen die kunnen genieten van groenestroomcertificaten of warmtekrachtcertificaten niet meer in aanmerking komen voor een ecologiepremie. (Vlaamse Overheid, 2012)

De investeringsaftrek voor milieuvriendelijke investeringen bedraagt voor het aanslagjaar 2013 (inkomsten 2012) 15,5%. De investeringsaftrek zorgt ervoor dat de belastbare winst verminderd wordt met een deel van de investering. (Vlaams energieagentschap, 2012)

$$U_{inv} = 15,5\% * I * \tau$$

$$U_{inv} = 15,5\% * 3.895.835,68 * 33\%$$

$$U_{inv} = 199.272,00$$

2.2.3 NETTO INITIËLE INVESTERING

De initiële investering bedraagt 3.895.835,68 EUR en de investeringsaftrek bedraagt 199.272,00 EUR.

$$I_0 = 3.895.835,68 \text{ EUR} - 199.272,00 \text{ EUR}$$

$$I_0 = 3.696.563,68 \text{ EUR}$$

De netto initiële investering bedraagt uiteindelijk 3.696.563,69 EUR.

2.3 INKOMSTEN

De opbrengsten van de installatie bestaan uit slechts drie delen. Een eerste deel bevat de inkomsten die ontvangen worden bij de verkoop van de elektriciteit. Een tweede deel bevat de inkomsten die ontvangen worden bij de verkoop van warmte. Het derde deel omvat de verkregen exploitatiesubsidies. (Kuppens & Thewys, 2009)

De opgewekte **elektriciteit** wordt afgezet op het transmissie- of distributienet. De verkoopprijs van elektriciteit bedraagt 50,00 EUR/MWh. In deze masterproef wordt verondersteld dat de opgewekte elektriciteit volledig kan worden afgezet op het net. (Voets, Kuppens, Cornelissen, & Thewys, 2011)

De opgewekte **warmte** wordt verkocht op de markt (aan nabije ondernemingen en gebouwen/woningen). De verkoopprijs van warmte bedraagt 20 EUR/MWh (Voets, Kuppens, Cornelissen, & Thewys, 2011). Op basis van het artikel van Voets et al. (2011) wordt afgeleid dat minstens 50% van de opgewekte warmte moet verkocht kunnen worden om een winstgevende installatie te kunnen bouwen. In deze masterproef wordt verondersteld dat de verkoop van warmte schommelt tussen deze 50% en 100%.

De **exploitatiesubsidies** omvatten de certificaten voor warmtekrachtkoppeling en groenestroomcertificaten.

De Vlaamse Overheid legt verschillende voorwaarden op voor het verkrijgen van **warmtekrachtcertificaten**. Deze zijn: (Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt, 2012)

- De installatie in dienst is genomen na 1 januari 2002;
- De installatie gelegen is in het Vlaamse Gewest;
- De installatie kwalitatief is. Dit duidt op een relatieve primaire energiebesparing (RPE) die groter is dan 0,1 (voor een installatie met een capaciteit groter dan 1 MW);
- De installatie voldoende gekeurd is; en
- De installatie voorzien is van de nodige meetapparatuur.

Er wordt van uitgegaan dat al deze voorwaarden vervuld zijn. Dat de installatie kwalitatief is, kan worden nagerekend op basis van volgende formule: (Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt, 2012)

$$RPE = 1 - \frac{1}{\frac{\alpha_E}{refE\eta} + \frac{\alpha_W}{refW\eta}} = 1 - \frac{1}{\frac{44}{44,2} + \frac{36}{89}} = 0,2857 > 0,1$$

De RPE geeft aan hoeveel energie er precies bespaard wordt door te kiezen voor een warmtekrachtkoppeling installatie in plaats van een installatie die elektriciteit en warmte apart opwekken. Het elektrisch en thermisch referentierendement is vastgelegd bij Ministerieel besluit en bedraagt voor biobrandstoffen (vloeibaar) respectievelijk 44,2% en 89%. De waarde van RPE bedraagt 0,2857. De installatie is dus kwalitatief.

Aangezien het beleid van de Vlaamse Overheid de nadruk legt op steeds nieuwe technologieën is de aanvaarding van certificaten degressief in de tijd. Het aantal certificaten dat verkregen wordt neemt af met de levensduur van de installatie (het verouderen van de installatie). Tijdens de eerste vier levensjaren van de installatie krijgen alle warmtekrachtcertificaten de vermelding 'aanvaardbaar'. Deze vermelding geeft aan dat het certificaat verhandelbaar is. Na het vierde levensjaar zal slecht een bepaalde fractie nog de vermelding 'aanvaardbaar' krijgen. De installatie is vanaf dan in haar degressiviteitsperiode. Volgende formule geeft aan hoeveel

warmtekrachtcertificaten (fractie) nog de vermelding 'aanvaardbaar' krijgen: (Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt, 2012)

$$X = 100 * \frac{RPE - 0,2 * (T - 48)}{RPE}$$

met:

- X: het aandeel (in %) van het totaal aantal verkregen certificaten dat de vermelding 'aanvaardbaar' heeft; en
- T: het aantal maanden dat de installatie actief is.

De minimumsteun voor de certificaten voor warmtekrachtkoppeling bedraagt 31,00 EUR per certificaat (voor installaties in gebruik na 1 januari 2012) en is gegarandeerd gedurende de eerste 10 jaren. Naast de gegarandeerde minimumsteun bestaat ook nog een marktwerking. Hierbij worden de certificaten verhandeld op de markt aan een prijs bepaald door vraag en aanbod. De gemiddelde marktwaarde per maand van de afgelopen 12 maanden is weergegeven in onderstaande tabel. (Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt, 2012)

Tabel 6: Gemiddelde maandprijs van een warmtekrachtcertificaat in het afgelopen jaar (Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt, 2012)

Periode	Gemiddelde maandprijs van een warmtekrachtcertificaat (in EUR)
Februari 2012	34,11
Januari 2012	33,40
December 2011	30,91
November 2011	32,31
Oktober 2011	33,77
September 2011	31,40
Augustus 2011	36,88
Juli 2011	36,00
Juni 2011	35,30
Mei 2011	36,69
April 2011	36,22
Maart 2011	34,05

De gemiddelde maandprijs van een warmtekrachtcertificaat tussen maart 2011 en februari 2012 is 34,25 EUR. In de berekening van de NCW van de investering wordt de opbrengst per certificaat bepaald door de minimumprijs. In de sensitiviteitsanalyse wordt wel rekening gehouden met de marktwaarde van een warmtekrachtcertificaat voor de berekening van de baten.

Een warmtekrachtcertificaat wordt ontvangen per 1.000 kWh primaire energiebesparing door de productie van elektriciteit en warmte in een kwalitatieve warmtekrachtinstallatie. Het aantal certificaten voor warmtekrachtkoppeling wordt berekend op basis van volgende formule: (Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt, 2012)

$$WKB = F_E + F_Q - F = \frac{E_{netto}}{\eta_E} + \frac{Q_{netto}}{\eta_Q} - F$$

Met:

- WKB: warmtekrachtbesparing;
- F_E : brandstof die bij gescheiden opwekking gebruikt zou worden om evenveel elektriciteit als de WKK op te wekken;
- F_Q : brandstof die bij gescheiden opwekking gebruikt zou worden om evenveel warmte op te wekken;
- F : brandstof die de WKK zelf verbruikt in deze maand;
- E_{netto} : de elektrische energie die de WKK netto produceert;
- Q_{netto} : de warmte die de WKK netto produceert;
- η_E : rendement voor gescheiden opwekking van elektriciteit; en
- η_Q : rendement voor gescheiden opwekking van warmte.

De rendementen van gescheiden opwekking zijn vastgelegd in het Vlaams Energiebesluit. De Vlaamse referentierendementen die toepasbaar zijn op deze case zijn voor de elektriciteitsproductie 'vloeibare biobrandstof' (42,7%) en voor de warmteproductie 'heet water' (90%). (Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt, 2012)

$$WKB = \frac{4,17 \text{ MW}}{0,427} + \frac{3,41 \text{ MW}}{0,90} - \frac{13.650 \frac{\text{ton}}{\text{jaar}} * 17.500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3600 * 7000 \frac{\text{uren}}{\text{jaar}}} = 4,08 \text{ MW}$$

De formule levert een WKB op van 4,08 MW.

De tweede exploitatiesubsidie zijn de **groenestroomcertificaten**. Deze worden verkregen per 1.000 kWh opgewekte groene stroom. Ze kunnen net zoals groenestroomcertificaten verkocht worden op de markt tegen een marktprijs of aan de distributienetbeheerder tegen de minimumprijs. (Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt, 2012)

De minimumsteun voor een groenestroomcertificaat bedraagt voor een technologie op basis van biomassa 90,00 EUR en is eveneens gegarandeerd voor 10 jaar. Onderstaande tabel bevat de gemiddelde maandprijs van een groenestroomcertificaat van het afgelopen jaar.

Tabel 7: Gemiddelde maandprijs van een groenestroomcertificaat van het afgelopen jaar (Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt, 2012)

Periode	Gemiddelde maandprijs van een groenestroomcertificaat⁸ (in EUR)
Februari 2012	101,46
Januari 2012	104,25
December 2011	101,08
November 2011	97,57
Oktober 2011	96,87
September 2011	103,33
Augustus 2011	103,92
Juli 2011	103,98
Juni 2011	104,52
Mei 2011	104,86
April 2011	103,12
Maart 2011	104,20

De gemiddelde maandprijs van een groenestroomcertificaat tussen maart 2011 en februari 2012 is 102,43 EUR. In de berekening van de NCW van de investering wordt de opbrengst per certificaat bepaald door de minimumprijs. In de sensitiviteitsanalyse wordt bij de berekening van de baten wel rekening gehouden met de marktwaarde van een groenestroomcertificaat.

2.4 UITGAVEN

Naast de inkomsten zijn er ook uitgaven. De kosten zijn noodzakelijk om de installatie draaiende te houden. Ze kunnen opgedeeld worden in twee groepen. Enerzijds zijn er de kosten die onafhankelijk zijn van de productiehoeveelheid (vaste kosten) en anderzijds zijn er de kosten die afhangen van de hoeveelheid geproduceerde energie (variabele kosten).

2.4.1 VASTE KOSTEN

De vaste kosten bestaan uit:

- De onderhouds- en uitbatingskosten; en
- De interestaflossingen.

⁸ Voor verhandelde groenestroomcertificaten met garantie van oorsprong. Er wordt verondersteld dat de opgewekte elektriciteit wordt afgezet op het transmissie- of distributienet, waardoor de verkregen certificaten deze garantie van oorsprong hebben.

De onderhouds- en uitbatingskosten worden aan de hand van twee bronnen bepaald. De onderhouds- en uitbatingskosten bepaald door COGEN Vlaanderen (2006) hebben betrekking op de bio-olietmotor en de DeNOx installatie en zijn afhankelijk van de capaciteit van de installatie. Op basis van data van COGEN Vlaanderen (2006) wordt deze vastgelegd door volgende formule:

$$\text{Onderhouds – en uitbatingskosten (per MWh)} = 84,9511 * (W_{NE} * 1.000)^{-0,1544} + 26,209 * (W_{NE} * 1.000)^{-0,1112}$$

In totaal bedragen de onderhouds- en uitbatingskosten van de volledige installatie (4,17 MW) 33,83 EUR per MWh. Op basis van deze berekening bedragen de jaarlijkse onderhouds- en uitbatingskosten 987.575,35 EUR (= *methode 1*).

Een tweede methode wordt gehanteerd om de onderhouds- en uitbatingskosten te bepalen. Deze methode is gebaseerd op het artikel van Thewys en Kuppens (2008). Onderhoudsmaterialen, verzekeringen en overhead kosten worden geschat op respectievelijk 3%, 2% en 2% van de kapitaalkosten. De arbeidskosten worden bepaald door volgende vergelijking:

$$\text{Arbeidskost} = \omega * 3 * 0,4847 * W_{NE}^{0,483}$$

Met:

- ω : de jaarlijkse kost van arbeid per werknemer: 54.522,95 EUR (Voets, Kuppens, Cornelissen, & Thewys, 2011)

Op basis van deze vier componenten zijn de vaste kosten gelijk aan: (=methode 2)

$$\text{Vaste kosten} = [(0,03 + 0,02 + 0,02) * I] + [54.522,95 \text{ EUR} * 3 * 0,4847 * W_{NE}^{0,483}] = 430.739,12 \frac{\text{EUR}}{\text{jaar}}$$

Het verschil tussen beide bronnen levert een verschillend resultaat op. Er wordt gekozen om een gemiddelde te nemen om zo tot onderhouds- en uitbatingskosten per jaar te komen. De gemiddelde onderhouds- en uitbatingskosten bedragen per jaar 709.157,23 EUR.

De betaling van de investering in jaar 0 wordt verondersteld gefinancierd te worden door een lening met vaste terugbetaling. Hierdoor is er een steeds toenemende kapitaalaflossing en afnemende interestaflossing. De jaarlijkse interestvoet wordt vastgelegd op 4,60% en het geleende bedrag is gelijk aan de netto initiële investering. (Thewys & Kuppens, 2008)

Maandelijks wordt een vast bedrag afgelost om de lening terug te betalen. Hierbij hoort een kapitaalaflossing en een interestaflossing. Het te investeren bedrag wordt volledig geleend tegen een vaste rentevoet van 4,60% (maandelijkse rentevoet: 0,3833%) en in 240 schijven afgelost⁹. De maandelijkse equivalente kasstroom wordt op basis van onderstaande formule bepaald: (Mercken, 2004)

⁹ De terugbetalingstermijn wordt gelijk gesteld aan de levensduur van de installatie (20 jaar of 240 maanden).

$$\text{maandelijkse equivalente kasstroom} = \frac{I_0}{a_{n-r}} = \frac{I_0}{\frac{1 - (1+r)^{-n}}{r}}$$

$$\text{maandelijkse equivalente kasstroom} = \frac{3.696.563,69 \text{ EUR}}{\frac{1 - (1 + 0,003833)^{-240}}{0,003833}}$$

$$\text{maandelijkse equivalente kasstroom} = 23.586,30 \text{ EUR}$$

In jaar 1 dient er 167.628,94 EUR aan rente afgelost te worden. Terwijl in jaar 20 dit nog slechts 6.927,94 EUR. Onderstaande tabel bevat de verschillende componenten van de lening. Enkel de eerste maanden en de laatste maand zijn weergegeven.

Tabel 8: Componenten lening (alle bedragen in EUR)

Jaar	Maand	Te betalen	Kapitaal	Rente	Rest kapitaal
0	0				3.696.563,69
1	1	23.586,30	9.416,13	14.170,16	3.687.147,56
1	2	23.586,30	9.452,23	14.134,07	3.677.695,33
1	3	23.586,30	9.488,46	14.097,83	3.668.206,86
1	4	23.586,30	9.524,84	14.061,46	3.658.682,03
1	5	23.586,30	9.561,35	14.024,95	3.649.120,68
1	6	23.586,30	9.598,00	13.988,30	3.639.522,68
1	7	23.586,30	9.634,79	13.951,50	3.629.887,89
1	8	23.586,30	9.671,73	13.914,57	3.620.216,16
1	9	23.586,30	9.708,80	13.877,50	3.610.507,36
1	10	23.586,30	9.746,02	13.840,28	3.600.761,34
1	11	23.586,30	9.783,38	13.802,92	3.590.977,97
1	12	23.586,30	9.820,88	13.765,42	3.581.157,09
2	13	23.586,30	9.858,53	13.727,77	3.571.298,56
2	14	23.586,30	9.896,32	13.689,98	3.561.402,24
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20	240	23.586,30	23.496,23	90,07	0,00

2.4.2 VARIABELE KOSTEN

De variabele kosten bevatten enkel de aankoop van pyrolyseolie. Pyrolyseolie wordt in deze masterproef verondersteld aangekocht te worden aan een aankoopprijs van 259,32 EUR per ton. Jaarlijks wordt er 21.000 ton biomassa of 13.650 ton pyrolyseolie aangevoerd (in de sensitiviteitsanalyse wordt een range verondersteld voor de jaarlijkse toevoer). Deze variabele kost is de grootste kost van de netto contante waarde berekening. Over de aankoopprijs van pyrolyseolie wordt in het deel over de waarde van pyrolyseolie nog dieper ingegaan.

2.5 NETTO CONTANTE WAARDE (NCW)

Op basis van de informatie over de investering, inkomsten en uitgaven kan de netto contante waardeberekening uitgevoerd worden. De netto contante waarde (NCW) geeft de huidige waarde weer van de kasstromen die door de investering gegenereerd worden. De kasstromen worden verdisconteerd tegen het vereist rendement naar het jaar van de investering (jaar 0). Door de som van deze bedragen te verminderen met de investering wordt de netto contante waarde bekomen. Indien de NCW negatief is, wordt het project verworpen. Indien de NCW positief is, wordt het project aanvaard. (Mercken, 2004)

De voordelen van deze methode zijn dat: (Mercken, 2004)

- Er rekening wordt gehouden met de tijdswaarde van het geld;
- Alle relevante kasstromen in rekening gebracht kunnen worden;
- Het een eenvoudige beslissingregel heeft;
- De verwachte toename van de waarde van de onderneming wordt gegeven in actuele monetaire termen; en
- Er gewerkt kan worden met een risicoafhankelijk vereist rendement.

Er zijn ook echter nadelen aan deze methode. Deze zijn: (Mercken, 2004)

- Dat er geen link is met de liquiditeit;
- Dat de kapitaalkost gekend zou moeten zijn; en
- Dat het verband met het risico enkel verloopt via de rendementseis.

De netto contante waarde van de investering kan berekend worden op basis van volgende formule: (Kuppens, 2010)

$$NCW = \sum_{n=1}^N \frac{CF_n}{(1+i)^n} - I_0$$

De levensduur (N) van deze toepassing is 20 jaar (Voets, Kuppens, Cornelissen, & Thewys, 2011). De discontovoet (i) bedraagt 10%. De jaarlijkse kasstromen bestaan uit twee componenten. Enerzijds zijn er de jaarlijkse uitgaven en anderzijds zijn er de jaarlijkse inkomsten. De jaarlijkse cashflow wordt op basis van volgende formule berekend:

$$CF_n = (1 - \tau) * (\text{inkomende kasstromen} - \text{uitgaande kasstromen}) + (\tau * D_n)$$

met:

- τ : vennootschapsbelasting (aangenomen wordt dat deze 33% bedraagt);
- D_n : jaarlijkse afschrijving; en
- $(\tau * D_n)$: belastingsschild.

De berekening van de netto contante waarde van de investering in een WKK-installatie in de Noorderkempen wordt hieronder in besproken. De berekeningswijze is hierboven reeds in detail besproken. De netto initiële investering bedraagt 3.696.563,69 EUR en wordt uitgevoerd in jaar 0. De inkomsten ontstaan uit de verkoop van elektriciteit, groenestroomcertificaten (GSC), warmte en WKK-certificaten. Naast de verkoop van WKK-certificaten is de fractie vermeld van het aantal certificaten dat het label 'aanvaardbaar' krijgt. De uitgaven bestaan uit de aankoop van pyrolyseolie, de interestaflossing en de onderhoud- en uitbatingskosten.

Tabel 9: NCW berekening van investering in een WKK-installatie (warmteopbrengst 100%) (alle bedragen in EUR)

Jaar	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
Inkomsten	5.450.582,99	5.450.582,99	5.450.582,99	5.450.582,99	5.410.294,35
Verkoop elektriciteit	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67
Verkoop groenestroomcertificaten	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00
Verkoop warmte	477.750,00	477.750,00	477.750,00	477.750,00	477.750,00
Verkoop WKK-certificaten	885.416,33	885.416,33	885.416,33	885.416,33	845.127,69
Waarde WKK-certificaten	885.416,33	885.416,33	885.416,33	885.416,33	885.416,33
Jaarlijks gemiddeld aandeel 'aanvaardbaar'	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95
Uitgaven	4.416.504,18	4.411.082,11	4.405.405,29	4.399.461,77	4.393.239,01
Variabele kosten	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00
Aankoopkost pyrolyseolie	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00
Vaste kosten	876.786,18	871.364,11	865.687,29	859.743,77	853.521,01
Onderhoud- en uitbatingskosten	709.157,23	709.157,23	709.157,23	709.157,23	709.157,23
Interestaflossing	167.628,94	162.206,87	156.530,06	150.586,54	144.363,77
Cashflow (inkomsten - uitgaven)	1.034.078,81	1.039.500,89	1.045.177,70	1.051.121,22	1.017.055,35
Belastingen ($\tau = 0,33$)	341.246,01	343.035,29	344.908,64	346.870,00	335.628,26
Belastingsschild	64.281,29	64.281,29	64.281,29	64.281,29	64.281,29
Cashflow verdisconteerd	688.285,54	628.716,43	574.417,99	524.918,04	463.026,23

Jaar	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00
Inkomsten	5.335.915,33	5.261.536,31	5.187.157,29	5.112.778,26	5.038.399,24
Verkoop elektriciteit	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67
Verkoop groenestroomcertificaten	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00
Verkoop warmte	477.750,00	477.750,00	477.750,00	477.750,00	477.750,00
Verkoop WKK-certificaten	770.748,66	696.369,64	621.990,62	547.611,60	473.232,57
<i>Waarde WKK-certificaten</i>	<i>885.416,33</i>	<i>885.416,33</i>	<i>885.416,33</i>	<i>885.416,33</i>	<i>885.416,33</i>
<i>Jaarlijks gemiddeld aandeel 'aanvaardbaar'</i>	<i>0,87</i>	<i>0,79</i>	<i>0,70</i>	<i>0,62</i>	<i>0,53</i>
Uitgaven	4.386.723,88	4.379.902,66	4.372.760,97	4.365.283,74	4.357.455,21
Variabele kosten	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00
<i>Aankoopkost pyrolyseolie</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>
Vaste kosten	847.005,88	840.184,66	833.042,97	825.565,74	817.737,21
<i>Onderhoud- en uitbatingkosten</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>
<i>Interestaflossing</i>	<i>137.848,65</i>	<i>131.027,43</i>	<i>123.885,73</i>	<i>116.408,50</i>	<i>108.579,98</i>
Cashflow (inkomsten - uitgaven)	949.191,45	881.633,64	814.396,32	747.494,52	680.944,03
Belastingen ($\tau = 0,33$)	313.233,18	290.939,10	268.750,78	246.673,19	224.711,53
Belastingsschild	64.281,29	64.281,29	64.281,29	64.281,29	64.281,29
Cashflow verdisconteerd (CF_n)	395.266,98	336.106,16	284.535,36	239.658,68	200.680,60
Jaar	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00
Inkomsten	4.964.020,22	4.889.641,19	4.815.262,17	4.740.883,15	4.666.504,12
Verkoop elektriciteit	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67
Verkoop groenestroomcertificaten	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00
Verkoop warmte	477.750,00	477.750,00	477.750,00	477.750,00	477.750,00
Verkoop WKK-certificaten	398.853,55	324.474,53	250.095,50	175.716,48	101.337,46
<i>Waarde WKK-certificaten</i>	<i>885.416,33</i>	<i>885.416,33</i>	<i>885.416,33</i>	<i>885.416,33</i>	<i>885.416,33</i>
<i>Jaarlijks gemiddeld aandeel 'aanvaardbaar'</i>	<i>0,45</i>	<i>0,37</i>	<i>0,28</i>	<i>0,20</i>	<i>0,11</i>
Uitgaven	4.349.258,88	4.340.677,47	4.331.692,88	4.322.286,18	4.312.437,52
Variabele kosten	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00
<i>Aankoopkost pyrolyseolie</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>
Vaste kosten	809.540,88	800.959,47	791.974,88	782.568,18	772.719,52
<i>Onderhoud- en uitbatingkosten</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>
<i>Interestaflossing</i>	<i>100.383,65</i>	<i>91.802,23</i>	<i>82.817,65</i>	<i>73.410,94</i>	<i>63.562,29</i>
Cashflow (inkomsten - uitgaven)	614.761,34	548.963,72	483.569,29	418.596,97	354.066,60
Belastingen ($\tau = 0,33$)	202.871,24	181.158,03	159.577,87	138.137,00	116.841,98
Belastingsschild	64.281,29	64.281,29	64.281,29	64.281,29	64.281,29
Cashflow verdisconteerd (CF_n)	166.895,17	137.676,23	112.468,77	90.781,15	72.178,12

Jaar	16,00	17,00	18,00	19,00	20,00
Inkomsten	4.592.719,43	4.565.166,67	4.565.166,67	4.565.166,67	4.565.166,67
Verkoop elektriciteit	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67
Verkoop groenestroomcertificaten	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00
Verkoop warmte	477.750,00	477.750,00	477.750,00	477.750,00	477.750,00
Verkoop WKK-certificaten	27.552,76	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Waarde WKK-certificaten</i>	<i>885.416,33</i>	<i>885.416,33</i>	<i>885.416,33</i>	<i>885.416,33</i>	<i>885.416,33</i>
<i>Jaarlijks gemiddeld aandeel 'aanvaardbaar'</i>	<i>0,03</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
Uitgaven	4.302.126,16	4.291.330,34	4.280.027,31	4.268.193,24	4.255.803,17
Variabele kosten	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00
<i>Aankoopkost pyrolyseolie</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>
Vaste kosten	762.408,16	751.612,34	740.309,31	728.475,24	716.085,17
<i>Onderhoud- en uitbatingskosten</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>
<i>Interestaflossing</i>	<i>53.250,92</i>	<i>42.455,11</i>	<i>31.152,07</i>	<i>19.318,00</i>	<i>6.927,94</i>
Cashflow (inkomsten - uitgaven)	290.593,27	273.836,33	285.139,36	296.973,43	309.363,50
Belastingen ($\tau = 0,33$)	95.895,78	90.365,99	94.095,99	98.001,23	102.089,95
Belastingsschild	64.281,29	64.281,29	64.281,29	64.281,29	64.281,29
Cashflow verdisconteerd (CF_n)	56.361,33	49.016,34	45.922,38	43.044,05	40.364,90

De som van de verdisconteerde cashflows van jaar 1 tot en met jaar 20 bedraagt 5.150.320,44 EUR. Om de netto contante waarde van de investering te kennen, dient dit bedrag verminderd te worden met de netto initiële investering.

Het resultaat van de investering is een netto contante waarde van 1.453.756,76 EUR. Het resultaat is ruim positief. Dit geeft aan dat de waarde van pyrolyseolie minstens 259,32 EUR kan bedragen, rekening houdende met een NCW die positief moet blijven. Uiteraard klopt deze berekening pas als alle waarden met 100% zekerheid de werkelijke waarde vertegenwoordigen. Dit is niet het geval. De verkoop van warmte is bijvoorbeeld niet volledig gegarandeerd. Indien in totaal slechts 50% van de opgewekte warmte verkocht kan worden, daalt de verkoop aan warmte en de verkoop aan WKK-certificaten. De investering zou in dit geval slechts een netto contante waarde van - 1.534.082,83 EUR hebben. Deze daling in de verkoop van warmte geeft een grote daling in de NCW teweegbrengt, zo groot dat de waarde van de netto contante waarde kleiner is dan nul. De berekening is weergegeven in **bijlage 5**.

Deze berekening en de berekening in bijlage 5 maken duidelijk dat de wijziging van een parameter veel invloed kan hebben op de netto contante waarde van deze investering. Al dient vermeld te worden dat hier twee uitersten met elkaar vergeleken worden. Terwijl de jaarlijkse uitgaven constant blijven, dalen de jaarlijkse inkomsten sterk.

Aangezien deze 100% zekerheid niet gegarandeerd is en deze masterproef op zoek gaat naar de maximale waarde van pyrolyseolie bij 95% zekerheid dat de $NCW \geq 0$ is, is een verdere analyse noodzakelijk. Eerst wordt een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd om een beter beeld te krijgen welke de invloed is van deze onzekerheid. Vervolgens wordt op basis van deze analyse de maximale waarde van pyrolyseolie bepaald.

2.6 SENSITIVITEITSANALYSE

In de vorige netto contante waardeberekening zijn de waarden van de parameters gebaseerd op een literatuurstudie en veronderstellingen. Deze veronderstellingen en het overnemen van data uit literatuur gebeurt uiteraard op basis van een kritische analyse. Hierdoor zal de bekomen waarde voor de maximale aankoop prijs van pyrolyseolie een indicatie geven voor de werkelijke maximale aankoop prijs.

Door de verschillende parameters te laten fluctueren binnen een range van waarden, neemt de betrouwbaarheid van het resultaat toe. Op basis van deze eerder algemene berekening loont het enkel de moeite om de meer algemene parameters (deze met belang) te laten fluctueren. Onderstaande tabel laat de belangrijkste parameters zien met de initieel gekozen waarde, de rationele range van mogelijke waarden en de verdeling van deze range. De verklaring van de verdelingen wordt onder de tabel verduidelijkt.

Tabel 10: Sensitieve parameters van WKK installatie

Parameter	Initiële waarde	Range	Verdeling
Capaciteit			
Aanvoer biomassa	21.000 ton/jaar	21.000-57.600 ton/jaar	Triangulair
Conversiepercentage fast pyrolyse	65%	60-70%	Uniform
Conversiepercentage (elektrisch)	44%	40-45%	Triangulair
Conversiepercentage (thermisch)	36%	35-40%	Triangulair
Baten			
Verkoop prijs elektriciteit	50,00 EUR/MWh	-25%; +25%	Triangulair
Verkoop prijs warmte	20,00 EUR/MWh	-25%; +25%	Triangulair
Marktprijs warmtekrachtcertificaten	90,00 EUR/MWh	90,00-104,86 EUR/MWh	Triangulair
Marktprijs WKK-certificaten	31,00 EUR/MWh	31,00-36,88 EUR/MWh	Triangulair
Verkoop warmte/WKK-certificaten	100% (ook 50%)	50-100%	Uniform
Uitgaven			
Onderhouds- en uitbatingskosten bio-oillemotor	33,83 EUR/MWh	-10%; +25%	Triangulair
Netto contante waarde berekening			
Discontovoet	10%	6%-15%	Uniform

De jaarlijkse aanvoer van biomassa werd initieel vastgelegd op 21.000 ton per jaar (Kuppens, 2012). Deze waarde wordt ook als minimale en gemiddelde waarde aangehouden in een triangulaire verdeling¹⁰, omdat de initiële waarde het meest waarschijnlijk is in de Noorderkempen. De maximale waarde van de triangulaire verdeling bedraagt 57.600 ton per jaar (Kuppens & Thewys, 2009). Het vergroten van de aanvoer van biomassa kan door de totale oppervlakte van biomassa teelt te vergroten of door andere inputstromen te zoeken (vb. bermmaaisels).

Het conversiepercentage van fast pyrolyseolie geeft aan hoeveel ton pyrolyseolie er per ton input biomassa geproduceerd kan worden. Dit percentage schommelt tussen 60% en 70% (Kuppens & Thewys, 2009). Een uniforme verdeling weerspiegelt de grote onzekerheid over het conversiepercentage.

De efficiëntie van de bio-olieturbine geeft aan hoeveel elektriciteit en warmte er geproduceerd kan worden per hoeveelheid input. De ranges zijn bepaald op basis van data van COGEN Vlaanderen (2006). Een triangulaire waarde met de initiële waarde als gemiddelde geeft de verdeling weer van beide rendementen. Een triangulaire verdeling is het meest aangewezen, aangezien de beschikbare data specifiek verwijst naar een bio-olieturbine.

De sensitiviteit van de investeringsbedragen wordt reeds weergegeven door schommelingen in de capaciteit. Aangezien de capaciteit afhankelijk is van de aanvoer van pyrolyseolie (afhankelijk van de aanvoer aan biomassa en het conversiepercentage) en het elektrisch conversiepercentage, is er reeds een ruime range van waarden mogelijk.

De verkoopprijs van warmte en elektriciteit is eveneens onzeker. De initiële waarden van respectievelijk 20 EUR/MWh en 50 EUR/MWh worden in de sensitiviteitsanalyse weergegeven door een triangulaire verdeling met een gemiddelde gelijk aan de initiële waarde en een minimum en maximum dat respectievelijk 25% lager en 25% hoger ligt dan de initiële waarde. Er wordt voor deze ruime range gekozen, omdat de initiële waarde slechts in enkele bronnen kon terug gevonden worden.

De marktwaarde van groenestroomcertificaten en WKK-certificaten krijgen initieel de minimale verkoopprijs opgelegd. In werkelijkheid kunnen de certificaten verhandeld worden op een markt waar de waarde hoger ligt dan de minimumsteun gegarandeerd door de overheid. De marktwaarde van beide certificaten wordt weergegeven door een triangulaire waarde met als minimum de gegarandeerde minimumsteun, als gemiddelde de gemiddelde waarde van het certificaat van het afgelopen jaar (tussen maart 2011 en februari 2012) en als maximum de maximale waarde van het certificaat van het afgelopen jaar. De gemiddelde waarde en maximale waarde van een groenestroomcertificaat bedraagt respectievelijk 102,43 EUR/MWh en 104,86 EUR/MWh. De gemiddelde waarde en maximale waarde van een WKK-certificaat bedraagt respectievelijk 34,25 EUR/MWh en 36,88 EUR/MWh.

¹⁰ In **bijlage 6** wordt een voorbeeld gegeven van een triangulaire en uniforme verdeling.

De verkoop van warmte wordt geschat tussen de 50% en 100%. Een uniforme verdeling geeft deze schatting weer in de sensitiviteitsanalyse. De verkoop van WKK-certificaten krijgt dezelfde verdeling opgelegd. Deze verdeling komt sterk overeen met de werkelijke verdeling, maar is eenvoudiger weer te geven in formulevorm.

De volgende sensitieve parameter is de jaarlijkse vaste kost van het onderhoud en de uitbating van de bio-olietor. Deze wordt in de sensitiviteitsanalyse weergegeven door een triangulaire verdeling met als gemiddelde de initiële waarde en als minimum en maximum deze waarde respectievelijk verlaagd met 10% en verhoogd met 25%. De reden voor een niet-symmetrische verdeling is dat de onzekere eigenschappen van pyrolyseolie voor extra (onverwachte) kosten kunnen zorgen.

De laatste sensitieve parameter is de discontovoet. Deze schommelt uniform tussen 6% en 15%. Deze sensitiviteit is overgenomen uit Tijmensens et al. (2002).

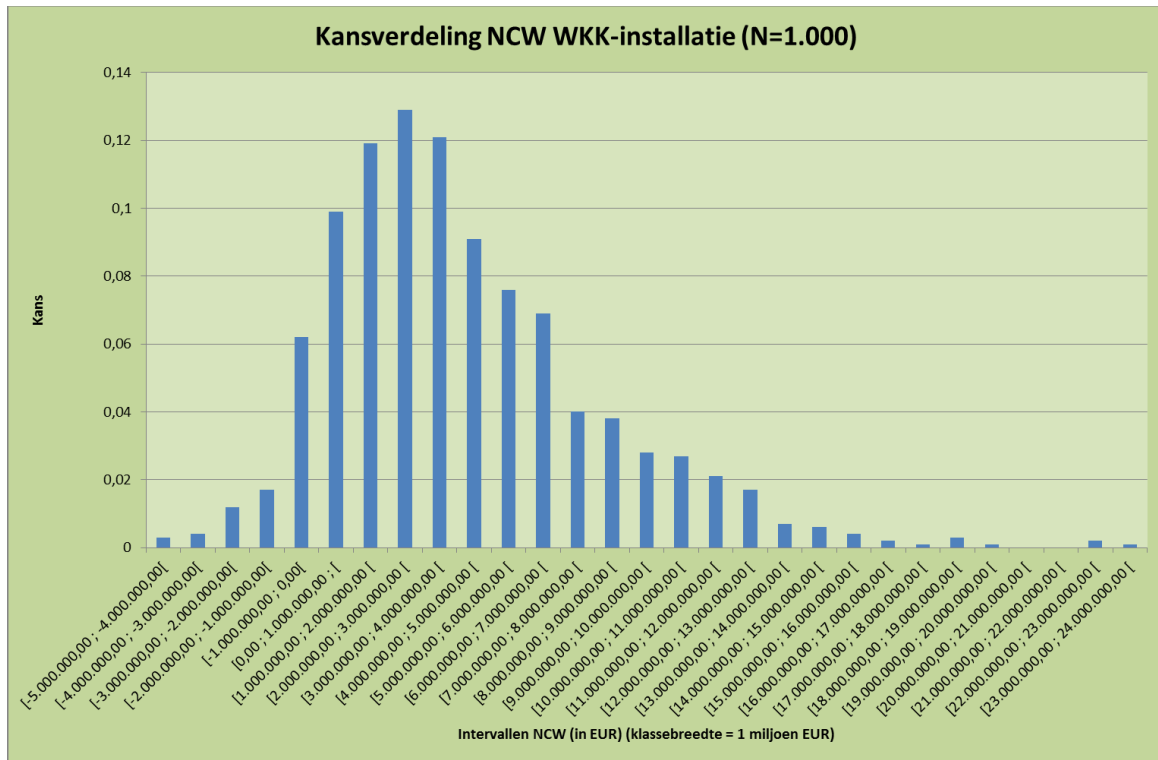
De andere parameters fluctueren op basis van fluctuaties van bovenstaande parameters. De waarde van volgende inputparameters wordt constant verondersteld:

- Aantal uren dat de installatie actief is (7.000 uren), omdat de capaciteit van de installatie verandert door een veranderende toevoer aan biomassa, is het onnodig om het aantal uren nog eens te laten variëren;
- De interestaftrek (15,5%), omdat dit een constante is opgelegd door de Vlaamse Overheid;
- Het belastingpercentage (33%), omdat de vennootschapsbelasting constant is;
- De levensduur van de installatie (20 jaren); en
- Het interestpercentage (4,60%), wegens moeilijke berekening is er enkel een fluctuatie toegevoegd aan de jaarlijkse interestaflossing.

Op basis van deze informatie wordt een sensitiviteitsanalyse (Monte Carlo simulatie) uitgevoerd. Deze analyse omvat 1.000 simulaties waarbij per simulatie de verschillende parameters een realistische waarde representeren. Op basis van deze waarden wordt de netto contante waarden berekend. De realistische waarden zijn gekozen op basis van de verschillende verdelingen. De simulaties zijn berekend via Excel. Per parameter wordt een willekeurige waarde bepaald aan de hand van de opgelegde verdeling. Een waarde uit een uniforme verdeling kan op basis van de functie ASELECT.TUSSEN gekozen worden. Een waarde uit een triangulaire verdeling wordt gekozen op basis van een willekeurige waarde p tussen 0 en 1 (via de functie ASELECT) en een formule in Excel¹¹.

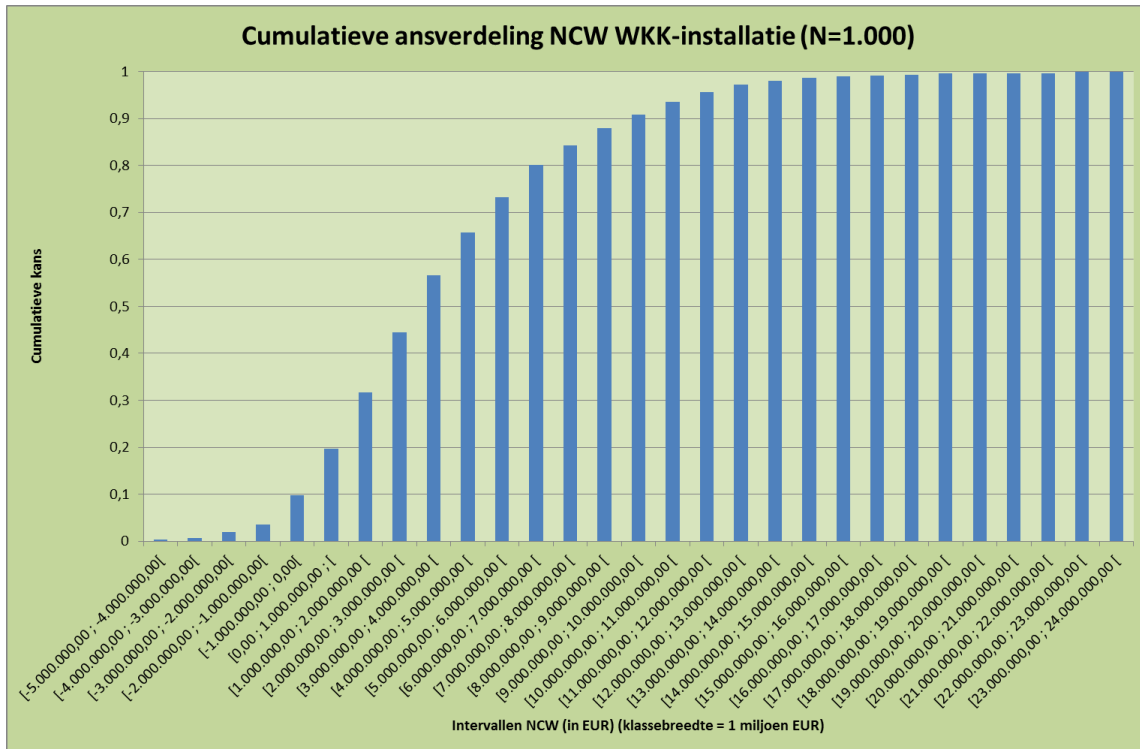
¹¹ =ALS((p<=(gemiddelde waarde - minimale waarde)/(maximale waarde - minimale waarde)); minimale waarde + wortel (p*(maximale waarde - minimale waarde)*(gemiddelde waarde - minimale waarde)); maximale waarde - wortel ((1-p)*(maximale waarde - minimale waarde)*(maximale waarde - gemiddelde waarde)))

Eens alle parameters een realistische en willekeurige waarde hebben, kan per simulatie een verschillende netto contante waarde berekend worden. In totaal worden er 1.000 simulaties uitgevoerd met als resultaat 1.000 netto contante waarden. Deze zijn opgedeeld in klassen (met een klassebreedte van 1 miljoen EUR en weergegeven op onderstaande figuren. De eerste figuur bevat de kansverdeling van de netto contante waarden, de tweede figuur de cumulatieve kansverdeling van de netto contante waarden en de tabel vat de resultaten van deze Monte Carlo simulatie¹² samen.



Figuur 12: Kansverdeling NCW WKK-installatie via Monte Carlo simulatie (1.000 simulaties)

¹² In **bijlage 7** worden twee voorbeelden van Monte Carlo simulaties gegeven.



Figuur 13: Cumulatieve kansverdeling NCW WKK-installatie via Monte Carlo simulatie (1.000 simulaties)

Tabel 11: Samenvatting resultaat Monte Carlo simulatie

Summary statistics			
Steekproefgrootte (N)	1.000		
Locatie (midden)			
Gemiddelde	4.179.699,11 EUR	Mediaan	3.359.165,70 EUR
Standaardfout van het gemiddelde	124.745,44 EUR		
Spreiding			
Standaardfout	3.944.797,17 EUR	Q (,75)	6.260.453,02 EUR
Maximum	23.579.163,69 EUR	Q (,25)	1.420.316,14 EUR
Minimum	-4.997.698,10 EUR	IQ range¹³	4.840.136,88 EUR
Range	28.576.861,79 EUR		
Vorm			
Scheefheid	1,0672		
Kurtosis	1,8248		
Kans			
Pr(NCW<0)	9,71%		

¹³ IQ-range: interkwartiel afstand

Deze resultaten geven veel meer informatie over de werkelijke netto contante waarde van de investering in een WKK-installatie dan de eerder uitgevoerde NCW-berekening. De resultaten van de sensitiviteitsanalyse (Monte Carlo simulatie) op basis van 1.000 simulaties geven een gemiddelde waarde voor de netto contante waarde van 4.179.699,11 EUR (mediaan bedraagt 3.359.165,70 EUR). Dus op basis van de verdelingen van de parameters en de vele simulaties die vervolgens zijn uitgevoerd, is de gemiddelde uitkomst ervan positief. Belangrijk is dat 9,71% van alle simulaties een negatieve NCW opleveren. De grootste negatieve waarde voor een NCW bedraagt zelfs -4.997.698,10 EUR.

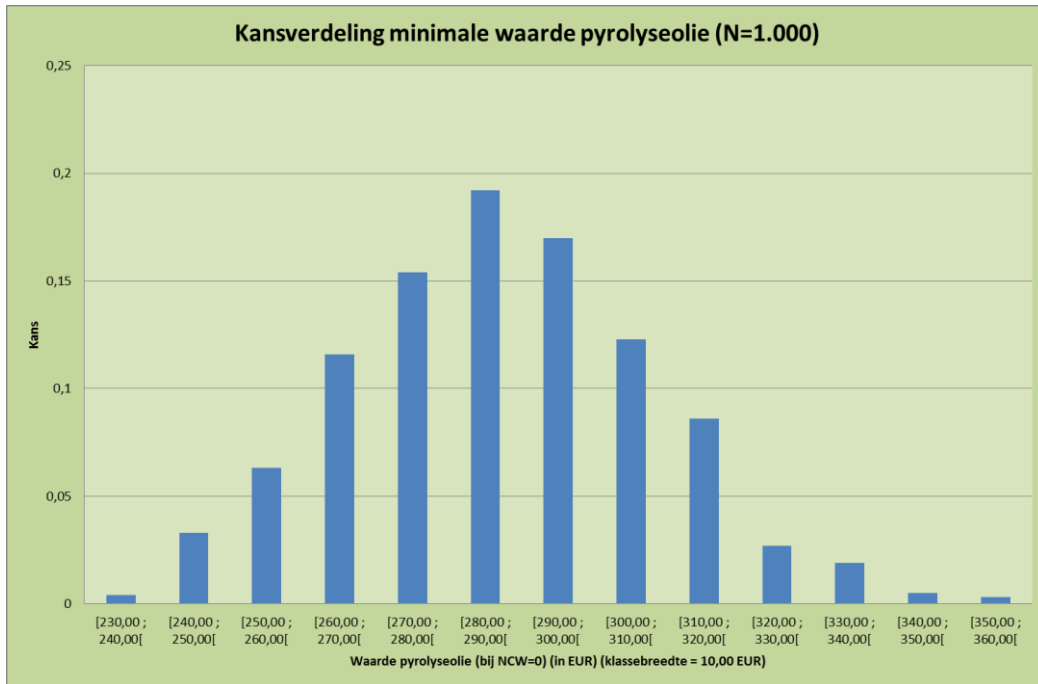
Op de figuur met de kansverdeling van de NCW opgedeeld in klassen met een klassebreedte van 1 miljoen EUR is duidelijk te zien dat de verdeling veel uitschieters heeft. Deze uitschieters zijn vooral gelegen in het rechtergedeelte van de grafiek. Er zijn bijgevolg weinig uitschieters die een extreem lage NCW opleveren, vooral enkelen die een extreem hoge NCW opleveren (tot bijna 20 miljoen EUR). Het grootste aantal NCW ($P > 0,05$) bevinden zich in de klasse tussen -1 miljoen EUR en 7 miljoen EUR. Deze simulatie laat duidelijk zien dat op basis van deze gegevens geen 95% garantie gegeven kan worden op een positieve netto contante waarde bij een aankoop prijs van pyrolyseolie van 259,32 EUR per ton.

Al deze simulaties zijn uitgevoerd met een kostprijs van pyrolyseolie van 259,32 EUR. Deze aankoop prijs levert slechts in 90,29% een positieve NCW op. Indien er gestreefd wordt naar een investering met een 95% zekerheid op een positieve NCW dient de waarde van pyrolyseolie te dalen. Hoe groot deze daling moet zijn, wordt in het volgende deel berekend.

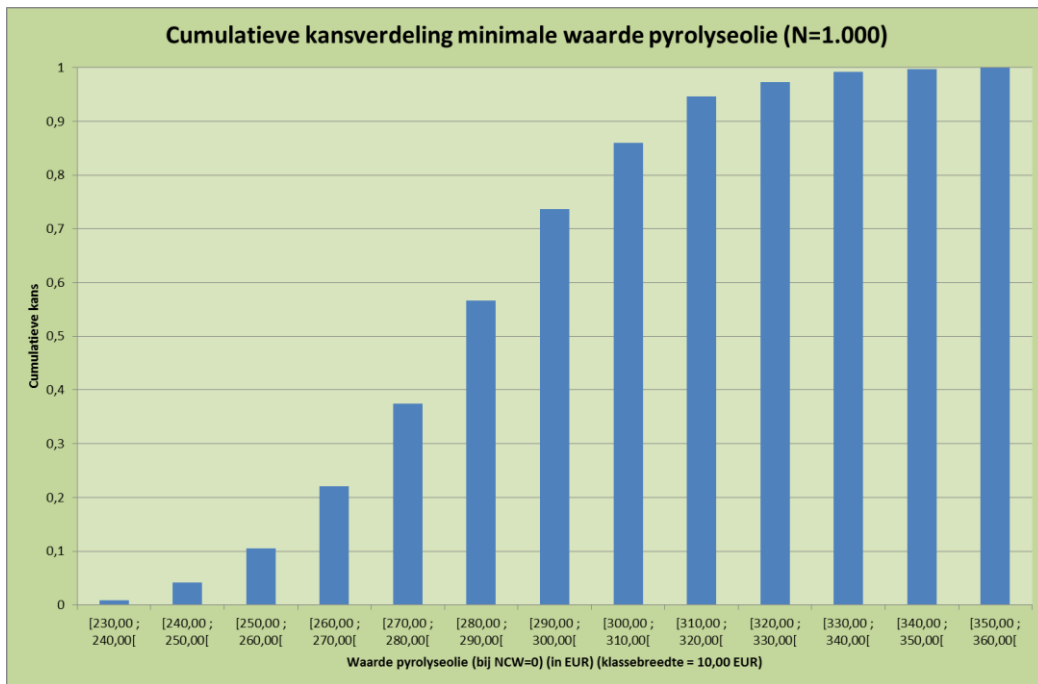
2.7 WAARDE PYROLYSEOLIE

Op basis van voorgaande berekeningen is het duidelijk dat de beslissing om te investeren in een WKK-installatie voor een gedeelte afhankelijk is van de kostprijs van pyrolyseolie. De aankoop prijs is de grootste uitgave en heeft bijgevolg een grote invloed op de netto contante waarde van de investering. In dit deel wordt de waarde van pyrolyseolie bepaald die een netto contante waarde oplevert die gelijk is aan nul. Dit geeft dus een beeld over de maximale aankoop prijs van pyrolyseolie indien deze verwerkt wordt in een WKK-installatie.

De analyse wordt op basis van dezelfde Monte Carlo analyse uitgevoerd als in het vorige deel. Enkel wordt de aankoop prijs van pyrolyseolie zo aangepast dat de $NCW=0$ (via de functie (algoritme) doelzoeken in Excel). Deze extra stap wordt bij alle 1.000 simulaties voltooid. Het resultaat hiervan zijn 1.000 maximale aankoop prijzen voor een ton pyrolyseolie. Deze worden opgedeeld in klassen en met een klassebreedte van 10,00 EUR. De resultaten zijn weergegeven in onderstaande figuren en in onderstaande tabel.



Figuur 14: Kansverdeling maximale waarde pyrolyseolie WKK-installatie via Monte Carlo simulatie (1.000 simulaties)



Figuur 15: Cumulatieve kansverdeling maximale waarde pyrolyseolie WKK-installatie via Monte Carlo simulatie (1.000 simulaties)

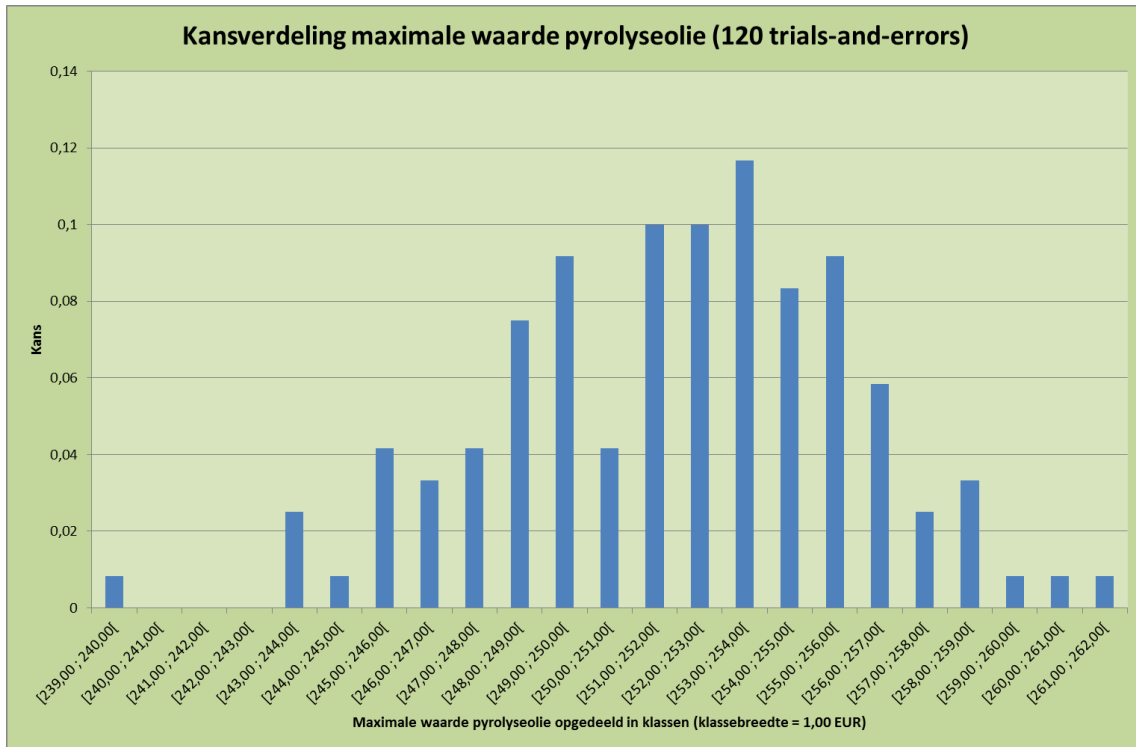
Tabel 12: Samenvatting resultaat Monte Carlo simulatie

Summary statistics (per ton pyrolyseolie)			
Steekproefgrootte (N)	1.000		
Locatie (midden)			
Gemiddelde	286,81 EUR/ton	Mediaan	287,10 EUR/ton
Standaardfout van het gemiddelde	0,68 EUR/ton		
Spreiding			
Standaardfout	21,44 EUR/ton	Q (,75)	301,08 EUR/ton
Maximum	354,86 EUR/ton	Q (,25)	272,68 EUR/ton
Minimum	221,52 EUR/ton	IQ range	28,40 EUR/ton
Range	133,34 EUR/ton		
Vorm			
Scheefheid	0,0715		
Kurtosis	0,0368		
Kans			
Pr(waarde PO<259,32)	9,46%		

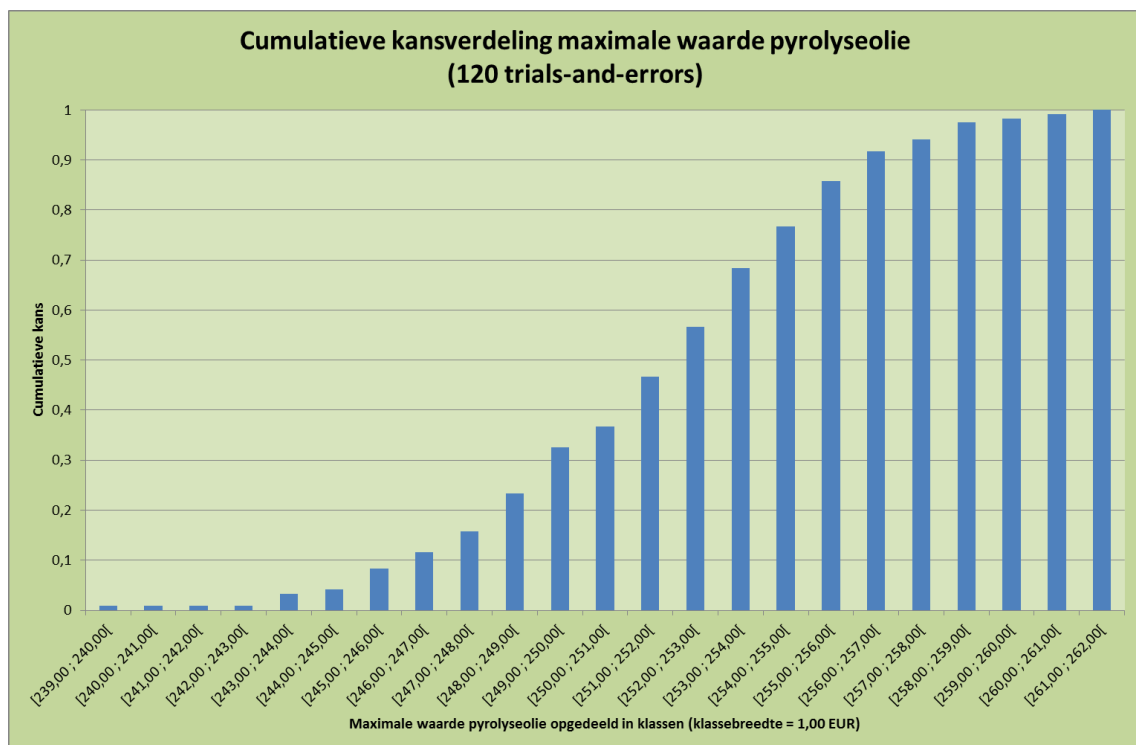
De resultaten van deze sensitiviteitsanalyse leveren een maximale aankoopprijs/waarde van pyrolyseolie op van gemiddeld 286,81 EUR (mediaan is 287,10 EUR) per ton. Deze masterproef hanteert een minimale waarde voor pyrolyseolie van 259,32 EUR per ton. De analyse levert echter in 9,46% van de gevallen een waarde op die lager is dan 259,32 EUR per ton met als minimale waarde zelfs 221,52 EUR per ton. Dit duidt erop dat een kleine verandering in de aankoopprijs van pyrolyseolie per ton een grote invloed heeft op de netto contante waarde berekening.

Belangrijker om te weten is de waarde van pyrolyseolie die met 95% zekerheid een positieve netto contante waarde oplevert voor een investering in een WKK-installatie in de Noorderkempen. Duidelijk is dat deze waarde lager moet liggen dan 259,32 EUR per ton. Op basis van trial-and-error wordt deze waarde bepaald.

In totaal zijn er 120 trial-and-error berekeningen uitgevoerd. Deze leverden telkens een waarde op waarbij met 95% zekerheid een waarde gevonden wordt die minstens een positieve NCW oplevert. Deze 120 maximale waarden voor pyrolyseolie zijn weergegeven in onderstaande figuren en in onderstaande tabel.



Figuur 16: Kansverdeling maximale waarde pyrolyseolie WKK-installatie bij $P(NCW>0)=0,95$ (120 trials-and-errors)



Figuur 17: Cumulatieve kansverdeling maximale waarde pyrolyseolie WKK-installatie bij $P(NCW>0)=0,95$ (120 trials-and-errors)

Tabel 13: Samenvatting resultaat trial-and-error

Summary statistics (per ton pyrolyseolie)			
Steekproefgrootte (N)	120		
Locatie (midden)			
Gemiddelde	251,96 EUR/ton	Mediaan	252,19 EUR/ton
Standaardfout van het gemiddelde	0,36 EUR/ton		
Spreiding			
Standaardfout	3,96 EUR/ton	Q (,75)	254,76 EUR/ton
Maximum	261,60 EUR/ton	Q (,25)	249,32 EUR/ton
Minimum	239,87 EUR/ton	IQ range	5,44 EUR/ton
Range	21,73 EUR/ton		
Vorm			
Scheefheid	-0,2695		
Kurtosis	0,0627		

Deze waarden geven de maximale waarde van pyrolyseolie weer, waarbij met 95% zekerheid gezegd kan worden dat deze een positieve netto contante waarde opleveren voor een WKK-installatie in de Noorderkempen. Er dient wel rekening gehouden te worden met het feit dat deze berekening enkel waar is indien de waarde van de parameters overeen komt met de werkelijke waarden.

De gemiddelde maximale waarde voor pyrolyseolie per ton is 251,96 EUR (de mediaan is gelijk aan 252,19 EUR per ton). De minimaal en maximaal gevonden waarden zijn respectievelijk 239,87 EUR en 261,60 EUR per ton. Onder de veronderstelling dat de kansverdeling een normale verdeling benadert (scheefheid en kurtosis ≈ 0), bedraagt het 95%-BI van de maximale waarde van pyrolyseolie [244,20 ; 259,72] EUR per ton.

De kans dat de maximale waarde van pyrolyseolie groter is dan de initiële waarde van 259,32 EUR per ton is zeer klein (slechts 1,73%). Toch ligt de gemiddelde gevonden waarde voor pyrolyseolie zeer kort bij de waarde van 259,32 EUR per ton. Dit duidt erop dat er potentieel is voor een WKK-installatie in de Noorderkempen. Het 95%-BI interval bevat namelijk de waarde 259,32 EUR per ton.

2.8 DEELCONCLUSIE

In hoofdstuk II is de pyrolyseolie gevaloriseerd op basis van de toepassing als energiebron. Pyrolyseolie kan als energiebron dienen voor de opwekking van elektriciteit of warmte of elektriciteit en warmte (WKK). In de literatuur is deze toepassing reeds veelvuldig beschreven, alsook de economische uitwerking ervan. In dit hoofdstuk zijn de mogelijke technologieën bondig besproken. Het belangrijkste deel echter is de valorisatie van pyrolyseolie. Deze is in verschillende stappen uitgevoerd.

Een WKK-installatie in de Noorderkempen kan een capaciteit hebben van 4,17 MW (op basis van een jaarlijkse input van 21.000 ton biomassa). Deze installatie vergt een initiële investering van 3.895.835,68 EUR die wel nog verminderd kan worden met verkregen subsidies van 199.272,00 EUR.

De belangrijkste opbrengsten van de installatie zijn de verkoop van warmte, elektriciteit, groenestroomcertificaten en warmtekrachtcertificaten. Daartegenover staan de uitgaven die hoofdzakelijk betrekking hebben op de aankoop van pyrolyseolie, betaling van interesten en onderhouds- en uitbatingskosten.

Op basis van initiële waarden is een netto contante waarde berekening uitgevoerd van de investering. Op basis van een verkoop van warmte van 100% bedraagt de NCW 1.453.756,76 EUR; op basis van een verkoop van warmte van 50% bedraagt de NCW -1.534.082,83 EUR.

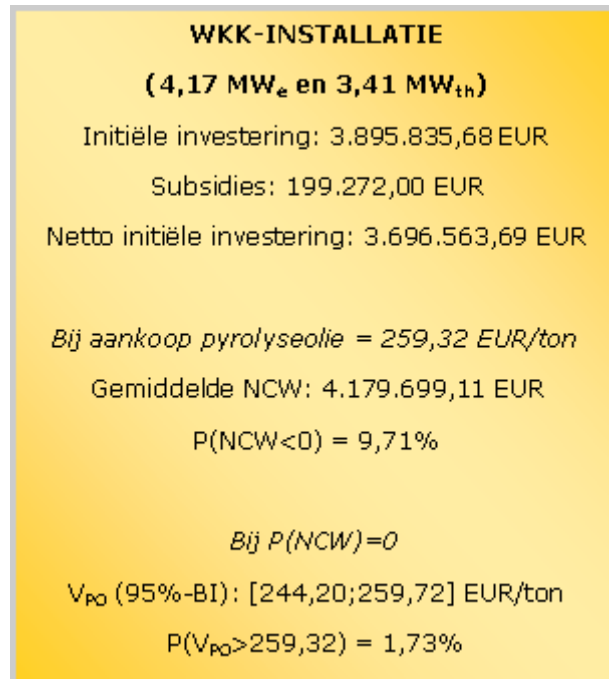
Vervolgens wordt een sensitiviteitsanalyse (Monte Carlo simulaties) uitgevoerd met als resultaat een gemiddelde netto contante waarde van 4.179.699,11 EUR. Echter is duidelijk geworden dat op dit gemiddelde veel spreiding zit. Zo leveren 9,71% van de simulaties een negatieve netto contante waarde op.

Tot slot is de waarde van pyrolyseolie bepaald (op basis van trial-and-error) die met 95% zekerheid een positieve netto contante waarde oplevert. Deze waarde ligt met een betrouwbaarheid van 95% in het interval [244,20 ; 259,72] EUR per ton. Het interval bevat de waarde 259,32 EUR per ton die gehanteerd wordt in deze masterproef, al ligt het gevonden gemiddelde lager.

Op basis van deze analyses kan besloten worden dat pyrolyseolie als energiebron in de Noorderkempen potentieel heeft. Toch kunnen er nog steeds vraagtekens geplaatst worden bij de mogelijkheid om een stabiele output te realiseren op lange termijn, aangezien problemen met erosie en corrosie vaak aangehaald worden in de literatuur. De wisselende samenstelling van pyrolyseolie heeft een impact op de voorbehandeling. Bepaalde eigenschappen kunnen voor problemen zorgen bij de verbranding. De vraag blijft als de aanpassingen aan de motor voldoende zijn om een stabiele output te realiseren. Wel kan besloten worden dat er minder schadelijke

emissies zijn om twee redenen. Enerzijds stoot pyrolyseolie minder schadelijke stoffen uit dan andere fossiele brandstoffen en anderzijds wordt er geïnvesteerd in een DeNOx installatie die voor een verlaging van de schadelijk uitstoot zorgt.

Als conclusie kan gesteld worden dat op basis van deze data, berekeningen en analyses **pyrolyseolie als energiebron voor elektriciteit en warmte een waarde heeft die schommelt met een betrouwbaarheid van 95% tussen 244,20 EUR per ton en 259,72 EUR per ton.**



Figuur 18: Conclusie toepassing van pyrolyseolie als energiebron

HOOFDSTUK III: TOEPASSING ALS GRONDSTOF VOOR CHEMICALIËN

De chemische industrie is afhankelijk van een twaalftal primaire bouwstenen die afgeleid worden uit petroleum gebaseerde processen of uit aardgas, kolen, enz. Deze bouwstenen vormen de basis waarvan secundaire, tertiaire en verder bouwstenen worden afgeleid. Ook vormen ze de basis voor intermediaire producten en eindproducten voor de chemische industrie. (Szmant, 1989)

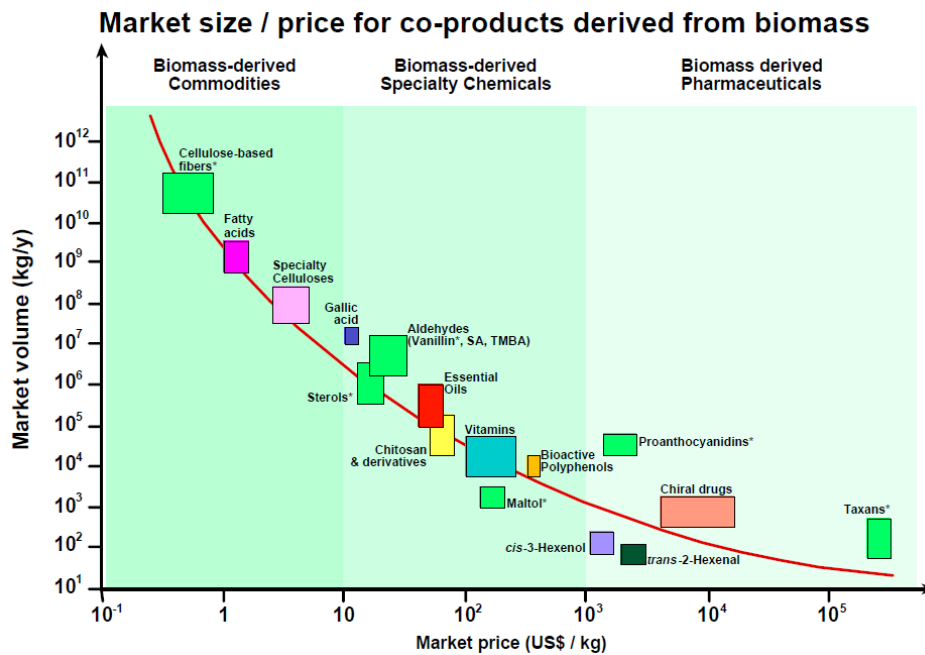
Biomassa bestaat uit:

- Lignocellulose en gerelateerd materiaal (70-75%) dat opgebouwd is uit C, H en O;
- Olie en vette zuren (15-20%) dat opgebouwd is uit C en H (en O);
- Proteïnen (5%) dat opgebouwd is uit C, H, O en N (en S).

Een groot deel van biomassa kan als grondstof dienen voor de productie van chemische bouwstenen. Het verschil met de traditionele petrochemische industrie is dat elementen niet moeten worden toegevoegd, maar dat functionele groepen selectief moeten herschikt of verwijderd worden. Hierdoor ontstaan chemische grondstoffen die hetzelfde zijn als deze uit de traditionele petrochemische industrie met als voordeel dat ze efficiënt verwerkt kunnen worden in de reeds bestaande installaties. (van Haveren, Scott, & Sanders, 2008)

Uit bovenstaande redenering ontstaat de basis voor een chemische industrie met hernieuwbare biomassa als grondstof. Haveren, Scott en Sanders (2008) vermelden in de inleiding van hun paper over bulk chemicaliën uit biomassa dat binnen een periode van tien jaar er in de haven van Rotterdam het potentieel bestaat om 10-15% van de bestaande chemische grondstoffen afkomstig van petrochemische processen te vervangen door chemische grondstoffen afkomstig uit biomassa. Het enorme voordeel van de ontwikkeling van processen voor chemische bouwstenen afkomstig van biomassa is dat deze voor verdere verwerking gebruik kunnen maken van de bestaande infrastructuur en kennis van de petrochemische industrie. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

Naast de bouwstenen zijn er nog andere componenten in pyrolyseolie, waarvan het potentieel sterk varieert (zie onderstaande figuur). Ook al komen bepaalde chemicaliën slechts in zeer kleine concentraties voor en/of zijn scheidingsmethoden ingewikkeld en duur, toch kan een hoge verkoopwaarde voor potentieel zorgen. Potentieel kan er daarentegen pas zijn als er voor de eindproducten een afzetmarkt bestaat. (Bridgwater, Meier, & Radlein, 1999)



Figuur 19: Marktgrooete en marktprijs voor chemicaliën uit pyrolyseolie (New Hampshire Office of Energy & Planning, 2004)

Pyrolyseolie kan verscheidene chemische toepassingen hebben. Een eerste opdeling hierbij is welk deel van de pyrolyseolie gebruikt wordt in de toepassing. De pyrolyseolie kan als geheel gebruikt worden in een chemische toepassing of opgedeeld worden in fracties die dan afzonderlijk in chemische toepassingen gebruikt worden. Wanneer slechts een gedeelte van de pyrolyseolie gebruikt wordt als toepassing, kan een verdere opdeling gemaakt worden. Een vaak terugkerende opdeling is het water oplosbare gedeelte (WSBO) en het niet water oplosbare (WIBO) gedeelte van de pyrolyseolie (fasescheiding) (zie **bijlage 2**). (Venderbosch & Prins, 2010)

Hoewel pyrolyseolie verscheidene toepassingen heeft, geeft een rapport van Resource System Group Inc. (2005) aan dat er zeer weinig informatie beschikbaar is over mogelijke producten uit pyrolyseolie. Blijkbaar zijn er zeer weinig chemische toepassingen die in een verder stadium van onderzoek en ontwikkeling zitten of bijna commercieel zijn. Daarnaast geven ze aan dat er over de bestaande commerciële toepassingen, geen tot zeer weinig gedetailleerde informatie beschikbaar is. De bedrijven, Red Arrow en Ensyn, die wel toepassingen hebben, willen of kunnen geen informatie vrijgeven. In de periode na de publicatie van hun rapport is er veel onderzoek gedaan naar mogelijke toepassingen en de verdere uitwerking van toepassingen. Het onderzoek was evenwel eerder gericht op de chemische aspecten van de processen en meestal niet of slechts zeer beperkt op economische aspecten ervan.

Om toch een schatting van de waarde van pyrolyseolie als chemische toepassingen te maken, wordt de waardebeoordeling op basis van verschillende invalshoeken bepaald. In deze masterproef

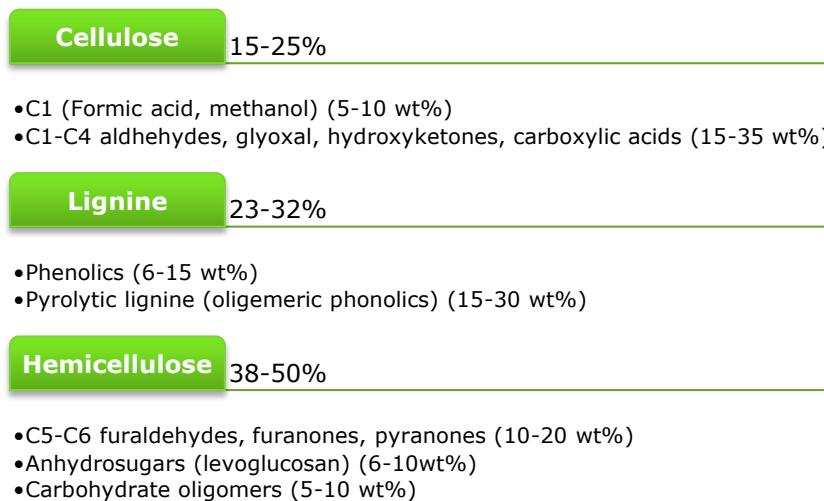
worden drie invalshoeken besproken om zo tot een waardebeoordeling van pyrolyseolie te komen. De drie invalshoeken zijn:

- Een waardebeoordeling per component;
- Een waardebeoordeling van bijna-bestaande chemische toepassingen; en
- Een waardebeoordeling van bestaande chemische toepassingen.

3.1 WAARDEBEPALING PER COMPONENT

Pyrolyseolie bestaat uit veel verschillende chemische moleculen (meer dan 300 organische componenten), waarvan tot op heden slechts 40 tot 50 % bekend is (zonder water). Het overige is nog onbekend, vaak omdat het slechts in zeer kleine hoeveelheden voorkomt. Ook is de samenstelling van pyrolyseolie sterk afhankelijk van de oorsprong. Zo bepaalt de samenstelling en het soort biomassa de samenstelling van pyrolyseolie en welke chemische elementen het bevat. Tenslotte bepalen ook de parameters van het pyrolyseproces de samenstelling van pyrolyseolie. (Venderbosch & Prins, 2010)

Hoewel slechts 40 tot 50% van de chemische moleculen bekend zijn, is wel meer informatie beschikbaar over de groepen. Onderstaande figuur geeft deze informatie weer. (Moens, 2009)



Figuur 20: Chemische samenstelling pyrolyseolie (Moens, 2009)

De bedoeling in dit onderdeel is het schatten van de waarde van pyrolyseolie aan de hand van de waarde van de chemische componenten die het bevat. Door per component de waarde te bepalen, kan de totale waarde van pyrolyseolie bepaald worden. Er zijn wel een aantal beperkingen en onzekerheden gekoppeld aan deze methode.

3.1.1 BEPERKINGEN EN ONZEKERHEDEN

De **beperkingen** zijn dat het resultaat slechts een schatting is van de potentiële waarde van pyrolyseolie. Ook wordt er geen rekening gehouden met de vraag of het mogelijk is om de verschillende componenten te scheiden van de rest. Daarnaast wordt er geen exacte kostprijs bepaald van de scheidingsmethoden die noodzakelijk zijn om de componenten apart te kunnen verhandelen. Tenslotte geldt de beperking dat er geen rekening gehouden wordt met zuiverheden van componenten. De beperkingen worden hieronder besproken.

De methode geeft slechts een schatting van de potentiële waarde van pyrolyseolie. Het maakt geen gebruik van bestaande technieken, maar slecht van de veronderstelling dat de componenten uit pyrolyseolie gehaald kunnen worden. Ook is de bekomen potentiële waarde slechts een schatting, omdat vele parameters een onzekere waarde hebben.

Het werkelijk bestaan van de scheidingsmethoden wordt genegeerd in deze methode. Er wordt uitgegaan van de mogelijkheid om de componenten van pyrolyseolie eruit te kunnen halen, zonder dat hiervoor aangegeven wordt welke technieken gebruikt worden.

De methode houdt geen rekening met de kostprijs van de technieken om de componenten uit pyrolyseolie te halen. De kostprijs van scheidingsmethoden kan niet bepaald worden, omdat er geen informatie is over het proces en de gehanteerde technieken.

De zuiverheden van componenten wordt niet gespecificeerd. Dit is vooral een gevolg van de te beperkte kennis over de scheidingsmethoden. Wel kan aangenomen worden dat hoe zuiverder een component uit pyrolyseolie gehaald kan worden, hoe hoger de marktwaarde ervan is.

De **onzekerheden** die deze methode met zich meebrengt, zijn de waarde van verschillende parameters die gehanteerd worden in de methode. De belangrijkste parameters zijn:

- De marktwaarde van de componenten van pyrolyseolie;
- De concentratie van de componenten van pyrolyseolie;
- De samenstelling van pyrolyseolie; en
- Het percentage dat uit pyrolyseolie gescheiden kan worden.

De marktwaarde van de componenten is onzeker. Van enkele vaak voorkomende chemicaliën zoals fenol en aceton is de marktwaarde bekend, maar deze fluctueert onder invloed van marktomstandigheden. Van chemicaliën die minder vaak voorkomen is de marktwaarde onbekend of zijn de gegevens pas verkrijgbaar tegen een hoge kostprijs.

De concentratie en de samenstelling van de componenten uit pyrolyseolie wordt bepaald door de input (biomassa) en het proces. Deze parameters hangen dus samen met het type biomassa en welke de procesparameters zijn.

Het percentage componenten dat uit pyrolyseolie kan gehaald worden is ook een onzekere factor. Aangezien scheidingsmethoden nog onbekend zijn, is het onmogelijk exact te bepalen hoeveel procent van de totale concentratie van een component of van alle componenten samen uit de pyrolyseolie te halen is.

3.1.2 BESCHRIJVING VAN DE METHODE

Pyrolyseolie bestaat uit veel verschillende chemische moleculen die aan de hand van een literatuurstudie in een lijst worden opgenomen. Dit is geen volledige lijst, omdat tot op heden slechts 40 tot 50 % van de componenten van pyrolyseolie bekend is (zonder water). (Venderbosch & Prins, 2010)

Vervolgens wordt van alle componenten, die een significante concentratie hebben, (significant als concentratie > 0,5 wt% droge basis) de marktwaarde bepaald. Indien de marktwaarde van een componenten onbekend is, wordt deze berekend op basis van de verkoopprijs (\neq marktwaarde).

Eens de marktwaarde bepaald is, wordt deze vermenigvuldigd met de concentratie van deze component in pyrolyseolie. De concentratie wordt wel eerst aangepast onder de veronderstelling dat slecht 40% tot 50% van de componenten bekend is. Per simulatie (totaal aantal simulaties (N) bedraagt 5.000) worden enkel de economisch meest interessante elementen opgenomen in de berekening van de waarde van pyrolyseolie. Eventueel wordt een restfractie van de concentratie verdeeld over de andere componenten om ook hun waarde gedeeltelijk op te nemen. Een sensitiviteitsanalyse, waarbij onzekere parameters een verdeling opgelegd krijgen, geeft uiteindelijk een beeld over de potentiële waarde van pyrolyseolie. De sensitiviteitsanalyse maakt gebruik van een Monte Carlo simulatie.

3.1.3 BEREKENING WAARDE PYROLYSEOLIE

3.1.3.1 GEGEVENS

Door middel van een literatuurstudie wordt een lijst opgesteld bestaande uit 104 componenten. Deze componenten vormen slechts een deel van de totale complexe samenstelling van pyrolyseolie. De naamgeving van de componenten wordt op twee manieren opgenomen in de lijst. Naast de systematische naam is ook het CAS nummer (=identificatienummer) opgenomen. De concentratie (in wt% droge stof of wt% ds) is per component opgenomen. Er wordt voor een aantal componenten een minimum en maximum opgenomen, omdat meerdere bronnen deze componenten met bijhorende concentratie vermelden. Belangrijke opmerking hierbij is dat dit

minimum en maximum geen werkelijke limieten zijn van de concentratie van een component, maar slechts een lager en/of hoger gevonden concentratie uit de literatuurstudie. In de sensitiviteitsanalyse zal rekening gehouden worden met deze opmerking. Wanneer een component enkel in één bron is teruggevonden, is dat als gemiddelde opgenomen in de lijst.

Voorbeeld. Levoglucosan (CAS nummer: 498-07-7) wordt in drie verschillende bronnen teruggevonden. Marsman et al. (2008) geven een concentratie van 0,429 wt% aan. Met 15 wt% water levert dit een concentratie van levoglucosan van 0,505wt% ds op. Venderbosch en Prins (2010) geven een concentratie levoglucosan aan van 4,01 wt% ds. Demirbas (2009) geeft verschillende concentraties voor levoglucosan. Dit heeft te maken met de verschillende temperaturen die gebruikt worden bij het pyrolyseproces. De concentraties liggen tussen 0,38 wt% ds en 30,5 wt% ds. Uiteindelijk is het laagste en hoogste gevonden gemiddelde beide afkomstig uit de bron van Demirbas. Deze gegevens worden opgenomen in de lijst met componenten. Uit dit voorbeeld blijkt nogmaals dat de samenstelling van pyrolyseolie zeer sterk afhangt van parameters van het proces dat pyrolyseolie voortbrengt.

Een aantal componenten heeft een zeer kleine gemiddelde concentratie, waardoor het nut van het opnemen van deze componenten erg klein wordt. Alle componenten met een concentratie die kleiner is dan 0,5 wt% ds werden weggelaten voor verdere berekeningen te vereenvoudigen.

In **bijlage 8** vindt u de gedetailleerde lijst van de chemische componenten. Laat duidelijk zijn dat deze lijst niet compleet is. Verder onderzoek is noodzakelijk om een gedetailleerder beeld te krijgen over de samenstelling van pyrolyseolie.

Er stelt zich een probleem dat door het samenvoegen van verschillende bronnen de totaal gevonden concentratie groter is dan mogelijk. Na het weglaten van de componenten met een zeer lage concentratie, blijft er een totale concentratie van 120% over (som van de gemiddelde concentratie per component). Venderbosch en Prins (2010) geven aan dat tot op heden (2010) 40 tot 50% van de componenten (zonder water) bekend is. De verklaring voor een totale concentratie van 120% is dat verschillende bronnen parameters veranderen in het pyrolyseproces, die concentraties van bepaalde componenten erg doen toenemen. In de voorbereiding op de uitwerking van de simulatie wordt een oplossing voor dit probleem uitgewerkt.

Vervolgens wordt van elke component de marktwaarde opgezocht. Voor de meeste componenten is echter geen marktwaarde terug te vinden in de literatuur. Voor deze componenten wordt de marktwaarde berekend aan de hand van de verkoopprijs en een factor die bepaald wordt via de zuiverheid.

De verkoopprijs van de componenten dient bijgevolg ook opgezocht te worden. Soms was er van componenten enkel een verkoopprijs in liter terug te vinden. Dan wordt deze via de dichtheid van deze component omgezet naar een verkoopprijs uitgedrukt in EUR/g of EUR/kg. Indien geen

verkoopwaarde en geen marktwaarde terug te vinden is, wordt de component verwijderd uit de lijst.

Van slechts negen componenten is een marktwaarde terug te vinden. In **bijlage 9** vindt u de lijst met componenten terug samen met de gevonden waarde per component. Voor de componenten met nummer 1, 2, 9, 11, 18, 35, 38, 45 en 57 is de marktwaarde (en de verkoopwaarde) gevonden.

Op basis van de beschikbare informatie van deze negen componenten wordt een vergelijking opgesteld om via de zuiverheid (die bij de verkoopprijs is opgegeven) van de andere componenten in combinatie met hun verkoopprijs de marktwaarde te berekenen. Van de negen componenten met een marktwaarde en een verkoopprijs valt één component af (nummer 38), omdat er geen zuiverheid bij de verkoopprijs opgegeven is.

De acht punten met bijhorende informatie staan in onderstaande tabel weergegeven. Het nummer komt overeen met de nummers uit de eerste kolom uit **bijlage 8** en **bijlage 9**. Bij de verkoopwaarde wordt steeds een zuiverheid opgenomen. Deze is opgenomen in de tabel. De verkleiningsfactor wordt als volgt berekend:

$$verkleiningsfactor = \frac{\text{verkoopprijs (in } \frac{EUR}{ton} \text{)}}{\text{marktwaarde (in } \frac{EUR}{ton} \text{)}}$$

Tabel 14: Data voor regressie verkleiningsfactor

No.	Marktwaarde (EUR/ton)	Verkoopwaarde (EUR/kg)	Zuiverheid (%)	Verkleiningsfactor
1	1001,67	21,31	88,00	21,31
2	600,00	25,62	99,00	42,70
9	1300,00	72,61	99,50	55,85
11	305,00	43,22	99,80	141,70
18	1100,00	15,21	99,80	13,83
35	1452,97	125,33	99,00	86,26
45	568,08	68,19	99,50	120,04
57	2050,00	43,14	98,00	21,04

Van de acht punten met informatie over de zuiverheid, de verkoopwaarde en de marktwaarde wordt een lineaire regressie uitgevoerd via SPSS. Als afhankelijke variabelen wordt de verkleiningsfactor opgenomen en als onafhankelijke variabelen zijn de verkoopwaarde en de zuiverheid opgenomen. Aangezien er slechts een zeer beperkt aantal gegevens beschikbaar zijn, wordt een regressie verwacht met een lage significantie. (De Vocht, 2008)

Het model met twee onafhankelijke variabelen (verkoopwaarde en zuiverheid) verklaart slechts 29,3% van de variantie van de verkleiningsfactor. Het model:

$$\text{Verkleiningsfactor} = -294,609 + 0,508 * \text{Verkoopwaarde} \left(\frac{\text{EUR}}{\text{kg}} \right) + 3,385 * \text{Zuiverheid} (\%)$$

Aan de hand van dit model kan een marktwaarde voor de andere componenten (waarbij de zuiverheid en verkoopwaarde is opgegeven) bepaald worden. Dit kan door gebruik te maken van volgende formule:

$$\text{marktwaarde} \left(\text{in} \frac{\text{EUR}}{\text{ton}} \right) = \frac{\text{verkoopwaarde} \left(\text{in} \frac{\text{EUR}}{\text{ton}} \right)}{\text{verkleiningsfactor}}$$

Een aantal verkoopprijzen zijn in gram uitgedrukt. Hierdoor is dit model, bepaald door verkoopprijzen in kg, niet toepasbaar, omdat de verkleiningsfactor niet relevant blijkt te zijn. Om van deze componenten toch de marktwaarde te kunnen bepalen, wordt gebruik gemaakt van een andere verkleiningsfactor. Deze verkleiningsfactor wordt bepaald door een component (nummer 38) waarvan de marktwaarde bekend is en de verkoopwaarde in EUR/g is opgegeven. De verkleiningsfactor van deze component is 1.631,14. Deze verkleiningsfactor wordt vervolgens gebruikt bij de componenten met nummer: 7, 14, 31, 40 en 62.

Van componenten waarbij de zuiverheid opgegeven bij de verkoopprijs vrij laag is, wordt ook een aangepaste verkleiningsfactor gebruikt. Deze is nodig voor 3 componenten (nummer 48, 49 en 53). Twee componenten hebben bij de verkoopprijs een zuiverheid van 40% (nummer 48) en 37% (nummer 49) opgegeven. Voor deze twee werd een verkleiningsfactor 10 gebruikt. De derde heeft een zuiverheid van 80% (nummer 53). Hiervoor wordt een verkleiningsfactor 20 gebruikt. Deze verkleiningsfactoren zijn arbitrair bepaald, omdat bovenstaande formule een onrealistische verkleiningsfactor opleverde.

Laat duidelijk zijn dat de berekende marktwaarde veel meer onzekerheid met zich meebrengt dan de werkelijke marktwaarde. De sensitiviteitsanalyse zal hiermee rekening houden net als met de onzekerheid die de gevonden verkoopprijs met zich meebrengt.

In **bijlage 10** vindt u de volledige lijst met componenten met bijhorende verkleiningsfactor, verkoopwaarde en de gevonden of berekende marktwaarde. Deze lijst wordt gebruikt in verdere berekeningen.

3.1.3.2 SENSITIVITEITSANALYSE

Vooraleer er overgegaan kan worden tot het uitvoeren van een simulatie voor de bepaling van de waarde van pyrolyseolie, worden de sensitieve variabelen aangeduid. Deze zijn:

- Marktwaaarde van de componenten;
- Concentratie van de componenten; en
- Haalbare scheidingsmethode uit pyrolyseolie.

Hierna wordt dieper ingegaan op de rangschikking van de componenten in de simulaties.

3.1.3.2.1 SENSITIVITEIT MARKTWAARDE

De marktwaaarde van de componenten is onzeker. Bij de werkelijke en de berekende marktwaaarde bestaat de onzekerheid over de juistheid van de gegevens. De onzekerheid is veel groter bij de berekende marktwaaarde, waarbij de onzekerheid over de correctheid van de bron en de onzekerheid over de exacte waarde van de verkleiningsfactor een rol spelen. Voor de werkelijke marktwaaarde wordt de sensitiviteitsanalyse uitgedrukt in een triangulaire verdeling met een gemiddelde bepaald door de gevonden waarde. Het minimum is dat gemiddelde -10% en het maximum dat gemiddelde +10%. De sensitiviteit van de berekende marktwaaarde wordt uitgedrukt in de sensitiviteit van de verkleiningsfactor en de verkoopwaarde van de componenten. De verkleiningsfactor wordt uitgedrukt in een uniforme verdeling met een minimum dat 25% lager ligt dan het berekende gemiddelde en een maximum dat 25% hoger ligt dan dat gemiddelde. De verkoopwaarde wordt uitgedrukt in een triangulaire verdeling met gemiddelde de opgezochte waarde, het minimum dat gemiddelde -10% en het maximum dat gemiddelde +10%.

Voorbeeld. De opgezochte marktwaaarde van formic acid (CAS nummer: 64-18-6) bedraagt 65,00 INR per kg (of 1,00 EUR/kg). Er zijn twee redenen om aan te nemen dat er onzekerheid bestaat over deze waarde die al dan niet de werkelijke marktwaaarde weerspiegelt. De eerste reden is dat marktwaardes fluctueren onder invloed van marktomstandigheden. Hierdoor kan beter een range van waarden genomen worden om de kans te vergroten dat de werkelijke waarde van formic acid opgenomen wordt in de berekeningen. De tweede reden is de onzekerheid die een bron met zich meebrengt. De waarde van formic acid wordt in de berekeningen opgenomen als een triangulaire verdeling met:

- Een gemiddelde van 1001,67 EUR/ton;
- Een minimum van 901,50 EUR/ton; en
- Een maximum van 1101,84 EUR per ton.

Voorbeeld. Voor propionic acid (CAS nummer: 79-09-4) is geen marktwaaarde teruggevonden. De marktwaaarde dient dus berekend te worden. Wel wordt een verkoopprijs gevonden van 19,94 EUR/kg bij een zuiverheid van 99,5%. Bij deze verkoopprijs en zuiverheid hoort een berekende

verkleiningsfactor van 52,33. Hiermee kan een marktwaarde berekend worden van 381,05 EUR/ton, maar deze draagt een grote onzekerheid met zich mee. De verkleiningsfactor krijgt een uniforme verdeling opgelegd met:

- Een minimum van 39,25; en
- Een maximum van 65,41.

De sensitiviteit van de verkoopprijs wordt uitgedrukt in een triangulaire verdeling met:

- Een gemiddelde van 19,94 EUR/kg;
- Een minimum van 17,95 EUR/kg; en
- Een maximum van 21,93 EUR/kg.

De marktwaarde wordt berekend door uit beide verdelingen een waarde te nemen en vervolgens volgende formule toepassen:

$$\text{berekende marktwaarde} \left(\frac{\text{EUR}}{\text{ton}} \right) = \frac{\text{verkoopprijs} \left(\frac{\text{EUR}}{\text{kg}} \right) * 1.000}{\text{verkleiningsfactor}}$$

Stel bijvoorbeeld dat een verkleiningsfactor van 60,00 gekozen wordt en een verkoopprijs van 19,00 EUR/kg dan is de berekende marktwaarde gelijk aan 316,67 EUR/ton.

3.1.3.2.2 SENSITIVITEIT CONCENTRATIE

De concentratie van de componenten draagt ook een onzekerheid met zich mee. De concentraties zijn afhankelijk van de inputstroom (biomassa) en procesparameters. Componenten waarbij enkel een gemiddelde is opgegeven (informatie van één bron) hebben een meer onzekere gemiddelde concentratie dan wanneer een minimum en maximum zijn opgegeven (informatie uit meer dan één bron). De informatie over concentratie afkomstig uit één bron wordt uitgedrukt in een uniforme verdeling met het minimum dat 25% lager ligt dan de gegeven concentratie uit deze bron en het maximum dat 25% hoger ligt dan de gegeven waarde. De informatie over concentratie afkomstig van meer dan één bron heeft in de lijst reeds een gemiddelde, minimum en maximum. In de sensitiviteitsanalyse wordt deze uitgedrukt in een triangulaire verdeling met als gemiddelde het gemiddelde uit de lijst. Als minimum wordt het minimum uit de lijst genomen -10% en als maximum wordt het maximum uit de lijst genomen +10%.

Daarnaast wordt aangenomen dat van de totale hoeveelheid van een component slechts 75% volledig van de pyrolyseolie gescheiden kan worden.

Voorbeeld. De informatie over de concentratie van glycolic acid (CAS nummer: 79-14-1) is slechts in één bron teruggevonden en bedraagt 0,6 wt% ds. Om de onzekerheid over de juistheid van dit

gegeven op te nemen in de simulatie wordt de concentratie uitgedrukt in een uniforme verdeling met:

- Een minimum van 0,45 wt% ds; en
- Een maximum van 0,75 wt% ds.

Voorbeeld. De informatie over de concentratie van formic acid (CAS nummer: 64-18-6) is overgenomen uit meer dan één bron, waardoor de juistheid ervan beter ingeschat kan worden. De onzekerheid blijft wel aanwezig en daarom wordt de concentratie in de simulatie uitgedrukt in een triangulaire verdeling met:

- Een gemiddelde van 4,74 wt% ds;
- Een minimum van 0,43 wt% ds; en
- Een maximum van 9,9 wt% ds.

3.1.3.2.3 SENSITIVITEIT HAALBARE SCHEIDINGSMETHODE

De laatste sensitieve parameter is de totale haalbare concentratie die uit pyrolyseolie gehaald kan worden. Het is onrealistisch te veronderstellen dat alle componenten uit pyrolyseolie gehaald kunnen worden. Meer realistisch is te veronderstellen dat minstens één waardevolle component uit pyrolyseolie te halen is (circa 6,5%) tot maximaal een vijftal waardevolle componenten (circa 32,7%). Er wordt hiertussen een uniforme verdeling verondersteld om de onzekerheid hierover weer te geven. Een tweede reden om te kiezen voor een uniforme verdeling is om voldoende variatie in te bouwen tussen de simulaties.

3.1.3.2.4 RANGSCHIKKING

In de Monte Carlo simulatie worden eerst de componenten gerangschikt op basis van de vermenigvuldigingen tussen de marktwaarde (EUR/ton) en de concentratie (wt% ds). Deze rangschikking zorgt ervoor dat de economisch meest interessante componenten hoog gerangschikt staan. Deze rangschikking zou anders tussen de verschillende simulaties te sterk op elkaar lijken. Daarom wordt de rangschikking herschikt, met een grote kans dat componenten met een hoog potentieel opnieuw hoog gerangschikt worden. De herschikking is noodzakelijk om meer afwisseling te krijgen in de top componenten met hoog potentieel. Er bestaat namelijk geen zekerheid over de haalbaarheid om deze componenten uit pyrolyseolie te halen.

Vervolgens wordt een willekeurig geheel getal gekozen tussen 1 en 5 dat aangeeft tot welk rangnummer de componenten uit pyrolyseolie gehaald worden. Dit geeft de sensitiviteit van de haalbare scheidingsmethoden weer. Wordt het getal 3 gekozen, dan zal de top drie volgens de herschikte rangschikking uit pyrolyseolie gehaald worden. De concentraties van de gekozen componenten worden opgeteld (som concentraties componenten met hoog-potentieel).

Daarnaast wordt ook een haalbaar percentage bepaald aan de hand van een uniforme verdeling met een minimum van 6,5% en een maximum van 32,7%. Indien het haalbaar percentage kleiner is dan de som van de concentraties van de componenten met hoog-potentieel worden geen extra componenten uit pyrolyseolie gehaald. Indien het haalbaar percentage groter is dan de som van de concentraties van de componenten met hoog-potentieel wordt het resterende haalbare gedeelte dat nog niet is ingenomen, verdeeld over alle andere componenten. Deze verdeling gebeurt evenredig met de concentratie van de overige componenten.

Tot slot wordt de waarde toevoeging per component berekend:

$$\text{waarde toevoeging van component A} = \frac{\text{toegekende concentratie (wt\% op droge basis)}}{100} * \text{marktwaarde} \left(\frac{\text{EUR}}{\text{ton}} \right)$$

De toegekende concentratie is de concentratie per component die toegekend wordt volgens bovenstaande redenering. Het is de concentratie van een component die effectief uit pyrolyseolie gescheiden of geëxtraheerd wordt. Wel worden de concentraties die berekend zijn via de restverdeling vermenigvuldigd met 0,25. De reden hiervoor is doordat verschillende bronnen samengevoegd zijn, de totale concentratie te groot is.

De som van de waarde toevoeging van alle componenten samen is de waarde van pyrolyseolie (EUR/ton).

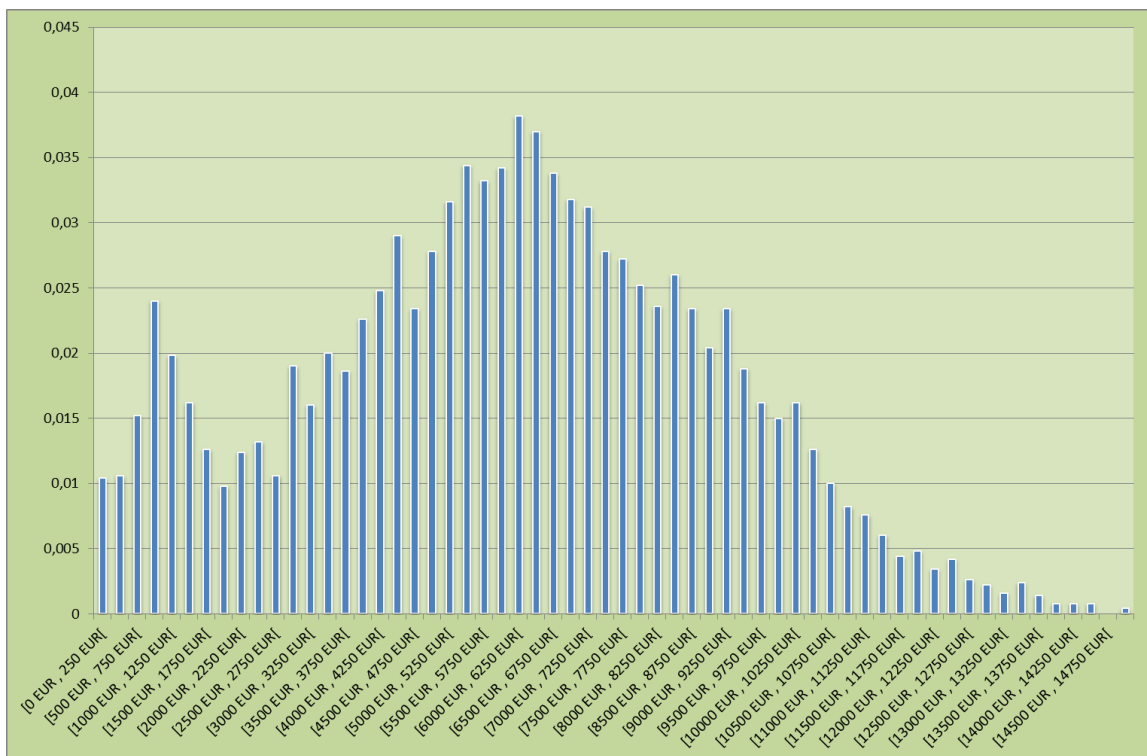
Voorbeeld. In totaal zijn er 5.000 simulaties uitgevoerd om een beeld te krijgen over de waarde van pyrolyseolie. In dit voorbeeld wordt één simulatie besproken; de volledige resultaten worden in het volgende onderdeel besproken. Een simulatie heeft als uitkomst een waarde voor pyrolyseolie van 1.521,40 EUR/ton. Deze waarde komt tot stand door de top 2 componenten met een hoog-potentieel uit pyrolyseolie te scheiden of extraheren. Het gaat hier om de componenten met nummers 40 en 67. Van component met nummer 40 wordt 13,92 wt% uit pyrolyseolie gehaald en van component met nummer 67 wordt er 4,34 wt% uit pyrolyseolie gehaald. Totaal wordt er dus 13,70 wt% [(=13,92 wt% * 75%¹⁴) + (4,34 wt% * 75%)] uit pyrolyseolie gescheiden of geëxtraheerd. Met een berekende marktwaarde voor component met nummer 40 van 14.132,20 EUR/ton en een berekende marktwaarde voor component met nummer 67 van 1.413,31 EUR/ton levert dit een totale waarde op van 1.521,40 EUR/ton op. De totale waarde wordt in deze simulatie niet verhoogd door ook nog andere componenten uit pyrolyseolie te halen, omdat het gekozen haalbare percentage scheiding 15,36% * 75% bedraagt (< 18,26 wt% * 75% dat er reeds uit gehaald is).

¹⁴ Per component wordt slechts 75% van de totale concentratie uit pyrolyseolie gescheiden of geëxtraheerd.

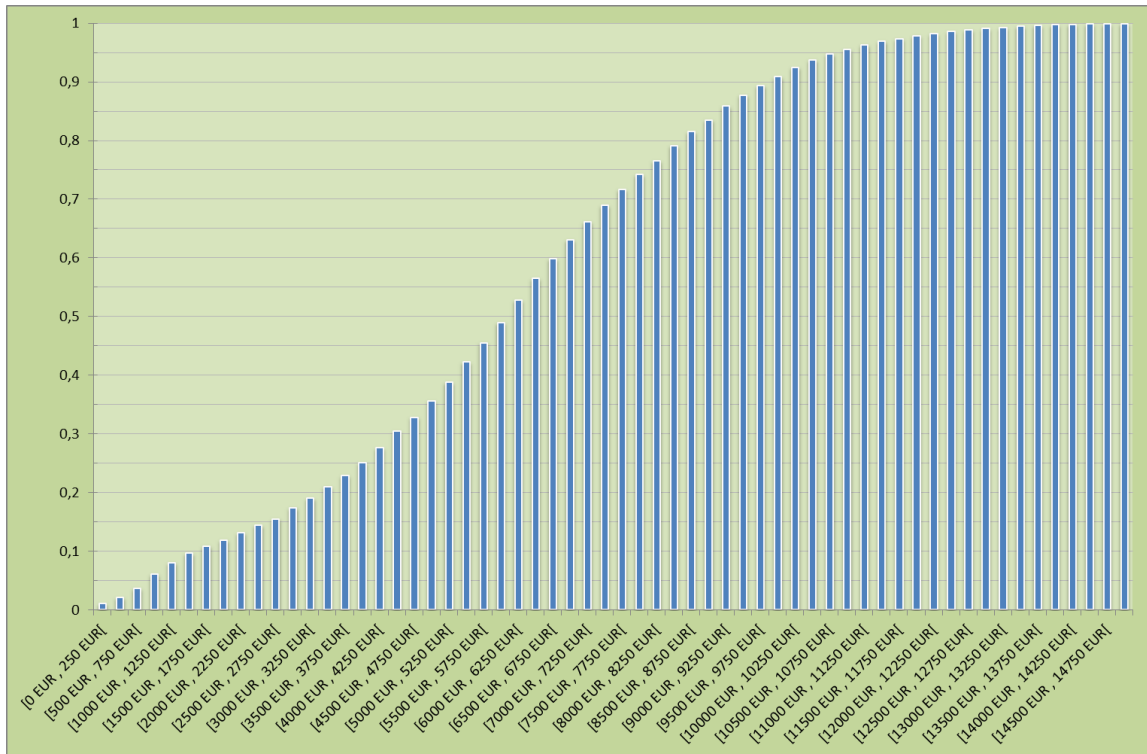
3.1.3.3 RESULTAATBESPREKING

Het valoriseren van pyrolyseolie aan de hand van de marktwaarde van de chemische componenten die het bevat biedt mogelijkheden. Het is mogelijk om procesfactoren aan te passen om zo pyrolyseolie te verkrijgen met verschillende samenstelling aangepast aan de economische interesse. Dit kan belangrijk zijn in wijzigende marktomstandigheden. Ook kunnen verschillende type grondstoffen een veranderende samenstelling van eindproducten geven, die mogelijk economisch interessanter is. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

De Monte Carlo simulatie (via Excel) wordt 5.000 maal uitgevoerd om een beeld te krijgen over de waarde van pyrolyseolie. In onderstaande figuren zijn de resultaten van de Monte Carlo simulatie weergegeven. Op de x-as staat de waarde van pyrolyseolie opgedeeld in klassen, met een breedte van 250 EUR. Op de y-as staat respectievelijk de kans en de cumulatieve kans. De kans geeft aan hoe groot de kans is dat de waarde van pyrolyseolie binnen dat interval ligt. De cumulatieve kans geeft aan hoe groot de kans is dat de waarde van pyrolyseolie ligt binnen dit interval of kleiner is dan de waarden binnen dit interval.



Figuur 21: Kansverdeling van de waarde van pyrolyseolie (EUR/ton)



Figuur 22: Cumulatieve kansverdeling van de waarde van pyrolyseolie (EUR/ton)

Tabel 15: Summary statistics van kansverdeling van de waarde van pyrolyseolie

Summary statistics			
Steekproefgrootte (N)	5.000		
Locatie (midden)			
Gemiddelde	6.000,20 EUR/ton	Mediaan	6.038,86 EUR/ton
Standaardfout van het gemiddelde	41,98 EUR/ton		
Spreading			
Standaardfout	2.967,83 EUR/ton	Q (,75)	7.960,45 EUR/ton
Maximum	14.924,24 EUR/ton	Q (,25)	4.039,74 EUR/ton
Minimum	51,62 EUR/ton	IQ range	3.920,71 EUR/ton
Range	14.872,62 EUR/ton		
Kansen (Y = uitkomst van een simulatie)			
P(Y < 2.500)	14,84 %	P(Y > 11.000)	4,39 %
P(2.500 < Y < 11.000)	80,23 %		

De gemiddelde waarde van pyrolyseolie op basis van deze simulaties is 6.000,20 EUR/ton. Het 95%-BI van de waarde van pyrolyseolie bedraagt [183,25 ; 11.817,15] EUR/ton. De mediaan bedraagt 6.038,86 EUR/ton.

De standaardafwijking van de steekproef bedraagt 2.967,83 EUR/ton. Niet alleen is de standaardafwijking vrij groot, ook is de range die het verschil tussen het maximum en minimum weergeeft zeer breed. Dit is het gevolg van de vele onzekere parameters in de simulatie en een grote onzekerheid. De tussen kwartiel range bedraagt 3.920,71 EUR/ton. Dit geeft aan dat de spreiding van de waarde van pyrolyseolie groot is.

Wat onmiddellijk opvalt aan de kansverdeling van de waarde van pyrolyseolie is dat deze twee toppen heeft. Een eerste top wordt bereikt in en rond het interval [750 ; 1.000] EUR/ton en een tweede veel grotere en bredere top situeert zich rond het interval [6.000 ; 6.250] EUR/ton. Deze twee punten zijn ook terug te zien als buigpunten op de cumulatieve kansverdeling van de waarde van pyrolyseolie.

Een verklaring die hieraan gegeven kan worden, is het al dan niet scheiden of extraheren van 1,6-Anhydro- β -D-glucoopyranose (levoglucosan/component nummer 7) uit pyrolyseolie. De invloed van deze component op de waarde van pyrolyseolie is groot. Indien levoglucosan niet uit pyrolyseolie gescheiden wordt, is de waarde ervan lager (linkse top) dan als levoglucosan wel wordt gescheiden uit pyrolyseolie (rechtse top). Het feit dat de rechtse top veel groter en breder is duidt erop dat levoglucosan vaker wel dan niet aangeduid wordt als component om uit pyrolyseolie te halen. De reden hiervoor is levoglucosan een hoge marktwaarde heeft en in grote concentraties kan voorkomen in pyrolyseolie.

Ook kan opgemerkt worden dat de kansverdeling veel uitschieters naar recht toe vertoont. Veel intervallen (vanaf het interval [11.000 - 11.250] EUR/ton) bevatten slechts een klein aantal simulaties. De rechtse top heeft duidelijk een verdeling met een rechtse start.

3.1.4 BEREKENING KOSTEN

Informatie over de kosten van dit proces, waarbij bepaalde componenten uit pyrolyseolie gescheiden of geëxtraheerd worden, is tot op heden niet beschikbaar. Over een aantal componenten is wel gedeeltelijk informatie terug te vinden zoals bijvoorbeeld van levoglucosan, maar niet de scheiding van levoglucosan met meerdere componenten samen. De informatie die terug te vinden is, heeft meestal enkel betrekking op het proces zelf en bevat geen of weinig kosteninformatie. Zo tonen Bennett, Helle en Duff (2009) aan dat levoglucosan via fasescheiding en hydrolyse uit pyrolyseolie geëxtraheerd kan worden en vervolgens gefermenteerd kan worden tot bio-ethanol. In hun artikel tonen ze enkel deze mogelijkheid aan, geven ze een procesbeschrijving om tot bio-ethanol te komen en geven ze experimentele resultaten weer in verband met het proces. Echter bevat hun artikel geen enkele economische informatie over kosten, noch opbrengsten. (Bennett, Helle, & Duff, 2009)

3.1.5 CONCLUSIE

De conclusie van de waardebepaling per component is erg vaag, omdat de opbrengsten slechts samengevat kunnen worden in een ruime range van waarden en er geen informatie is over de kosten van het proces. Ook moet onderstreept worden dat deze manier van waardebepaling van pyrolyseolie eerder gezien moet worden als slechts haalbaar op lange termijn. Het proces is pas haalbaar als de scheidingsmethoden van de belangrijkste componenten (zoals levoglucosan) commercieel zijn. Deze technieken moeten vervolgens nog op elkaar afgestemd worden om meerdere componenten uit pyrolyseolie te halen. Ook moet deze samenstelling kunnen wijzigen onder wisselende marktomstandigheden. Belangrijk is ook de opmerking dat er geen informatie is over hoe zuiver bepaalde componenten uit pyrolyseolie gehaald kunnen worden.

Slechts als aan deze opmerkingen volledig voldaan is, kan pyrolyseolie per ton tot 6.000,00 EUR waard zijn. Indien levoglucosan in dit proces niet gescheiden kan worden uit pyrolyseolie daalt de waarde van pyrolyseolie tot ongeveer 750,00 EUR/ton. Aangezien het om een nieuwe techniek gaat, zal de ontwikkeling ervan veel tijd en kosten vergen. Ook moeten er vragen over de afzet, de zuiverheid en de kwaliteit gesteld worden in verband met deze producten. Het voordeel van deze techniek is dat de chemische producten afkomstig zijn uit een hernieuwbare bron.

3.2 BIJNA COMMERCIEËLE TOEPASSINGEN

Het verschil met voorgaande analyse en de volgende analyses is dat deze analyses gebaseerd zijn op bijna commerciële toepassingen. Dit zijn processen waarvan de mogelijke werking is aangetoond of in een ver stadium in het onderzoeks- en ontwikkelingsproces gevorderd is. De vorige analyse heeft als eindresultaat een ruime range van producten uit pyrolyseolie en een brede potentiële range van waarden voor pyrolyseolie. Hiertegenover staat dat deze analyses een meer concrete waardebepaling (nauwere range) met concrete eindproducten kunnen opleveren. Het verschil met bijna commerciële toepassingen en bestaande commerciële toepassingen is dat bij bijna commerciële toepassingen het zelfstandig kunnen opereren nog niet is aangetoond. Ze hebben wel potentieel om op termijn (binnen nu en 30 jaar) een commerciële toepassing te zijn. (van Haveren, Scott, & Sanders, 2008)

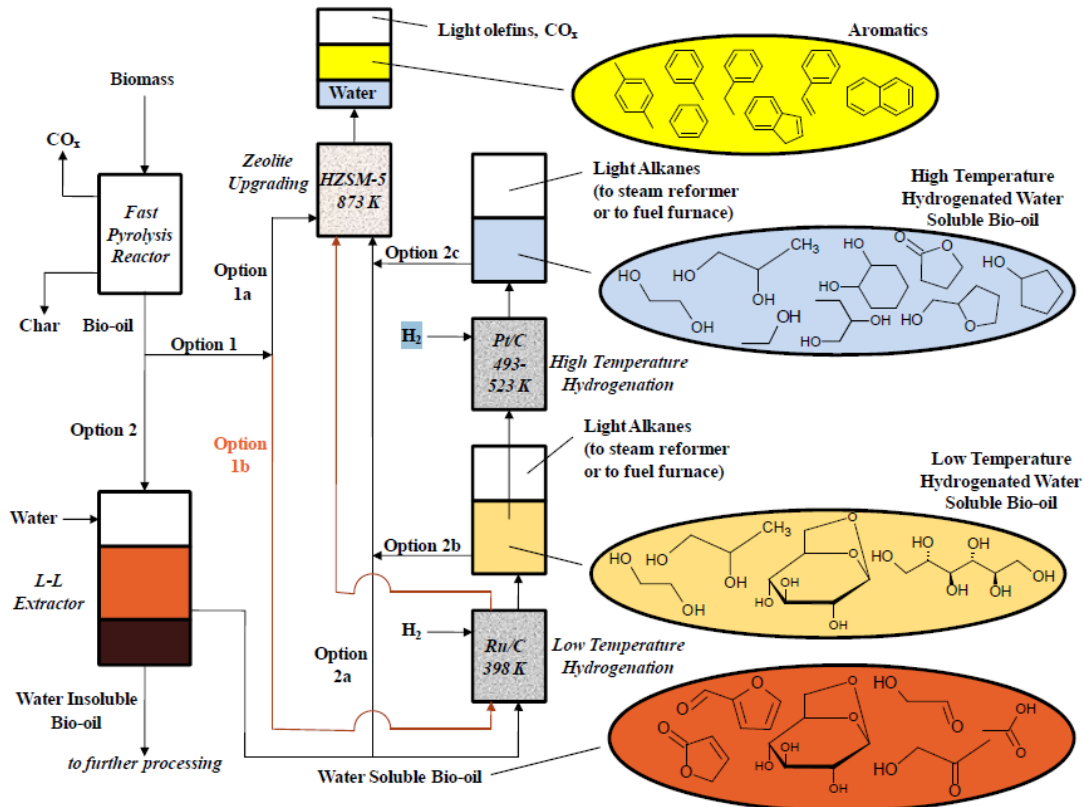
In deze masterproef worden drie bijna commerciële toepassingen voorgesteld:

- Industriële chemische grondstoffen;
- Selectieve fast pyrolyse; en
- Hernieuwbare waterstofproductie.

3.2.1 INDUSTRIËLE CHEMISCHE GRONDSTOFFEN

Zulk een bijna commerciële toepassing is een katalytisch proces waarbij pyrolyseolie (of een gedeelte ervan) omgezet wordt in chemische grondstoffen (primaire/secundaire bouwstenen). Het grote voordeel van dit proces is het reeds bestaan van processen die deze chemische grondstoffen kunnen verwerken tot eindproducten, omdat de processen hetzelfde zijn als deze van de petroleumindustrie. Een voorbeeld hiervan is ethyleen (primaire bouwsteen). Ethyleen kan worden afgeleid uit aardgas, maar ook uit pyrolyseolie. Via propyleen (secundaire bouwsteen) kan ethyleen worden omgezet in polypropyleen (intermediair product). Polypropyleen wordt op zijn beurt verwerkt in producten uit bijvoorbeeld de recreatieve sector. Onderdelen van fietsen, camera's, golfuitrusting, enz. bevatten allemaal polypropyleen. (van Haveren, Scott, & Sanders, 2008) (Pacific Northwest National Laboratory & National Renewable Energy Laboratory, 2004)

Het proces dat pyrolyseolie omzet in chemische producten bestaat uit drie grote stappen: hydrogeneren op lage temperatuur (LTH), hydrogeneren op hoge temperatuur (HTH) en zeoliet upgraden. De mogelijkheid bestaat om LTH en HTH over te slaan of om enkel HTH over te slaan. Ook de input heeft verschillende mogelijkheden. Zo kan pyrolyseolie gebruikt worden als input of kan enkel het water oplosbare gedeelte (WSBO) gebruikt worden als input. Het proces met de verschillende mogelijkheden wordt in onderstaand diagram weergegeven. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)



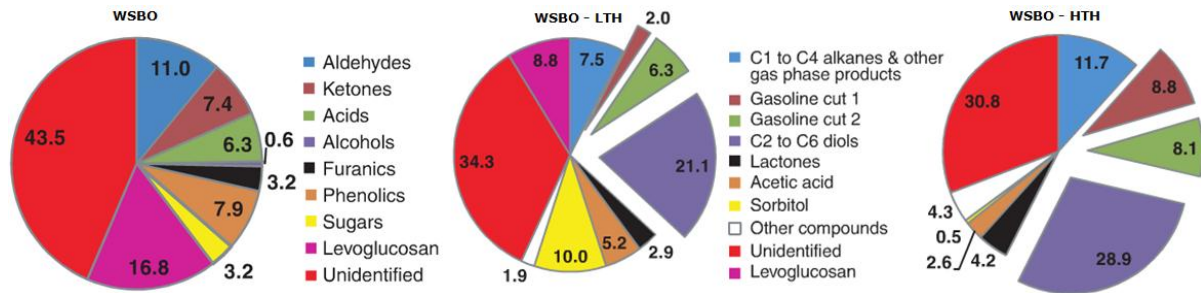
Figuur 23: Blokdigram van het proces voor de omzetting van pyrolyseolie tot chemische grondstoffen. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

WIBO heeft als voordeel dat het een lager zuurstofgehalte heeft dan pyrolyseolie waardoor er minder verbruik van waterstof tijdens het hydrogeneren is. Dit maakt het interessant om enkel de WIBO fase om te vormen tot transportbrandstoffen. (Marker, et al., 2005)

Twee technieken die in het proces gebruikt worden, zijn de primaire opdeling (zie **bijlage 2**) en H/C_{eff} ratio (zie **bijlage 11**).

3.2.1.1 PRODUCTEN

In de procesbeschrijving zijn de verschillende opties voor het proces weergegeven. Per optie worden de producten nu besproken. Wanneer er gekozen wordt om enkel WSBO te verwerken, worden onderstaande resultaten bekomen. Het eerste taartdiagram geeft de productopbrengsten weer van enkel zeoliet upgraden. Het tweede taartdiagram geeft de resultaten weer van hydrogeneren op lage temperatuur en zeoliet upgraden. Het derde taartdiagram tenslotte geeft de resultaten weer van hydrogeneren op lage en hoge temperatuur en zeoliet upgraden. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)



Figuur 24: Procentuele productverdeling van WSBO, WSBO na LTH en WSBO na LTH en HTH. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)^{15 16}

Bij LTH met proceseigenschappen bepaald door Vispute et al. (2010) werd 29,4% van de WSBO omgezet naar benzine cut 1¹⁷, benzine cut 2¹⁸ en C2 tot C6 diolen¹⁹ (koolwaterstoffen met 2 alcoholgroepen). Dit zijn verkoopbare producten. Zo kan benzine cut 1 en 2 worden toegevoegd aan benzine als hernieuwbaar additief met hoog octaangehalte. Diolen kunnen verder worden gezuiverd en verkocht. Het HTH zorgt ervoor dat componenten met een tekort aan waterstof (levoglucosan, sorbitol en azijnzuur) omgezet worden. De totale opbrengst aan benzine cut 1 en 2 en C2 tot C6 diolen stijgt hierdoor tot 45,8%. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

De techniek heeft een inputstroom van waterstof nodig. Netto wordt er 4,8 g H₂/100 g koolstof verbruikt in de processtap LTH. Bij een combinatie van LTH en HTH stijgt het netto verbruik tot 8,1 g H₂/100 g koolstof. Ook katalysatoren zijn noodzakelijk voor dit proces. Wanneer de pyrolyseolie gefilterd is, wordt verondersteld dat er weinig char-vorming optreedt en bijgevolg geen grote hoeveelheden aan katalysatoren verloren gaan. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

Een opmerking hierbij is dat er technieken bestaan (olefine aromatiseren; alkyleren van aromaten gebruik makend van olefine) om olefine om te zetten in aromaten. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

De tweede mogelijkheid binnen het proces is de volledige pyrolyseolie te hydrogeneren en kraken met behulp van katalysatoren (zeolieten). Onderstaande figuur (twee rechtse staven) geeft de verdeling van de eindproducten weer.

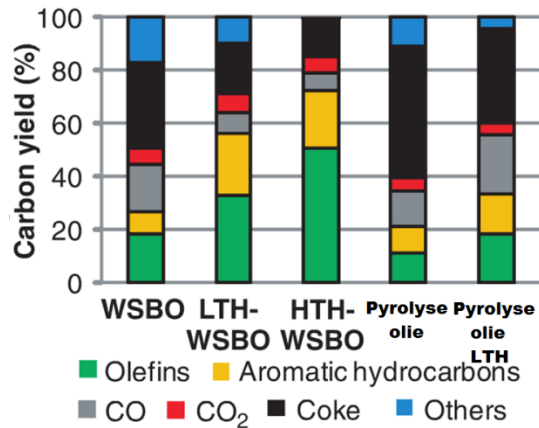
¹⁵ Lactonen: γ -butyrolactone en γ -valerolactone

¹⁶ Other components: tetrahydrofurfuryl alcohol, 1,2,6-hexanetriol, 1,2,3-butenetriol en glycerol.

¹⁷ Kleine moleculen; \leq C3 eenwaardige alcoholen. Bestaat uit: pentaan, hexaan, methanol, ethanol, 1-propanol, tetrahydrofuran, 2-butanol en 2-methyltetrahydrofuran.

¹⁸ C4-C6 eenwaardige alcoholen. Bestaat uit: 1,2-cyclohexanediol, 2,5-dimethyltetrahydrofuran, 1-butanol, 2-pentanol, 1-pentanol, cyclopentanol, 2-hexanol, 3-methylcyclopentanol, cyclohexanol, 3-methylcyclohexanol en 4-methylcyclohexanol

¹⁹ Koolwaterstoffen met 2 alcoholgroepen. Bestaat uit: 2,3-butanediol, propyleen glycol, 1,2-hexanediol, 1,4-hexanediol, 1,4-butanediol en 1,4-pentanediol.



Figuur 25: Verdeling eindproducten van WSBO en biomassa. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

De belangrijkste conclusie bij deze verdeling is de grote hoeveelheid (50%) char die gevormd wordt. Slecht 20% wordt door kraken met zeolieten omgezet naar olefine en aromaten. Na LTH wordt dit 32,6 % (verbruik van 0,9 g H₂/100 g koolstof in biomassa). (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

3.2.1.2 BEREKENING WAARDE PYROLYSEOLIE

Vispute et al. (2010) hebben aan de hand van de koolstofverdeling de productopbrengsten bepaald van de processen hierboven omschreven. Afhankelijk van de processen worden verschillende productverdelingen bekomen. De producten zijn C1 tot C6 alkanen, CO_x, aromaten, olefins en coke. Voor aromaten en olefins wordt een verdere onderverdeling opgesteld. Benzeen, toluen, xyleen en ethylbenzeen beschrijven de samenstelling van de aromaten en ethyleen, propyleen en butyleen beschrijven de samenstelling van olefins .

Tabel 16: Productverdeling chemische grondstoffen (met onder aromaten: benzeen (B), toluen (T), xyleen (X), ethylbenzeen (E), styreen (S), indeen (I) en naftaleen (N) en met onder olefins: ethyleen (E), propyleen (P) en butyleen (B)). (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

Grondstof	Proces	Finale producten (% koolstofopbrengst)														
		C1-C6 alkanen	CO _x	Aromaten								Olefins			Coke	
				To-taal	B	T	X	E	S	I	N	To-taal	E	P		B
Pyrolyseolie	Zeoliet (optie 1a)	0	18,3	9,8	17,3	40,8	23,5	2,0	4,1	8,2	4,1	11,2	51,8	36,6	11,6	49,5
	LTH + zeoliet (optie 1b)	2	26,5	14,4	16,9	37,2	38,5	3,4	2,7	0,0	1,4	18,2	52,2	35,9	11,4	35,3
WSBO	Zeoliet (optie 2a)	0	23,7	8,2	26,8	46,3	20,7	1,2	2,4	1,2	1,2	18,5	41,6	45,9	12,4	32,3
	LTH + zeoliet (optie 2b)	7,5	13,9	21,6	17,6	45,5	31,3	2,6	1,7	1,3	0,0	30,2	31,8	55,4	12,8	18,9
	LTH + HTH + zeoliet (optie 2c)	15,0	10,7	18,3	27,0	49,3	19,1	2,3	1,4	0,5	0,5	43,0	32,0	53,8	14,2	14,8

Aan de hand van de marktwaarde van de verschillende chemische bouwstenen wordt een potentiële waarde voor pyrolyseolie bepaald. De marktwaarde van de verschillende chemische bouwstenen is terug te vinden in onderstaande tabel. Voor indeen werd geen marktwaarde teruggevonden.

Tabel 17: Marktwaarde chemische bouwstenen

Chemische bouwsteen	Marktwaarde (EUR)	Bron ²⁰
Benzeen	860,97 - 886,00	1,2
Tolueen	772,66 - 950,61	1,2
Xyleen	916,16 - 939,02	1,2
Ethylbenzeen	1012,44	2
Styreen	1158,99 - 1199,00	1,2
Indeen		
Naftaleen	830,00	2
Ethyleen	993,42 - 1120,00	1,2
Propyleen	954,79 - 1115,00	1,2
Butyleen	970,00	2

²⁰ Bronnen:

1: (van Haveren, Scott, & Sanders, 2008)

2: (Reed Business Information Limited, 2011)

De waarde van de eindproducten van pyrolyseolie dat volledig het zeoliet proces ondergaat is 197,01 EUR/ton. De berekening is hieronder uitgewerkt (met de gemiddelde marktwaarde).

Waarde Pyrolyseolie

$$\begin{aligned}
 &= 9,8\% \\
 &* [(17,3 \% * 873,49 \text{ EUR}) + (40,8 \% * 861,64 \text{ EUR}) + (23,5 \% * 927,59 \text{ EUR}) \\
 &+ (2,0 \% * 1.012,44 \text{ EUR}) + (4,1 \% * 1.179,00) + (8,2 \% * 0 \text{ EUR}) + (4,1 \% * 830,00 \text{ EUR})] \\
 &+ 11,2 \% * [(51,8 \% * 1.056,71 \text{ EUR}) + (36,6 \% * 1.034,90 \text{ EUR}) + (11,6 \% * 970,00 \text{ EUR})] \\
 &= 197,01 \text{ EUR/ton}
 \end{aligned}$$

Als pyrolyseolie een LTH en zeoliet proces ondergaan heeft, hebben de eindproducten een gezamenlijke restwaarde van 324,84 EUR/ton. De andere mogelijk is om enkel WSBO een zeoliet proces te laten ondergaan, een LTH en een zeoliet proces te laten ondergaan of een LTH, HTH en een zeoliet proces te laten ondergaan. De waarde van de eindproducten van WSBO is dan respectievelijk 263,24 EUR/ton WSBO, 543,58 EUR/ton WSBO en 712,10 EUR/ton WSBO. Deze waarden kunnen ook uitgedrukt worden in EUR/ton pyrolyseolie²¹. Dan krijgen we een waarde van respectievelijk 184,27 EUR/ton, 380,51 EUR/ton en 498,47 EUR/ton. Een opmerking hierbij is dat de waarde van coke, CO_x, indeen en de alkenen niet wordt opgenomen in de waarde berekening. Per ton pyrolyseolie is er naast WSBO ook 300 tot 400 kg WIBO. De waarde hiervan is ook niet opgenomen. De waarde die hier bepaald is, is met een grote waarschijnlijkheid een onderschatting van de werkelijke waarde.

3.2.1.3 CONCLUSIE

Informatie over de kosten van dit proces voor de productie van chemische grondstoffen is relatief beperkt terug te vinden in de literatuur. Enkel over een belangrijke inputkost is informatie terug te vinden, namelijk over waterstof (H₂). De input van waterstof nodig per inputstroom is in onderstaande tabel weergegeven samen met de H/C_{EFF} ratio.

Tabel 18: Inputgegevens van waterstof voor de productie van industriële chemische grondstoffen (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

Grondstof	Proces	H/C _{EFF} ratio	Waterstof consumptie (g/100g koolstof in PO)
Pyrolyseolie	Zeoliet(optie 1a)	0,06	/
	LTH + zeoliet (optie 1b)	0,09	0,9
WSBO	Zeoliet(optie 2a)	0,14	/
	LTH + zeoliet (optie 2b)	0,71	4,8
	LTH + HTH + zeoliet (optie 2c)	1,20	8,1

²¹ 70% van pyrolyseolie is WSBO. (Marker, et al., 2005)

Deze gegevens worden gebruikt in een model voor de Noorderkempen. De veronderstellingen in dit model zijn een jaarlijkse input van biomassa van 21.000 ton, een mogelijke conversie van biomassa naar pyrolyseolie van 65% en met 56 wt% koolstof in pyrolyseolie (Zhang, Chang, Wang, & Xu, 2007). De kostprijs van waterstof varieert afhankelijk van de locatie, de manier van levering en de prijs van aardgas. De prijs varieert tussen 1,15 EUR/kg en 9,22 EUR/kg. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

De resultaten van dit model staan weergegeven in onderstaande tabel. Merk op dat het resultaat geen kapitaalkosten, noch andere kosten bevat. Enkel de inputkost van waterstof is opgenomen.

Tabel 19: Resultaat model industriële chemische grondstoffen (per ton pyrolyseolie)

Resultaat (EUR/jaar)						
Kostprijs H ₂		1,15 EUR/kg	3,17 EUR/kg	5,19 EUR/kg	7,21 EUR/kg	9,22 EUR/kg
Grondstof	Proces					
Pyrolyse-olie	Zeoliet (optie 1a)	2.689.186,50	2.689.186,50	2.689.186,50	2.689.186,50	2.689.186,50
	LTH + zeoliet (optie 1b)	4.354.950,60	4.216.154,67	4.077.358,74	3.938.562,81	3.799.766,88
WSBO	Zeoliet (optie 2a)	2.515.285,50	2.515.285,50	2.515.285,50	2.515.285,50	2.515.285,50
	LTH + zeoliet (optie 2b)	4.772.012,70	4.031.767,74	3.291.522,78	2.551.277,82	1.811.032,86
	LTH + HTH +zeoliet (optie 2c)	6.092.076,90	4.842.913,53	3.593.750,16	2.344.586,79	1.095.423,42

Uit bovenstaande resultaten leiden we af dat de optimale H/C_{EFF} ratio (waar het economisch potentieel maximaal is) afneemt met een toenemende kost van waterstof. Het optimale proces is bijgevolg afhankelijk van de kostprijs van waterstof. Daarnaast moet ook rekening worden gehouden met de mogelijke opbrengst van WIBO die het resultaat van het WSBO gedeelte in bovenstaande tabel positief zal beïnvloeden. De waarde van pyrolyseolie varieert afhankelijk van de prijs van waterstof en het proces in volgende range:

- [197,01 – 324,84 EUR/ton]²² als pyrolyseolie als geheel wordt verwerkt in het proces; en
- [184,27 – 498,47 EUR/ton] als enkel het WSBO gedeelte verwerkt wordt in het proces.

De belangrijkste uitdagingen in verband met dit proces zijn de kosten en het volume. De kosten hebben niet alleen betrekking op de afschrijving van machines en gebouwen, personeel, enz., maar

²² Het minimum en maximum delen door 13.650 ton per jaar pyrolyseolie.

vooral ook in de ontwikkeling van de technologie. Het volume heeft betrekking op de afzet van de chemische bouwstenen. De kosten zullen hoger zijn dan deze van de traditionele werkwijze voor de productie van bouwstenen (uit petrochemische sector). Financiële steun kan leiden tot een kostenpariteit tussen de nieuwe technologie en de traditionele technologie, alsook bestaat de mogelijkheid tot het vragen van een premium prijs door ecologisch verantwoord produceren. Iets wat niet mogelijk is bij de traditionele technologie. De kostenberekening moet ook rekening houden met de groei in het marktaandeel van de nieuwe technologie en de leercurve van de technologie. (Lund, 2011)

3.2.2 SELECTIEVE FAST PYROLYSE

Componenten met een hoge economische waarde uit pyrolyseolie komen vaak slechts in kleine hoeveelheden in pyrolyseolie voor. Om deze reden is het interessant om specifieke pyrolyseolie te produceren met een grotere concentratie aan componenten met een economisch hoog potentieel. Selectieve fast pyrolyse is verschillend van conventionele fast pyrolyse. Conventionele fast pyrolyse is eerder gericht op het maximaliseren van de output. Bijvoorbeeld het maximaliseren van de output aan pyrolyseolie. Terwijl selectieve fast pyrolyse zich richt op het produceren van pyrolyseolie met een hoge concentratie aan economisch interessante componenten. (Zhu & Lu, 2010)

De output van fast pyrolyse is afhankelijk van verschillende parameters. Selectieve fast pyrolyse vindt plaats door het instellen van deze parameters die een gewenste output opleveren. Meestal maakt selectieve fast pyrolyse gebruik van katalysatoren om de output van een bepaalde component te verhogen of de zuiverheid van een bepaalde component te vergroten. (Zhu & Lu, 2010)

Er is reeds aangetoond dat de concentratie van bepaalde componenten in pyrolyseolie kan verhoogd worden. Enkele voorbeelden staan weergegeven in onderstaande tabel. De kolom 'bron' geeft aan waar meer informatie over de processen is terug te vinden. De details van het proces vallen buiten deze masterproef. Het voorbeeld over lichte aromatische waterkoolstoffen wordt wel verder besproken, aangezien het aansluit bij het gedeelte over industriële chemische grondstoffen.

Tabel 20: Toepassingen van selectieve fast pyrolyse (Zhu & Lu, 2010)

Voorbeeld	Toepassing	Bron
Levoglucosan	Glucose voor bio-ethanol	(Dobele, Rossinskaja, Dizhbite, Telysheva, Meier, & Faix, 2005) (Pan & Richards, 1989) (Nik-Azar, Hajaligol, Sohrabi, & Dabir, 1997)
Levoglucosenone	Synthese voor verschillende producten	(Dobele, Rossinskaja, Telysheva, Meier, & Faix, 1999) (Dobele, Meier, Faix, Radtke, Rossinskaja, & Telysheva, 2001) (Dobele, et al., 2003) (Lu, Xiong, Li, Guo, & Zhu, 2009)
1-hydroxy-3,6-dioxabicyclo[3.2.1]octan-2-one	Bouwsteen voor de synthese van fijne chemicaliën	(Fabbri, Torri, & Baravelli, 2007) (Torri, Lesci, & Fabri, 2009)
Anhydro-oligosaccharides	Gebruikt in de voorbereiding van glycoconjugaten	(Piskorz, Majerski, Radlein, Vladars-Usas, & Scott, 200)
Furfural	Organisch solvent of organisch reagens voor de productie van medicijnen, harsen, voedseladditieven, brandstofadditieven en andere speciale chemicaliën	(Zeitsch, 2000) (Lu, Li, Zhang, & Zhu, 2009) (Shimada, Kawamoto, & Saka, 2008)
Hydroxyacetaldehyde	Aldehyde-alcohol of suiker dat gebruikt kan worden als actief vlees bruinend middel of in de cosmetische industrie	(Shimada, Kawamoto, & Saka, 2008)
Azijnzuur	Chemische bouwsteen	(Prins, Ptasinski, & Janssen, 2006)
Fenol componenten	Fenol vervangend in de productie van fenol-formaldehyde harsen	(Lu, Zhang, Dong, & Zhu, 2010) (Nowakowski, Jones, Brydson, & Ross, 2007) (Adam Judit, et al., 2006)
Licht aromatische waterkoolstoffen	Benzeen, toluen, xyleen en naftaleen	(Bridgwater A. , 1996) (Horne & Williams, 1996) (Pattiya, Titiloye, & Bridgwater, 2008) (Adjaye & Bakhshi, 1995)

De toepassingen voor een verhoogde productie van licht aromatische waterkoolstoffen wordt hieronder bondig toegelicht. Door middel van een zeoliet katalysator (bijvoorbeeld HZSM-5, HY, enz.) die zeer effectief zijn om pyrolyseolie met een hoog zuurstofgehalte om te vormen tot waterkoolstoffen. De meerderheid van deze waterkoolstoffen zijn lichte aromatische waterkoolstoffen (benzeen, toluen, xyleen en naftaleen). Een studie van Adjaye et al. (1995) maakte gebruik van een HZSM-5 katalysator en leverde een vloeibaar product op dat tot 90 wt% aromatische koolstoffen bevatte, waarvan 31,8 wt% toluen en 33,1 wt% xyleen. (Adjaye & Bakhshi, 1995) (Zhu & Lu, 2010)

Onder de veronderstelling dat de techniek van licht aromatische waterkoolstoffen op punt staat, een vloeibaar product oplevert met 31,8 wt% toluen en 33,1 wt% xyleen en onder de veronderstelling dat er een methode bestaat om deze twee industriële chemische grondstoffen uit de output te scheiden. Het derde probleem is reeds overwonnen, aangezien beide chemicaliën industriële chemische grondstoffen zijn en er bijgevolg een voldoende grote markt voor bestaat. Op basis van deze veronderstellingen kan pyrolyseolie tot 581,03 EUR/ton waard zijn zonder rekening te houden met de waarde van het overige gedeelte. Informatie over de kosten is niet terug te vinden. De reden hiervoor is dat de technologie nog in een vroege ontwikkelingsfase zit.

De technieken van selectieve fast pyrolyse zijn nog in vroege ontwikkelingsfase en commerciële toepassingen zijn nog zeer beperkt toepasbaar om specifieke chemicaliën te produceren in hoeveelheden die voldoende zijn om een markt te kunnen bedienen. Drie belangrijke problemen moeten overwonnen worden alvorens men tot een commerciële selectieve fast pyrolyse toepassingen kan komen (Zhu & Lu, 2010). Deze problemen zijn:

- De selectieve fast pyrolyse techniek om chemicaliën in grote hoeveelheid te produceren met een hoge zuiverheid;
- De techniek om de chemicaliën uit pyrolyseolie te halen; en
- De markt voor deze producten moet voldoende groot, toegankelijk en economisch interessant zijn.

Eens deze problemen overwonnen zijn, is selectieve fast pyrolyse een zeer interessante toepassing, omdat men zich kan concentreren op de economisch meest interessante componenten.

3.2.3 HERNIEUWBARE WATERSTOFPRODUCTIE

Het onderzoek naar hernieuwbare waterstofproductie uit biomassa is zoals de meeste technieken in deze masterproef een relatief jong onderzoek. Het onderzoek startte in 1993 door NREL en sindsdien is er veel technisch onderzoek verricht naar de mogelijkheden van het proces en zijn pogingen gedaan om het te verbeteren. Hoofdzakelijk kunnen er twee drijfveren worden aangeduid die het onderzoek naar waterstofproductie doen toenemen. Deze drijfveren zijn enerzijds de stijgende prijzen van fossiele brandstoffen en anderzijds het toenemend besef van de noodzaak om het broeikaseffect onder controle te houden. Het onderzoek spitst zich toe op volgende onderdelen: (Zhang, Li, Zhang, Xu, & Yan, 2012) (Vlaams Instituut voor Wetenschappelijk en Technologisch Aspectenonderzoek (viWTA), 2008)

- Economische analyse van de techniek;
- Optimaliseren van de reactor;
- Thermodynamisch analyses;

- Reactiemechanisme; en
- Katalysatoren.

Waterstof kan voor verschillende doeleinden gebruikt worden, maar hoofdzakelijk voor de opwekking van elektriciteit via brandstofcellen. In die zin kan waterstof zelfs een transportbrandstof zijn als het gebruikt wordt in elektrische voertuigen. Waterstof is een energiedrager²³ die duurzaam, proper en transporteerbaar is. Naast waterstof bestaan er nog een aantal biobrandstoffen. De belangrijkste zijn: bio-ethanol, biodiesel, methanol en pure plantaardige olie (PPO). Deze energiedragers zouden de toekomstige energiemix moeten vormen, maar een belangrijke vraag hierbij is welke energiedrager voor welke toepassing het beste kan worden ingezet. (Vlaams Instituut voor Wetenschappelijk en Technologisch Aspectenonderzoek (viWTA), 2008) (Czernik, Evans, & French, 2007)

In deze toepassing wordt pyrolyseolie gebruikt om er zuivere waterstof uit te halen. Dit is de reden waarom deze toepassing in dit hoofdstuk geplaatst werd. Het verdere gebruik van waterstof is veelzijdig. Zoals reeds aangehaald kan het dienen als transportbrandstof, energiebron of als zuivere grondstof in industriële processen.

Een bondige technologische bespreking van waterstof is terug te vinden in **bijlage 12**.

Bartels, Pate en Olson (2010) geven in hun artikel weer dat de conventionele grondstoffen voor de productie van waterstof steenkool en aardgas zijn. De kost van waterstof schommelt voor beide grondstoffen tussen respectievelijk 0,29 – 1,46 EUR/kg en 1,98 – 2,53 EUR/kg. Ook geven ze aan dat hoewel de productie van waterstof via hernieuwbare grondstoffen duurder is, zijn ze toch niet alleen ecologisch interessant, maar ook economisch interessant. De economische interesse wordt opgewekt door stijgende prijzen van de fossiele brandstoffen. (Bartels, Pate, & Olson, 2010)

Ni et al. (2006) geven aan dat hernieuwbare waterstofproductie met biomassa als grondstof een meer competitieve methode (met de conventionele grondstoffen) is. Zo zou waterstof geproduceerd kunnen worden tegen een kost tussen de 0,91 EUR/kg²⁴ en 1,60 EUR/kg. In vergelijking zou waterstof via windenergie²⁵ een kostprijs hebben tussen de 2,07 EUR/kg en 4,30 EUR/kg. Dit geeft aan dat economisch gezien deze methode eveneens de aandacht opwekt. (Ni, Leung, Leung, & Sumathy, 2006) (Padro & Putsche, 1999)

Pyrolyseolie als geheel of enkel het WSBO gedeelte kan gebruikt worden als input in het productieproces van waterstof. Vooral het gebruik van enkel het WSBO gedeelte maakt

²³ Waterstof is een energiedrager, omdat het geproduceerd wordt. In tegenstelling wordt een energiebron gewonnen. Nadelig aan een energiedrager is dat er energie nodig is voor de productie ervan. (Vlaams Instituut voor Wetenschappelijk en Technologisch Aspectenonderzoek (viWTA), 2008)

²⁴ Waterstof: 8,4 kg/GJ

²⁵ Waterstof wordt hier vaak gebruikt als tussentijds opslagmiddel om een wisselend aanbod op te vangen (op korte termijn) (Vlaams Instituut voor Wetenschappelijk en Technologisch Aspectenonderzoek (viWTA), 2008)

hernieuwbare waterstofproductie economisch interessant. De co-producten (vb. fenolharsen) zullen de waarde van pyrolyseolie doen toenemen. (Czernik, Evans, & French, 2007)

De problemen die tijdens het productieproces vaak terugkomen zijn de vorming van vaste delen en de wrijving die de katalysatoren moeten doorstaan, waardoor de vaak (dure) katalysatoren vernietigd worden. Katalysatoren moeten verbeterd worden (robuuster zijn), net als de processen die voor de omzettingen naar waterstof zorgen. Tot op heden bestaan verschillende processen, maar geen enkel proces heeft een langdurige en optimale werking die op grote schaal aangetoond is. (Czernik, Evans, & French, 2007) (Zhang, Li, Zhang, Xu, & Yan, 2012)

Catalytic steam reforming en steam-iron proces zijn processen die pyrolyseolie als input gebruiken om waterstof te produceren. Elk hebben ze hun eigen karakteristieken die voor- en nadelen hebben. Nadelig is wel dat elke methode slechts in theorie en beperkt experimenteel is aangetoond. Dit is ook de reden dat het gedeelte 'Hernieuwbare waterstofproductie' terug te vinden is in het onderdeel 'Bijna commerciële toepassingen'. (Evans, et al., 2004) (Bleeker, Gorter, Kersten, van der Ham, van den Berg, & Veringa, 2010) (Lea-Langton, Zin, Dupont, & Twigg, 2012)

Deze twee methoden zijn niet de enige die pyrolyseolie omzetten in waterstof. Ook andere methoden worden onderzocht, maar deze staan nog minder ver in hun ontwikkelingsproces als catalytic steam reforming en het steam-iron proces. Een voorbeeld hiervan is chemical looping reforming (een variant op het catalytic steam reforming proces). Het geeft aan dat de huidige processen nog niet optimaal zijn en dat er voortdurend naar nieuwe, betere processen gezocht wordt. (Lea-Langton, ZIn, Dupont, & Twing, 2012)

Catalytic steam reforming en steam-iron proces worden in **bijlage 13** van deze masterproef besproken.

Het gebruik van biomassa/pyrolyseolie om waterstof te produceren is een techniek die nog in ontwikkeling is. Als enkel het WSBO gedeelte van pyrolyseolie gebruikt wordt in de productie van waterstof, dan is de co-productie van andere waardevolle producten een belangrijk element in de waterstofproductie. De kost van de productie per kilogram waterstof wordt geschat op 1,23 EUR tot 2,16 EUR. Deze range hangt af van de schaal en de co-producten. Hoewel waterstof per kilogram 0,31 tot 1,57 EUR kost met kolen als input, kost het tussen 2,14 en 2,73 EUR per kilogram als aardgas als input gebruikt wordt. In vergelijking met conventionele grondstoffen, is biomassa als hernieuwbare grondstof een kostenefficiënt substituut voor de productie van waterstof. (Bartels, Pate, & Olson, 2010)

In deze masterproef gaat de interesse vooral uit naar de waarde van pyrolyseolie. De economische informatie hierover is zeer beperkt, terwijl dit toch de belangrijkste grondstof is. In de meeste bronnen wordt enkel beknopt de aankoopkost van de grondstof weergegeven. De grondstof waarnaar verwezen wordt, is in de meeste gevallen biomassa en niet pyrolyseolie. Er wordt

namelijk vertrokken van het uitgangspunt dat het fast pyrolyseproces het proces van de waterstofproductie vooraf zal gaan en dat het plaatsvindt in hetzelfde productiegebouw. De aankooprij van de grondstof schommelt tussen de 0,77 en 2,15 EUR/GJ. (Bartels, Pate, & Olson, 2010)

De efficiëntie van deze techniek ligt tussen 62,47 en 92,50 % van het stoichiometrisch potentieel. Dit potentieel bedraagt 17,2 gram waterstof per 100 gram pyrolyseolie. Verykios, X. (2004) haalt bijvoorbeeld een opbrengst van 12 gram H₂ per 100 gram pyrolyseolie aan. Bijgevolg geeft een variërende opbrengst en een variërende verkoopwaarde van waterstof (tussen 1,15 EUR en 9,22 EUR per kilogram) een niet-gedetailleerd beeld van de potentiële waarde van pyrolyseolie.

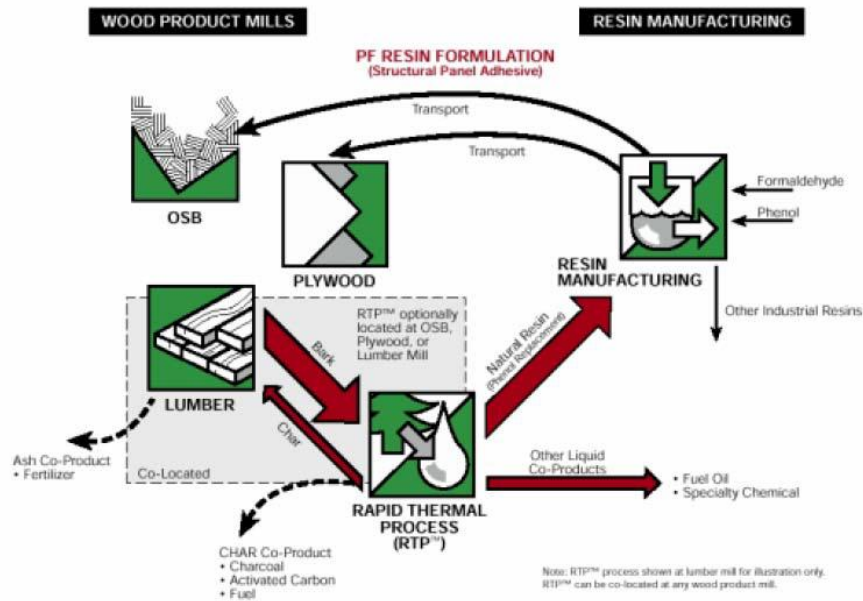
Uit bovenstaande gegevens kunnen enkel volgende resultaten in verband met de waarde van pyrolyseolie afgeleid worden. De kost van het proces varieert tussen 132,16 EUR en 343,66 EUR per ton pyrolyseolie; de opbrengst van het proces varieert tussen 123,67 en 1.466,90 EUR per ton pyrolyseolie.

3.3 BESTAANDE COMMERCIEËLE TOEPASSINGEN

In deze masterproef wordt dezelfde definitie van 'volledig commercieel' gebruikt als in het rapport van Resource Systems Group Inc. (2005): "Het product moet geproduceerd worden in voldoende grote hoeveelheden via methoden die commerciële mogelijkheden bieden. Het product moet verkocht zijn geweest aan eindconsumenten of bedrijven die het succesvol hebben geïncorporeerd in hun producten. Daarnaast moet het product geproduceerd zijn onder normale marktomstandigheden zonder substantiële subsidies.". De bestaande commerciële chemische toepassingen van pyrolyseolie zijn niet eindeloos. Er is van de bestaande toepassingen dan ook nog zeer weinig informatie over beschikbaar. Twee bestaande commerciële toepassingen worden besproken: natuurlijke harsen en het model gebaseerd op voedseladditieven.

3.3.1 NATUURLIJKE HARSEN

Natuurlijke harsen kunnen een substituut zijn voor de fenolharsen afkomstig uit de petrochemische industrie. Ze worden verwerkt in de productie van fenol formaldehyde harsen. Deze harsen worden wereldwijd gebruikt als lijm en bindmiddel in de productie van multiplex platen en composiet platen (MDF, OSB, ..). Idealiter kan een productiefabriek van hout geografisch kort bij een bio-raffinaderij liggen, zodat afvalproducten van deze fabriek als input voor de bio-raffinaderij kunnen dienen. Omgekeerd kunnen de natuurlijke harsen als input voor de hout productiefabriek gebruikt worden (bioplex). Onderstaande figuur geeft deze wisselwerking weer.



Figuur 26: OSB model (Resource Systems Group Inc., 2005)

Wetenschappelijk onderzoek, geleid door Ensyn en met een kost van 2,4 miljoen US dollar, heeft aangetoond dat 40-60% van de harsen uit een OSB plaat gesubstitueerd kunnen worden door natuurlijke harsen. Dit kan zonder kwaliteitsverlies en met behoud van APA industrie standaarden. Ook werden geen verschillen gevonden tussen een OSB plaat met harsen afkomstig van petrochemische industrie en een OSB plaat met harsen afkomstig van een bio-raffinaderij. Andere onderzoeken hebben aangetoond dat het substitutiepercentage over verschillende houtproducten heen varieert tussen 25 en 75%. (Resource Systems Group Inc., 2005) (Athanassiadou, 2008)

Economisch is weinig informatie te vinden over de productie van natuurlijke harsen. Dit heeft vooral te maken met het feit dat het onderzoek grotendeels geleid wordt door het bedrijf Ensyn die de informatie hieromtrent intern houdt. Wel is geweten dat er geen verschil is in eindproducten waarbij natuurlijke harsen gebruikt worden in vergelijking met de conventionele platen. Daarnaast kan een OSB plaat die gedeeltelijk vervaardigd werd uit natuurlijke harsen een EcoLogo label (zie onderstaande figuur) krijgen, waardoor de mogelijkheid bestaat om een premium prijs te vragen voor deze producten, al is het onduidelijk of dit ook in praktijk toepasbaar is en/of toegepast wordt. (Resource Systems Group Inc., 2005)



Figuur 27: EcoLogo (Terrachoise)

Ondanks de beperkte informatie, kan wel degelijk aangetoond worden dat natuurlijke harsen economisch interessant zijn. Allereerst bestaat een grote markt voor natuurlijke harsen, omdat ze verwerkt kunnen worden in multiplex platen, OSB platen, MDF platen en spaanplaten. De platen worden gefabriceerd door houtdelen, houtvezels en houtstrengen te mixen of te coaten met een mengeling van hars en andere toevoegingen om een composiet materiaal te vormen. Dit alles wordt door middel van een hete drukpers omgevormd tot platen. Wereldwijd worden jaarlijks 427,32 miljoen m³ houten platen met fenolharsen erin gefabriceerd. Hiervoor is een totaal van 21 miljoen ton fenolhars nodig. Ten tweede is er relatief gezien een grote opbrengst aan natuurlijke harsen uit pyrolyseolie (tot 30 wt% ds). Ten derde is de kostprijs van biomassa interessanter, nu ruwe olie steeds duurder wordt. Als vierde kan ook gesteld worden dat fenol een relatief dure chemische stof is (1.433 EUR/ton). Ten vijfde zijn natuurlijke harsen afkomstig van hernieuwbare bronnen wat het interessant maakt voor bijvoorbeeld politieke steun. Ten slotte is aangetoond door Nakos et al. (2001) dat de natuurlijke hars een lagere toxiciteit heeft dan fenol uit de petrochemische industrie. (Effendi, Gerhauser, & Bridgwater, 2008) (Athanassiadou, 2008) (Nakos, Tsiantzi, & Athanassiadou, 2001)

3.3.1.1 PROCESBESCHRIJVING

Vooraleer gestart kan worden met de beschrijving van het chemisch proces dat pyrolyseolie gedeeltelijk kan omzetten in natuurlijke harsen, dient eerst de input bekeken te worden. Pyrolyseolie kan als geheel gebruikt worden, maar ook kan enkel het WIBO gedeelte als input gebruikt worden. Het grootste deel van het niet-oplosbare gedeelte van pyrolyseolie zijn namelijk lignine afgeleide componenten. Deze lignine afgeleide componenten kunnen onder invloed van warmte gedepolymeriseerd worden tot monomeer en oligomeer fenol componenten. Dit maakt het interessant om enkel het WIBO gedeelte van pyrolyseolie als input te gebruiken, aangezien WSBO niet zal bijdragen aan de fenolopbrengst, terwijl WSBO andere toepassingen heeft. (Effendi, Gerhauser, & Bridgwater, 2008)

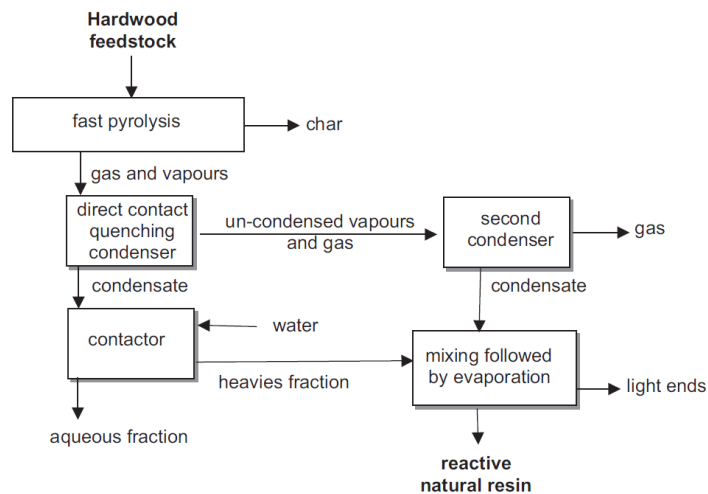
Volgens Ensyn kan de natuurlijke hars afkomstig van pyrolyseolie (volgens het gepatenteerde proces: Rapid Thermal Processing (RTP)²⁶) als geheel een substituut zijn voor fenol en/of voor formaldehyde in fenol bevattende harsen. Aangezien deze natuurlijke hars fenol en neutrale componenten bevat kan bij de synthese van formaldehyde gebruik gemaakt worden van de aldehyde groepen uit het neutrale gedeelte. (Effendi, Gerhauser, & Bridgwater, 2008)

Het proces heeft als input biomassa. Via RTP wordt pyrolyseolie verkregen. De reactieve componenten worden eruit gehaald door middel van destillatie en evaporatie. Dit proces wordt verder gezet om bepaalde geur dragende, alsook zure componenten te verwijderen. Het product

²⁶ (Feel & Graham, 1998)

dat na dit proces bekomen wordt, wordt door Ensyn omschreven als een natuurlijke hars die zonder verdere bewerking klaar is voor gebruik als lijm en bindmiddel voor platen. Het fenolgehalte in de natuurlijke hars (reactieve gedeelte) is ruw geschat (en afhankelijk van procesfactoren en input) 30-80wt%. Ter vergelijking is het zuivere fenolgehalte in pyrolyseolie gemiddeld 1-4wt%. (Effendi, Gerhauser, & Bridgwater, 2008)

Het proces, volgens het proces afgebeeld in onderstaande figuur, levert een vloeistof op na de eerste condensator van gemiddeld 40-60 wt% en na de tweede condensator van gemiddeld 12-25 wt%. Na evaporatie blijft nog maximaal 64% van deze vloeistof over als natuurlijke hars. (Effendi, Gerhauser, & Bridgwater, 2008)



Figuur 28: Typische proces voor de isolatie van natuurlijk hars uit pyrolyseolie (gepatenteerd²⁷) (Effendi, Gerhauser, & Bridgwater, 2008)

Een optie in het proces kan zijn een mengeling te gebruiken van pyrolyseolie en/of het toevoegen van notenschalen en/of lignine. Dit zou het mogelijk maken om tot 80% van de conventionele hars te substitueren door natuurlijke hars. Dit proces is gepatenteerd²⁸, maar in de literatuur is geen bevestiging te vinden over de resultaten van deze optie en ook bestaan er nog geen commerciële toepassingen die deze optie verwerkt in zijn proces. (Effendi, Gerhauser, & Bridgwater, 2008)

Een andere optie is om de pyrolyseolie te fractioneren, hierdoor ontstaat een grote zuiverheid in de natuurlijke hars waardoor het substitutiepercentage toeneemt. Hiervoor bestaan verschillende mogelijkheden, maar deze zijn economisch niet interessant omdat ze dure chemicaliën als input vereisen. (Effendi, Gerhauser, & Bridgwater, 2008)

²⁷ (Giroux, Freel, & Graham, 2001) & (Giroux, Freel, & Graham, 2003)

²⁸ (Vergopoulou-Markessini & Thessaloniki, 2003)

3.3.1.2 BEREKENING WAARDE PYROLYSEOLIE

Om economisch rendabel te zijn als natuurlijk hars producerende onderneming, moet het substitutiepercentage van deze natuurlijke hars boven de 40% liggen en mag de prijs van pyrolyseolie maximaal 50% van de prijs van fenol bedragen. (Nakos, Tsiantzi, & Athanassiadou, 2001)

Wetenschappelijke testen met natuurlijke harsen verkregen via bovenstaand proces hebben positieve resultaten opgeleverd met substitutiepercentages tot 60%. Het resultaat hierbij was dat er geen significante verschillen zijn tussen deze platen en de platen gefabriceerd met conventionele harsen. Aan de eerste voorwaarde voor economische rendabiliteit kan voldaan worden. (Effendi, Gerhauser, & Bridgwater, 2008)

Fenol heeft een marktwaarde van ongeveer 1.433 EUR/ton (Reed Business Information Limited, 2011). Om economisch rendabel te zijn, kan de maximale aankoopprijs van pyrolyseolie maximaal 716,50 EUR/ton bedragen. In de inleiding van deze masterproef werd een productiekost per ton pyrolyseolie bepaald van 259,32 EUR. Deze ligt een stuk lager dan de maximale aankoopprijs van pyrolyseolie.

Bijgevolg is het redelijk te veronderstellen dat dit een rendabel proces kan zijn. Daarnaast is het WSBO gedeelte van pyrolyseolie een afvalproduct van het proces. Indien de waarde van het WSBO gedeelte in rekening gebracht wordt, kan de waarde van pyrolyseolie nog hoger liggen.

3.3.2 MODEL GEBASEERD OP VOEDSELADDITIEVEN

De bestaande commerciële toepassingen gebaseerd op voedseladditieven is afkomstig van twee ondernemingen die het proces uitgewerkt hebben: Red Arrow en Ensyn. Beide bedrijven produceren voedseladditieven uit pyrolyseolie. Red Arrow heeft de techniek ontwikkeld en Ensyn heeft het geïntegreerd in een bioplex. Binnen de samenwerking tussen de twee ondernemingen verzorgt Red Arrow de ontwikkeling en de marketing en draagt Ensyn bij door hun kennis in de commerciële productie van pyrolyseolie. In de onderneming worden voedseladditieven (zeer waardevolle producten) uit biomassa geëxtraheerd. Volgens hun website produceren ze gecondenseerde natuurlijke rook smaakstoffen die smaken benaderen van gerookt, gegrild, geroosterd, gesauteerd, gebakken, gekarameliseerd en gefrituurd voedsel. Restfracties worden omgezet in energie. De eindproducten zijn bekend, maar de technieken zijn geheim. Hun model verwerkt tot 100 ton biomassa per dag. (Resource Systems Group Inc., 2005)

Aangezien er geen financiële informatie beschikbaar is over dit model, kan de waarde van pyrolyseolie niet berekend worden. Wel kan geconcludeerd worden dat het proces rendabel is, omdat Red Arrow een commerciële onderneming is die sinds de jaren 1960-1970 de processen

bezit en kan overleven in de industrie van voedseladditieven. (Red Arrow Products Company LLC, 2010)

3.4 DEELCONCLUSIE

In dit hoofdstuk is de waarde van pyrolyseolie via uiteenlopende toepassingen bepaald. Eerst werd getracht een waardebepaling per component uit te voeren. Er is geen kosteninformatie beschikbaar, maar de opbrengsten situeren zich rond 6.000,00 EUR/ton.

Ten tweede werd de waarde bepaald aan de hand van bijna commerciële toepassingen. Industriële chemische grondstoffen, selectieve fast pyrolyse en hernieuwbare waterstofproductie zijn de drie besproken toepassingen. De toepassing van pyrolyseolie als bron voor industriële chemische grondstoffen heeft twee mogelijkheden voor de input, namelijk enkel het WIBO gedeelte of pyrolyseolie als geheel. De opbrengst bedraagt respectievelijk 184,27 – 498,47 EUR/ton en 197,01 – 324,84 EUR/ton. Over de kosten van dit proces is enkel informatie over de kost van waterstof beschikbaar. De kost bedraagt 20,09 – 271,84 EUR/ton (enkel WIBO gedeelte als input) of 3,77 – 30,20 EUR/ton (pyrolyseolie als input). Licht aromatische waterkoolstoffen werden besproken als voorbeeld van een selectief fast pyrolyseproces. Kosteninformatie is niet beschikbaar; de opbrengst van dit proces bedraagt 581,03 EUR/ton. Hernieuwbare waterstofproductie tenslotte geeft een opbrengst tussen 150,09 – 1.466,90 EUR/ton met een bijhorende kost tussen 132,16 EUR/ton en 343,66 EUR/ton.

Als laatste werden de commerciële toepassingen besproken. Het grote probleem hierbij is dat belangrijke informatie intern wordt gehouden en dat processen gepatenteerd zijn. De twee besproken toepassingen zijn natuurlijke harsen en het model gebaseerd op voedseladditieven. Over het model gebaseerd op voedseladditieven is zeer weinig economische informatie beschikbaar. Wel is geweten dat voedseladditieven een hoge waarde hebben. Informatie over natuurlijke harsen beperkt zich tot de regel dat de kost van pyrolyseolie maximaal 50% mag bedragen van de kost van fenol. Hieruit wordt afgeleid dat de maximale waarde van pyrolyseolie fluctueert met de waarde van fenol en ongeveer 716,50 EUR bedraagt.

De toepassing van pyrolyseolie als chemicaliën geeft interessante resultaten weer. De waarde van pyrolyseolie loopt bij een aantal toepassingen hoog op. De waarde is veel hoger dan de productiekost ervan. Het grote probleem is dat er bij de methoden geen gedetailleerde kostenberekening opgenomen kan worden, omdat hierover geen informatie beschikbaar is in de literatuur. De belangrijkste reden hiervoor is dat de stabiliteit en de schaalbaarheid van de processen moet worden aangetoond, vooraleer het zinvol is om een kostenanalyse van de verschillende processen uit te voeren.

Onderstaande figuur vat deze resultaten samen.

<p>WAARDEBEPALING PER COMPONENT</p> <p>R_{PO} 183,25-11.817,15 EUR/ton Kost: onbekend</p>
<p>BIJNA COMMERCIEËLE TOEPASSINGEN</p> <p>Industriële chemische grondstoffen R_{PO} 197,01-324,84; R_{WSBO} 184,27-498,47 C_{PO} 0,00-46,47; C_{WSBO} 0,00-418,22 (enkel H₂)</p> <p>Selectieve fast pyrolyse R_{PO} 581,03 EUR/ton Kost: onbekend</p> <p>Hernieuwbare waterstofproductie R_{PO} 123,67-1.466,90 EUR/ton C_{PO} 132,16-343,66 EUR/ton</p>
<p>BESTAANDE COMMERCIEËLE TOEPASSINGEN</p> <p>Natuurlijke harsen V_{PO} 716,50 EUR per ton</p> <p>Voedseladditieven Opbrengst: hoog Kost: onbekend</p>

Figuur 29: Conclusie toepassing van pyrolyseolie als grondstof voor chemicaliën

HOOFDSTUK IV: TOEPASSING ALS TRANSPORTBRANDSTOF

Ruwe pyrolyseolie, die verkregen wordt na fyto-remediatie, vindt geen onmiddellijke toepassing als transportbrandstof. Er zijn te veel negatieve effecten ten gevolge van de complexe samenstelling en de karakteristieken van de pyrolyseolie. De belangrijkste karakteristieken en de bijhorende effecten die het onmogelijk maken ruwe pyrolyseolie te gebruiken als transportbrandstof zijn opgesomd in onderstaande tabel.

Tabel 21: Karakteristieken van pyrolyseolie (Bridgwater A. , 2011)

Karakteristieken	Oorzaken	Effecten
Char	Onvolledige scheiding olie-char	Veroudering; sedimentatie; blokkade van filters, katalysatoren en injectoren
Heterogeniteit	Slechte scheiding	Fasescheiding; slechte mengbaarheid; inconsistentie in behandeling, opslag en bewerking
Lage pH	Organische zuren uit biopolymeer degradatie	Corrosie van pijpleidingen en opslagvaten
Niet-compatibiliteit van materialen	Fenolen en aromaten	Destructie van rubbers en dichtingen
Structuur	Ontstaat uit snelle de-polymerisatie en snelle afkoeling van dampen en aërosolen (eigenschap van pyrolyse)	Geeft aanleiding tot hogere viscositeit en fasescheiding
Temperatuur afhankelijk	Onvolledige reacties	>100 °C: irreversibele decompositie in twee fasen >60 °C: irreversibele toename in viscositeit en potentiële fasescheiding
Veroudering	Secundaire reacties (vb. door aanwezige char-delen)	Trage toename in viscositeit
Vervuiling van biomassa	Biomassa uit fyto-remediatie	Gezondheidseffecten; kunnen optreden als katalysatoren
Viscositeit	Chemische samenstelling van pyrolyseolie	Relatief hoog en tijdsafhankelijk; meer temperatuur afhankelijk dan bij fossiele brandstoffen; hogere pomp- en installatiekosten
Watergehalte (15-30 wt%)	Water in biomassa; eigenschap van pyrolyse	Complexe invloed op viscositeit en stabiliteit; hoe hoger watergehalte hoe lager LHV, stabiliteit, concentratie en hoe hoger de pH; beïnvloeding katalysatoren
Zuurstofgehalte (40-50 wt%)	Samenstelling biomassa	Lage stabiliteit; niet mengbaar met waterkoolstoffen

Pyrolyseolie heeft slechts enkel toepassingsmogelijkheden als het als onbewerkte input gebruikt wordt. Direct boiler verbranding of gebruik in bepaalde types turbinemotoren of dieselmotoren zijn mogelijke statische toepassingen waarbij elektriciteit en/of warmte wordt opgewekt. Hiervoor zijn wel significante aanpassingen aan de motoren noodzakelijk. Deze toepassingen zijn reeds in hoofdstuk II van deze masterproef uitgewerkt. (Elliot, 2007)

Upgrading van de pyrolyseolie is een techniek om te komen tot olie van een hogere kwaliteit en bijgevolg meer toepassingsmogelijkheden te hebben. Hierbij wordt de chemische structuur getransformeerd om de volatiliteit en thermische stabiliteit te verhogen. Daarnaast wordt de viscositeit verlaagd door de zuurstof te verwijderen en het molecuulgewicht te verlagen. (Elliot, 2007)

Er bestaan drie groepen van methoden om pyrolyseolie te upgraden: fysisch, chemisch en katalytisch. De fysische upgradingsmethoden kunnen de kwaliteit van de pyrolyseolie verhogen, maar onvoldoende om als transportbrandstof gebruikt te worden. Een aantal eigenschappen (hoge zuurstofgehalte, lage pH en lage verbrandingswaarde) blijven namelijk onveranderd. Fysische upgrading kan wel voldoende zijn voor gebruik in statische toepassingen. Wegens bepaalde chemische eigenschappen van pyrolyseolie dienen hierbij wel aanpassingen aan de motoren gemaakt te worden (zie hoofdstuk II). (Ringer, Putsche, & Scahill, 2006)

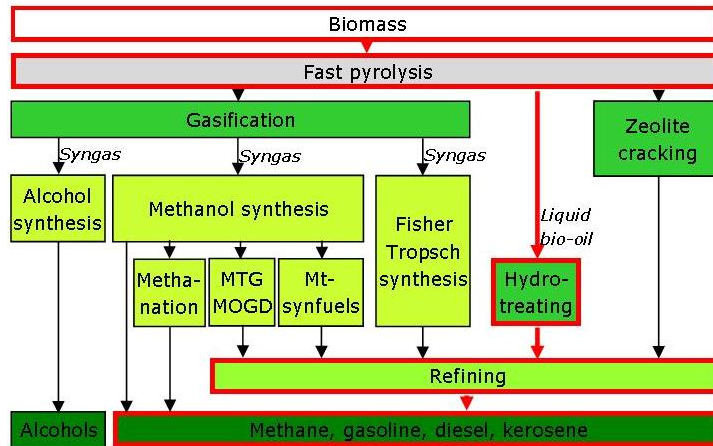
Het upgraden van pyrolyseolie tot transportbrandstoffen zoals diesel, benzine, kerosine, methaan en LPG vereist chemische of katalytische upgrading. Hierbij wordt het zuurstofgehalte sterk verlaagd (de-oxygenatie) en vindt een substantiële vervorming plaats van de pyrolyseolie waarbij de negatieve effecten in bovenstaande tabel verminderd en/of vermeden worden. Daarnaast wordt het molecuulgewicht sterk verlaagd. (Elliot, 2007) (Bridgwater A. , 2011)

Er bestaan enkele methoden om pyrolyseolie chemisch/katalytisch te upgraden tot transportbrandstoffen:

- Hydroprocessing;
- Katalytisch kraken met behulp van zeolieten;
- Vergassing voor synthetische brandstoffen; en
- Omvormen WSBO.

In dit hoofdstuk wordt elke methode bondig besproken, behalve het omvormen van WSBO. Dit deel is reeds besproken in hoofdstuk III (hernieuwbare waterstofproductie). In de eerste delen van dit hoofdstuk wordt duidelijk gemaakt wat de mogelijkheden van de processen zijn. De technologie wordt in **bijlage 14** besproken. Economisch gerelateerde data is in dit deel opgenomen. Op het einde van dit hoofdstuk wordt de informatie geanalyseerd om de waarde van pyrolyseolie te bepalen.

4.1 HYDROPROCESSING



Figuur 30: Van biomassa tot transportbrandstoffen via hydroprocessing (Bridgwater A. , 2011)

Hydroprocessing van pyrolyseolie wordt uitgevoerd in twee stappen: hydrotreating en hydrocracking. In de eerste stap wordt de pyrolyseolie gedeeltelijk geüpgraded tot een meer stabiele olie met hogere energiedichtheid zodat deze de hevige condities van de tweede stap kan doorstaan. Door zuurstof te elimineren in de vorm van H_2O en CO_2 wordt het zuurstofgehalte van de pyrolyseolie drastisch verlaagd (lager dan 5% is vereist om als transportbrandstof bruikbaar te zijn (Huber, Iborra, & Corma, 2006)). Hydrotreating wordt uitgevoerd in een overvloed aan waterstof, in de aanwezigheid van katalysatoren en onder hoge druk. In een tweede stap wordt de pyrolyseolie verder geüpgraded (verfijning) tot transportbrandstoffen. Het is de tweede stap die mogelijk kan uitgevoerd worden in conventionele installaties. (Elliott, Hart, Neuenschwander, Rotness, & Zacher, 2009)

Beide stappen kunnen ook gecombineerd worden in een één stap proces: nonisothermal reactor system. Twee temperatuurniveaus worden gebruikt zodat beide stappen worden uitgevoerd zonder tussenproducten of een productscheiding. Het effect hiervan is dat verliezen worden geminimaliseerd en kosten worden bespaard. (Elliott, Hart, Neuenschwander, Rotness, & Zacher, 2009) (Huber & Corma, 2007)

De mogelijkheid bestaat om pyrolyseolie slechts gedeeltelijk te upgraden (enkel hydrotreating) en vervolgens verder te verwerken in een conventionele raffinaderij. Het voordeel van een verdere verwerking in dezelfde installaties als conventionele brandstoffen is dat er gebruik kan gemaakt worden van de reeds opgebouwde kennis en ervaring. Ook zal het investeringsbedrag een pak lager liggen. (Bridgwater A. , 2011)

Dit heeft echter ook nadelen. Zo zal de olie na hydrotreating een extra stap moeten ondergaan omdat het contaminanten bevat die schadelijk zijn voor conventionele installaties. Het is duidelijk dat er voor- en tegenstanders zijn van 'co-processing'. De voorstanders van co-processing halen

hoofdzakelijk de kennis en infrastructuur aan die reeds aanwezig is; de tegenstanders wijzen op de unieke samenstelling van pyrolyseolie in vergelijking met zijn fossiel substituut wat verdere verwerking ingewikkeld maakt. (Holmgren, Gosling, Marinageli, Marker, Faraci, & Perego, 2007)

Het resultaat van hydrotreating in twee aparte stappen is een opbrengst aan olie van 0,43 L per L input. De consumptie van waterstof bedraagt 728 L per L input. Het zuurstofgehalte bedraagt nog 2,3% en de H/C ratio van de olie is gestegen tot 1,67. (Elliot, 2007)

Het resultaat van hydrotreating in één stap (nonisothermal hydrotreatment) is een olie (0,44 L olie per L input) met een zuurstofgehalte van 2-3 wt %, een H/C-ratio van 1,5 en een dichtheid van 0,86g/ml. Het verbruik aan waterstof blijft ongeveer hetzelfde als bij het proces in twee aparte stappen. Van de output is 50-60% in het kookpuntgebied van benzine. Uit de restfractie kan ongeveer 30% diesel worden gehaald. Het overige is residu. Op basis van berekeningen toont Elliot (2007) aan dat het mogelijk kan zijn een steady-state proces te verkrijgen met een output van 0,50 tot 0,55 L per L input. Dit steady state proces zou dus per liter input een output hebben waarvan 25-30% benzine is en 7,5-9% diesel is. (Elliot, 2007)

Huber et al. (2006) geven ook een opbrengstanalyse weer in hun artikel (overgenomen van Elliott en medewerkers). Hydroprocessing wordt in twee aparte stappen uitgevoerd. Ze geven een resultaat van 0,4 L output per L pyrolyseolie als input. Hun olieproduct heeft een zuurstofgehalte lager dan 1 wt%. De olie bestaat uit aromaten en olefine met een verhouding tussen 38/62 en 22/78. Het feit dat de olefine opbrengst groter is, is vooral te wijten aan het type katalysator dat gebruikt wordt. Daarnaast geven ze de belangrijkste problemen die voorkomen tijdens hydroprocessing weer. Deze zijn de stabiliteit van de katalysatoren en de vorming van cokes. (Huber, Iborra, & Corma, 2006)

In een studie door Jones et al. (2009) werd het proces, dat tot op heden enkel op kleine schaal (in laboratoria) is getest, geschaald naar een economisch haalbaar model. In hun model werd dagelijks 2.000 ton ds biomassa verwerkt. Op jaarbasis zou dit 288 miljoen liter brandstof opleveren. Dit project vereist een investering van 157,68 miljoen EUR. Ze berekenden een minimale verkoopprijs van 0,38 EUR per liter brandstof, rekening houdend met een aankoop prijs van biomassa aan 42,52 EUR per ton ds.

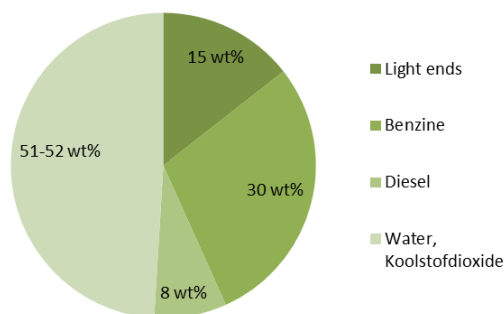
De berekeningen uitgevoerd door Jones et al. (2009) zijn gedetailleerd en op een zeer grote schaal uitgevoerd. De berekeningen zijn uitgevoerd op basis van een uitvoerige literatuurstudie en met behulp van gespecialiseerde computersoftware. Hun schaal is dermate groot dat een vergelijking van de minimale verkoopprijs met de Noorderkempen uitgesloten is. Eventueel een nieuwe berekening op een (veel) kleinere schaal zou duidelijkheid kunnen brengen, maar belangrijke informatie over operationele kosten ontbreken. Zo zijn de eenheidskosten weergegeven, maar de hoeveelheid die jaarlijks gebruikt of verbruikt wordt, ontbreekt.

In hun analyse worden wel een aantal belangrijke assumpties gemaakt. Zo gaat hun analyse ervan uit dat de techniek reeds verder gevorderd is op de leercurve (niet de eerste, maar de "n^{de}" bio-raffinaderij) en dat de techniek op punt staat om zonder problemen transportbrandstoffen te produceren. Ze veronderstellen hiervoor dat tegen 2015 de meeste problemen aangepakt zullen zijn. Tot slot kan de vraag gesteld worden hoe ecologisch deze brandstofproductie is, omdat er naast de input aan biomassa ook nog een input is aan aardgas voor de productie van waterstof. De verhouding tussen de input van aardgas en biomassa is ongeveer 35/65. (Jones, et al., 2009)

Het resultaat van hydrotreating uitgevoerd door Jones et al. (2009) is een olie met een laag zuurstofgehalte (ongeveer 2%) en is een mengeling van waterkoolstoffen. Het heeft een HHV van 40,94 MJ/kg en een LHV van 38,61 MJ/kg. Dit product dient verder geüpgraded te worden in een conventionele raffinaderij tot een mix van transportbrandstoffen. Wanneer er geen wisselwerking kan zijn met een conventionele raffinaderij, stijgt de minimale verkoopprijs van 0,38 EUR per liter naar 0,45 EUR per liter brandstof. De investering neemt ook toe tot 254,13 miljoen EUR. (Jones, et al., 2009)

Marker et al. (2005) geven in hun artikel informatie weer over hydrotreating van WIBO. De moleculaire structuur van WIBO zorgt ervoor dat door het verwijderen van zuurstof, aromaten gevormd worden waarvan het kookpunt in het gebied van benzine zit. WIBO heeft ook een lager gehalte aan zuurstof, wat de waterstofconsumptie doet dalen. De output van hydrotreating (opbrengst aan olie van 40,8%) is een product waarvan 60% vergelijkbaar is met benzine. De output van hydrotreating en hydrocracking (opbrengst aan olie van 32,4%) is een verdere daling van het zuurstofgehalte en een product waarvan 80% vergelijkbaar is met benzine. Ze geven aan dat deze resultaten nog verhoogd kunnen worden door de optimalisatie van het proces en de optimalisatie van de katalysatoren. (Marker, et al., 2005)

De conclusies van Marker et al. (2005) worden in onderstaande figuur samengevat. De input van WIBO wordt gelijkgesteld aan 100 wt%. De input aan waterstof schommelt dan tussen 4-5 wt% ten opzichte van de input aan WIBO. De producten zijn samengevat in onderstaande figuur.



Figuur 31: Geschatte productopbrengst van het hydrotreating en hydrocracking van WIBO (Marker, et al., 2005)

De hoge zuurtegraad maakt het moeilijk om zonder voorbehandeling of aanpassing hydrotreated olie verder te upgraden in conventionele installaties. Installaties moeten worden aangepast (bijvoorbeeld door een ontwerp bestaande uit roestvrijstaal type 317). (Marker, et al., 2005)

Tot slot wordt de waarde van pyrolyseolie bepaald aan de hand van verschillende bronnen.

Op basis van het artikel van Jones et al. (2009) kan een waarde voor pyrolyseolie bepaald worden. Bij de minimale verkoopprijs wordt rekening gehouden met een aankoopprijs van biomassa van 42,52 EUR/ton. Op basis van de formule van Bridgwater (2011) die de productiekost van pyrolyseolie bepaalt, kan de minimale waarde van pyrolyseolie bepaald worden.

$$\text{Productiekost pyrolyseolie} \left(\text{in } \frac{\text{EUR}}{\text{ton}} \right) = 1,1 * [(B + (H * 16.935 * F^{-0,33})) Y^{-1}$$

$$\text{Productiekost pyrolyseolie} \left(\text{in } \frac{\text{EUR}}{\text{ton}} \right) = 1,1 * [(42,25 + (0,18 * 16.935 * 21.000^{-0,33})) 0,65^{-1}$$

$$\text{Productiekost pyrolyseolie} \left(\text{in } \frac{\text{EUR}}{\text{ton}} \right) = 264,79 \frac{\text{EUR}}{\text{ton}}$$

De waarde van pyrolyseolie bedraagt 264,79 EUR per ton. Aangezien de minimale verkoopprijs van brandstof vrij laag ligt in vergelijking met de huidige brandstofprijzen is er nog marge op de waarde van pyrolyseolie. Daarentegen zal de enorm grote schaal waarop dit artikel gebaseerd is in de Noorderkempen niet haalbaar zijn. Een exacte waarde kan niet bepaald worden, omdat gedetailleerde informatie ontbreekt.

Op basis van het artikel van Jones et al. (2009) kan het potentieel van een statische toepassing na hydrotreating van pyrolyseolie onderzocht worden. De relatief grote energie-inhoud zorgt voor potentieel, maar hierbij dient wel rekening gehouden te worden met de kost van hydrotreating. Vooral de kost van waterstof zal het potentieel van deze toepassing kunnen bedreigen. De waterstofconsumptie schommelt namelijk rond 600 liter per liter olie. Hydrotreating loont pas als de output bestaat uit waardevolle producten. Uit het deel over hernieuwbare waterstofproductie weten we dat de kost van het proces voor waterstofproductie varieert tussen 132,16 EUR en 343,66 EUR per ton pyrolyseolie. Rekening houdend met een productie van 12,9 g per 100 g pyrolyseolie (75% van het stoichiometrisch potentieel) ligt de productiekost van waterstof voor 600 liter (of 42,6 kg²⁹) tussen 43,64 en 113,49 EUR per ton pyrolyseolie. Zonder rekening te houden met kapitaalkosten en andere proces gerelateerde kosten stijgt de inputkost van 0,31 EUR per liter (enkel pyrolyseolie) naar 0,40 EUR per liter³⁰ (pyrolyseolie en gemiddelde kost waterstof). Dit terwijl de energie-inhoud meer dan verdubbeld (van 17,5MJ/kg naar 38,61 MJ/kg). Deze berekening toont aan dat het potentieel van een statische toepassing na hydrotreating van

²⁹ Waterstof (vloeibaar) heeft een dichtheid van 71 gram per liter. (H₂ NWV)

³⁰ Op basis van het gemiddelde van 43,64 en 113,49 EUR per ton pyrolyseolie en een dichtheid van 1,2 kg/liter voor pyrolyseolie. (Bridgwater A. , 2011)

pyrolyseolie bestaat. De vraag die rest is als de output van een statische toepassing economisch vergelijkbaar is met die van transportbrandstoffen. Dit is niet onmiddellijk vergelijkbaar, omdat om transportbrandstoffen te verkrijgen nog extra stappen noodzakelijk zijn. Als conclusie kan hier gesteld worden dat de methode om hydrotreated pyrolyseolie te verwerken in een statische toepassing potentieel kan hebben, maar dat een gedetailleerde economische analyse noodzakelijk is. Dit wordt echter niet in deze masterproef onderzocht.

Op basis van de conclusies van Marker et al. (2005) kan enkel de waarde van pyrolyseolie bepaald worden, alsook de kost van de input. Proceskosten en kapitaalkosten kunnen niet bepaald worden. In het artikel wordt pyrolyseolie gescheiden en enkel het WIBO gedeelte verder geüpgraded. Naast de input aan pyrolyseolie (100 wt%) is er ook de input aan waterstof (4-5 wt%).

Tabel 22: Inputkost voor upgraden WIBO volgens Marker et al. (2005)

Input	WIBO	Waterstof
wt%	100	4-5
EUR/ton input WIBO	259,32 ³¹	40,98-133,20 ³²

De totale inputkost bedraagt gemiddeld 346,41 EUR/ton. De waarde van de output is weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 23: Waarde van de output bij upgraden WIBO volgens Marker et al. (2005)

Input	Benzine	Diesel
wt%	30	8
EUR/ton input WIBO	625,77 ³³	135,45 ³⁴

De waarde van de output (zonder water en light ends) bedraagt 761,22 EUR per ton input aan WIBO. Naast de kostprijs van WIBO van 259,32 EUR per ton is er nog een marge van 414,81 EUR per ton WIBO voor het dragen van enerzijds de kapitaalkosten en anderzijds de andere operationele kosten. Gedetailleerde informatie hierover ontbreekt om de exacte waarde van pyrolyseolie te bepalen.

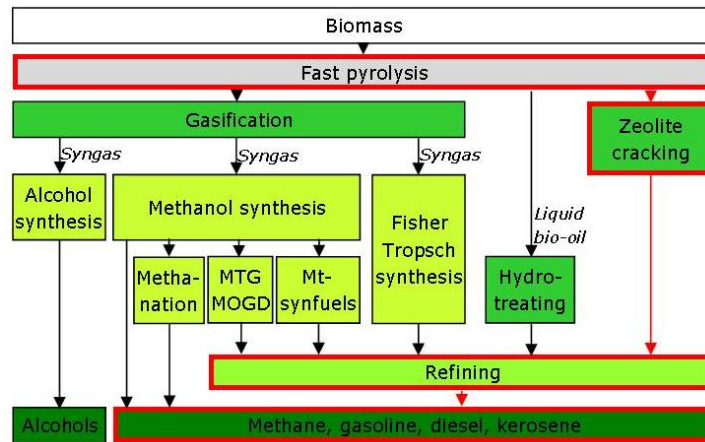
³¹ Onder de assumptie dat WIBO een gelijke waarde heeft als WSBO.

³² Op basis van 12,9 g per 100 g pyrolyseolie (75% van het stoichiometrisch potentieel) en een productiekost van waterstof tussen 132,16 en 343,66 EUR per ton pyrolyseolie (zie hernieuwbare waterstofproductie).

³³ Dichtheid benzine: 0,745 kg/liter en een verkoopprijs van 1,554 EUR/liter (maart 2012) (Europe's energy Portal, 2012)

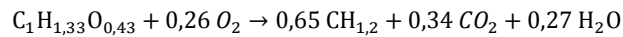
³⁴ Dichtheid biodiesel: 0,880 kg/liter en een verkoopprijs van 1,490 EUR/liter (april 2012) (Europe's energy Portal, 2012)

4.2 KATALYTISCH KRAKEN

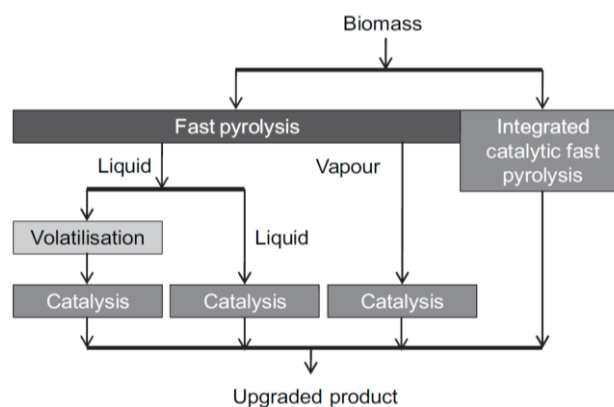


Figuur 32: Katalytisch kraken (Bridgwater A. , 2011)

Het verschil met hydroprocessing is dat bij katalytisch kraken zuurstof verwijderd wordt in de vorm van CO₂. Het proces maakt enkel gebruik van katalysatoren en niet van de combinatie waterstof en katalysatoren zoals bij hydroprocessing. Het grote voordeel van dit proces is dan ook dat de dure input van waterstof vermeden wordt. Katalytisch kraken kan op verschillende manieren uitgevoerd worden (zie onderstaande figuur), maar maakt steeds gebruik van volgende conceptuele vergelijking:



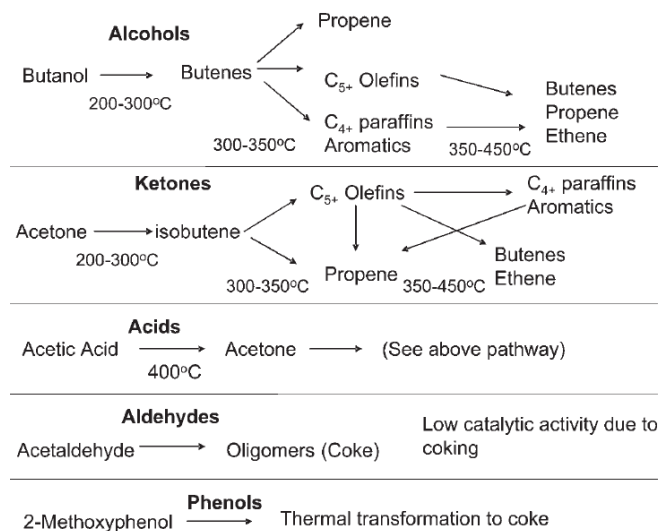
Op onderstaande figuur zijn de drie mogelijkheden van katalytisch kraken weergegeven: geïntegreerde katalytische pyrolyse, ontkoppeld upgraden van pyrolyseolie en een gekoppelde upgraden van pyrolysegassen. De laatste optie valt buiten het onderzoek van deze masterproef.



Figuur 33: Katalytisch kraken van pyrolyseolie tot geüpgraden stabiele olie (Bridgwater A. , 2011)

Katalytisch kraken zal ervoor zorgen dat het zuurstofgehalte van pyrolyseolie afneemt en de thermische stabiliteit ervan toeneemt. Het proces vereist geen input aan waterstof en opereert bij een atmosferische druk. Hierdoor is het proces economisch gezien in het voordeel ten opzichte van hydroprocessing, maar dit wordt tegengewerkt doordat de productopbrengsten aan olefine en aromaten liggen lager (vooral door de grotere opbrengst aan cokes). (Huber & Corma, 2007)

Pyrolyseolie bestaat uit meer dan 300 verschillende componenten, waardoor het heel moeilijk is om de exacte reacties te begrijpen en te beschrijven. Onderstaande figuur geeft enkele belangrijke reactievergelijkingen van componenten in pyrolyseolie weer. Hieruit blijkt dat het zoeken naar de optimale temperatuur een proces is van trial-and-error en afhankelijk is van de samenstelling van pyrolyseolie. Om cokesvorming gedeeltelijk tegen te gaan, kan pyrolyseolie eerst worden gescheiden in WIBO en WSBO en enkel het WIBO gedeelte verder verwerkt worden tot transportbrandstoffen. (Huber & Corma, 2007)



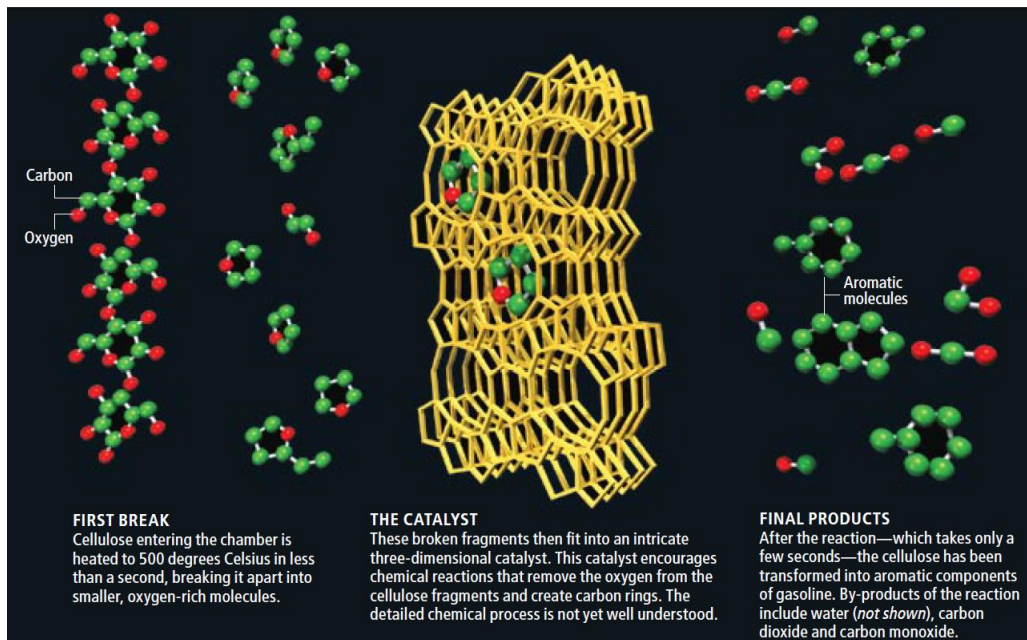
Figuur 34: Omvorming van componenten in pyrolyseolie (met ZSM-5 katalysator) (Huber & Corma, 2007)

4.2.1 GEÏNTEGREERDE KATALYTISCHE PYROLYSE

Het proces waarbij fast pyrolyse en het upgraden ervan geïntegreerd worden, (geïntegreerd katalytisch pyrolyse) verkrijgt meer en meer aandacht. Het concept leunt deels aan bij selectieve fast pyrolyse (hoofdstuk III) doordat door middel van katalysatoren bepaalde economisch interessante outputs vergroot worden. De katalysator zal ervoor zorgen dat de samenstelling van pyrolyseolie verandert naar een economisch interessanter product. Het nadeel is dat het proces slechts kan uitgevoerd worden bij één temperatuur. Dit vereist robuuste katalysatoren die in overvloed (ten opzichte van de instroom aan biomassa) aanwezig moeten zijn. De katalysator moet

in staat zijn de hoge temperaturen en mechanische omgeving te doorstaan. Er is ook een constante nieuwe input aan katalysator nodig, omdat de vorming van cokes de katalysatoren zullen beschadigen. Een ander nadeel is dat er in dit proces zeer weinig flexibiliteit in de procesparameters is. (Bridgwater A. , 2011)

Het geïntegreerde katalytische pyrolyseproces ondergaat enkele stappen. Eerst breekt cellulose tijdens fast pyrolyse op in kleinere zuurstofrijke moleculen. Vervolgens gaan de gebroken fragmenten doorheen een drie-dimensionale katalysator die de chemische reactie bevordert, waarbij zuurstof wordt verwijderd en koolstofringen worden gevormd. Na deze reacties is cellulose omgevormd in aromatische componenten van benzine. Nevenproducten zijn water, koolstofdioxide, koolstofmonoxide en cokes. Aromatische componenten kunnen onmiddellijk gebruikt worden als brandstof of als additief aan brandstoffen. Het additief heeft een hoog octaangehalte. Het volledige proces is afgerond binnen twee minuten. Het proces voor cellulose wordt in onderstaande afbeelding weergegeven. (Huber & Dale, 2009) (Carlson, Vispute, & Huber, 2008)

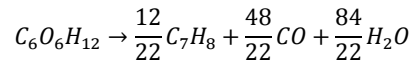


Figuur 35: Van cellulose tot aromaten via katalytisch kraken (Huber & Dale, 2009)

De uitdaging van dit proces is het minimaliseren van de vorming van cokes. Deze verstoren de werking van katalysatoren. De maximale theoretische opbrengst aan aromaten van dit proces schommelt rond 63% (=stoichiometrisch potentieel). Het proces op zich haalt een efficiëntie van 31%. Dit wil zeggen dat van de totale koolstofopbrengst er 31%³⁵ naar de vorming van aromaten gaat. Het overige deel van de opbrengst gaat verloren aan nevenproducten. 10% verdwijnt in

³⁵ Dit komt overeen met een koolstofopbrengst van 49% van het stoichiometrisch potentieel. Het proces haalt slechts een opbrengst die half zo groot is als theoretisch mogelijk is. Dit toont aan dat verbeteringen mogelijk zijn, al kunnen er vele technische barrières zijn die dit (tot op heden) onmogelijk maken.

koolstofdioxide; 15% verdwijnt in koolstofmonoxide; 29% verdwijnt in cokes ; de resterende 16% kan niet worden geïdentificeerd. De som van de opbrengsten is geen 100% wegens afronding. Vooral de vorming van cokes zorgt ervoor dat dit proces slechts een koolstofopbrengst heeft van 49% van het stoichiometrisch potentieel. Voor alle duidelijkheid wordt hieronder de reactievergelijking weergegeven waarop het stoichiometrisch potentieel berekend is door Carlson et al. (2008). Hierbij werd enkel glucose als input gebruikt. (Carlson, Vispute, & Huber, 2008)



De verdeling van aromaten van dit proces zijn (afgerond):

- Benzeen: 12%;
- Toluene: 20%;
- Ethylbenzeen/xyleen: 15%;
- Methylbenzeen: 5%;
- Indeen: 7%; en
- Naftaleen: 40%.

Het grote verschil met deze methode en hetgeen beschreven is in het gedeelte over industriële chemische grondstoffen zijn de inputkosten en de installatiekosten. Bij geïntegreerd katalytische pyrolyse zijn de interessante productopbrengsten lager, maar wordt het volledige proces in één stap uitgevoerd zonder dat er een inputstroom van waterstof vereist is. Dit in tegenstelling bij het proces dat industriële chemische grondstoffen voortbrengt in grote hoeveelheden per hoeveelheid input, maar ook tegen hogere kosten. Een gedetailleerde vergelijking van de processen is niet mogelijk, omdat informatie over de kosten nauwelijks beschikbaar is.

Op basis van de informatie over de producten van geïntegreerde katalytische pyrolyse wordt de waarde van pyrolyseolie bepaald. Van de totale input aan pyrolyseolie wordt 31% omgezet in aromaten waarvan de verdeling hierboven is weergegeven. De waarde van pyrolyseolie bedraagt zo 249,27 EUR/ton, zonder rekening te houden met nevenproducten (voor berekening zie onderstaande tabel). De grote hoeveelheid cokes die gevormd worden, kunnen bijvoorbeeld verbrand worden. De hierbij opgewekte elektriciteit en/of warmte kan dan weer als input dienen voor het fast pyrolyse proces. (Carlson, Vispute, & Huber, 2008)

Tabel 24: Waarde eindproducten geïntegreerde katalytische pyrolyse

Aromaten	Verdeling (%)	Waarde (EUR/ton)	Waarde (EUR/ton) volgens verdeling	Bron ³⁶
Benzeen	12	860,97 - 886,00	32,49	1,2
Tolueen	20	772,66 - 950,61	53,42	1,2
Ethylbenzeen/xyleen	15	1012,44	47,08	2
Methylbenzeen³⁷	5	772,66 - 950,61	13,36	1,2
Indeen	7			
Naftaleen	40	830,00	102,92	2
Totaal³⁸ (EUR/ton pyrolyseolie)			249,27	

4.2.2 ONTKOPPELD KATALYTISCH UPGRADEN VAN PYROLYSEOLIE

Indien het katalytisch proces ontkoppeld wordt van het pyrolyseproces, wordt er in deze masterproef gestart bij de aankoop van pyrolyseolie. Het fast pyrolyseproces wordt buiten beschouwing gelaten. Het voordeel van het ontkoppelen is dat de procesparameters beter afgestemd kunnen worden op het verkrijgen van hogere opbrengsten aan economisch interessante producten. Een ander voordeel is dat de WSBO en WIBO fase gescheiden kunnen worden. Enkel de WIBO fase van pyrolyseolie wordt verder verwerkt tot transportbrandstoffen. (Hew, Tamide, Yusup, Lee, & Ahmad, 2010)

Hew et al. (2010) beschrijven in hun artikel het onderzoek naar de optimale procesfactoren van fast pyrolyse en katalytisch upgraden om de opbrengst aan economisch waardevolle transportbrandstoffen te maximaliseren. Het fast pyrolyseproces valt buiten het onderzoek van deze masterproef, maar aangezien de procesinstellingen de verhouding tussen WSBO en WIBO kunnen veranderen, wordt dit wel aangehaald. De geproduceerde benzine lijkt sterk op deze die geproduceerd wordt op basis van conventionele methoden. De overige resultaten uit hun onderzoek zijn hier niet relevant, omdat zij fruitafval als input voor fast pyrolyse gebruiken. De gemiddelde opbrengst aan aromaten met houtachtige biomassa als input bedraagt ongeveer 20 wt%. De opbrengst aan aromaten met pyrolyseolie als input bedraagt bijgevolg 30 wt%³⁹. Huber et al. (2006) geven een opbrengst tot 34 wt% van de input aan pyrolyseolie. (Bridgwater A. , 2008)

Huber en Corma (2007) geven in hun artikel enkele resultaten weer van een experiment. De resultaten geven een totale opbrengst van 34 wt% ten opzichte van de input aan WIBO. Deze

³⁶ Bronnen:

1: (van Haveren, Scott, & Sanders, 2008)

2: (Reed Business Information Limited, 2011)

³⁷ Komt volgens IUPAC overeen met tolueen.

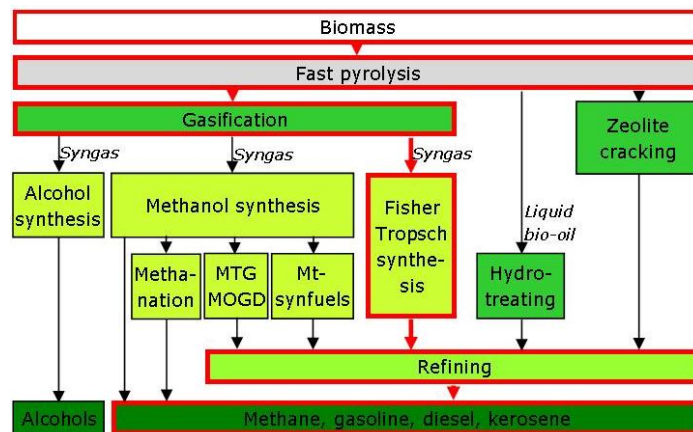
³⁸ Rekening houdend met een opbrengst van 31% aan aromaten.

³⁹ 30wt% = 20 wt%/0,65 met 0,65 het conversiepercentage van biomassa naar pyrolyseolie via fast pyrolyse.

opbrengst bestaat voor 86,7 wt% uit waterkoolstoffen waarvan 85,9 wt% aromaten zijn en in mindere maten olefine (afhankelijk van de katalysator kan de verhouding sterk wijzigen). Afhankelijk van de katalysator waren dit vooral xyleen en toluen of benzeen. Tussen de 30 en 40 wt% wordt omgezet in cokes. Daarnaast halen ze in hun artikel resultaten van Bakhshi en medewerkers aan. Zij voerden het katalytisch upgraden in twee stappen uit. De eerste stap zorgt voor thermische stabiliteit en de tweede stap voor het katalytisch upgraden. Hierdoor verlaagt de vernietiging van de katalysatoren. (Huber & Corma, 2007)

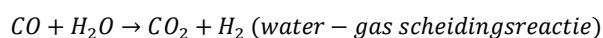
De opbrengsten van ontkoppeld katalytisch upgraden van pyrolyseolie zijn sterk gelijkend aan deze van het geïntegreerde katalytisch pyrolyse proces. De kosten zullen hier wel hoger liggen in vergelijking met het geïntegreerde katalytisch pyrolyse proces. Daarentegen is dit proces technisch makkelijker haalbaar, omdat procesparameters beter aangepast kunnen worden. De opbrengsten zullen bijgevolg sterk gelijkend zijn tot iets hoger in vergelijking met het geïntegreerde katalytisch proces, maar de kosten zullen hoger liggen.

4.3 VERGASSING

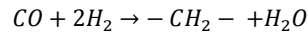


Figuur 36: Van biomassa tot transportbrandstoffen via vergassing (Bridgwater A. , 2011)

Vergassing van de pyrolyseolie wordt uitgevoerd in de aanwezigheid van stoom en het proces is afhankelijk van de stoom-hervormende reacties. Ook worden kleine hoeveelheden zuurstof toegevoegd om het deactiveren van katalysatoren te verminderen. Katalysatoren worden in dit proces gebruikt om: de procestemperatuur te verlagen, uitrustingskosten te verlagen, teer te verwijderen en om de H₂/CO ratio aan te passen. Hierdoor is het synthetisch gas geschikt voor Fischer-Tropsch (FT) of methanol synthese. De H₂/CO ratio wordt aangepast via de water-gas scheidingsreactie, een kritische reactie in vergassingsprocessen. (Bulushev & Ross, 2011)



De FT synthese heeft als primaire producten een mengeling van lichte waterkoolstofgassen, paraffinewas en alcoholen. De algemene reactievergelijking is:



Deze producten worden verder verwerkt tot diesel, benzine, kerosine, LPG (liquefied petroleum gas) en methaan (synthetisch aardgas (SNG)). (Wright, Brown, & Boateng, 2008) (Bridgwater A. , 2011)

In deze masterproef wordt de vergassing van pyrolyseolie besproken en niet de vergassing van biomassa. Bridgwater (2011) maakt een economische vergelijking tussen de twee technieken waaruit blijkt dat de vergassing van pyrolyseolie wel degelijk meer potentieel heeft dan de vergassing van biomassa. Een voorwaarde is wel dat de productieplaats van biomassa en de pyrolysecentrale geografisch kort bij elkaar gelegen zijn. De voorwaarde is dus een gedecentraliseerde pyrolysecentrale en een centrale verwerkingsinstallatie. Nadelig is wel dat het pyrolyseproces als tussenstap moet worden uitgevoerd (dat energie vergt) waardoor de totale efficiëntie lager is, maar transportkosten kunnen worden verlaagd en de productopbrengst is groter als in de vergasser een vloeibare input verwerkt wordt. De belangrijkste verschillen tussen de vergassing van biomassa en de vergassing van pyrolyseolie staan samengevat in onderstaande tabel. (Bridgwater A. , 2011)

Tabel 25: Verschillen tussen de vergassing van biomassa en de vergassing van pyrolyseolie (Bridgwater A. , 2008)

Biomassa versus pyrolyseolie vergassing
Kapitaalkost neemt toe ($\pm +10\%$) als gevolg van het tenietdoen van schaalvoordelen door inplanten kleine pyrolyse-installaties.
Kapitaalkost neemt af ($\pm -15\%$) als gevolg van de lagere behandelingskost van pyrolyseolie.
Kapitaalkost neemt af ($\pm -10\%$) als gevolg van de lagere kosten van de invoer van een vloeibare input aan een vergasser in vergelijking met een vaste input.
Kostenreductie ($\pm -10\%$) door de afwezigheid van alkali metalen in pyrolyseolie die voor opstopping en erosie zorgen.
Verlies aan efficiëntie ($\pm -5\%$) door de extra stap (fast pyrolyse).

Wright et al. (2008) berekenen in hun artikel de kostprijs van de productie van transportbrandstoffen. Ze bekomen een kostprijs per liter brandstof van 0,30 EUR per liter. Om deze berekening uit te voeren zijn enkele assumpties gemaakt. Zo gaan ze uit van een grote installatie met een productiecapaciteit van meer dan 2.500 miljoen gge⁴⁰ per jaar, om te kunnen genieten van schaalvoordelen. Ook worden de drie processen (fast pyrolyse, vergassing en de productie van FT brandstoffen) opgenomen in de kostprijsberekening. In verband met fast pyrolyse

⁴⁰ Gge is de afkorting voor het aantal gallons (1 gallon is gelijk aan 3,78541178 liter) benzine equivalent.

maken ze gebruik van een gedecentraliseerd systeem, waarbij verschillende kleinschalige fast pyrolyse centrales de pyrolyseolie voortbrengen. Ze hanteren een kostprijs voor pyrolyseolie van 0,13 EUR per liter. Al halen ze aan dat de productiekost op basis van andere bronnen schommelt tussen de 0,09 en 0,26 EUR per liter. De aankoopprijs van biomassa bedraagt in hun berekening 32,30 EUR per ton en volgens hun berekeningen is de aankoopkost van pyrolyseolie ongeveer 130,00 EUR per ton. De waarde van pyrolyseolie op basis van de toepassing als transportbrandstof in de Noorderkempen wordt in de deelconclusie uitvoerig besproken. (Wright, Brown, & Boateng, 2008)

4.4 DEELCONCLUSIE

Tot slot van dit hoofdstuk wordt de pyrolyseolie gevaloriseerd aan de hand van de toepassing als transportbrandstof. In het hoofdstuk zijn drie methoden besproken ;de omvorming van WSBO is in hoofdstuk III besproken. Deze zijn:

- Hydroprocessing;
- Katalytisch kraken;
- Vergassing; en
- Omvorming WSBO.

Uit deze methoden wordt gekozen om op basis van vergassing de waarde van pyrolyseolie te bepalen. De redenen hiervoor zijn dat vergassing gebruik maakt van twee technieken (vergassing en FT synthese) die beide sterk ontwikkeld zijn en waarvan de haalbaarheid op grote schaal aangetoond is (Bridgwater A. , 2008). Ook is er over vergassing in de literatuur reeds voldoende economische informatie gepubliceerd. Dit wil niet zeggen dat de andere methoden geen potentieel hebben, maar deze masterproef laat niet toe elke methode in detail te onderzoeken. Zo schommelt de productiekost via vergassing tussen de 0,09 en 0,26 EUR per liter, terwijl dit voor hydroprocessing al minstens 0,40 EUR per liter bleek. (Wright, Brown, & Boateng, 2008)

Het doel is om het vergassingproces van pyrolyseolie met vervolgens de FT synthese nader bij te bekijken en de kostprijs van de productie van brandstoffen. De gegevens worden aangepast aan de mogelijkheden in de Noorderkempen. De minimale kostprijs wordt bepaald aan de hand van een netto contante waardeberekening.

Aangezien er weinig economische gegevens beschikbaar zijn in de literatuur, vooral over de kapitaalkost, wordt gebruik gemaakt van de economische wet die kapitaalkosten linkt aan schaalvoordelen. De algemene relatie wordt weergegeven in volgende formule: (Wright, Brown, & Boateng, 2008)

$$C_p = C_{p0} \left(\frac{M}{M_0} \right)^n$$

Waarbij C_{p0} de kapitaalkost weergeeft, M_0 de capaciteit van een installatie met kapitaalkost C_{p0} weergeeft en n is een schalingsfactor. De schalingsfactor van 0,6 wordt overgenomen uit het artikel van Wright et al. (2008) en is beter gekend als de zes-tiende-regel. Wanneer n gelijk is aan 1 is er sprake van een lineaire schaling, waarbij de kapitaalkost per eenheid onafhankelijk is van de grootte van de installatie. Lineaire schaling is niet relevant bij deze nieuwe technologie. In deze masterproef wordt een schalingsfactor van 0,6 gehanteerd. Ten opzichte van de basiscase van Wright et al. (2008) wordt een schaalverkleining toegepast. Indien gekozen zou worden voor een schalingsfactor van 0,7 of hoger, zou de kapitaalkost afnemen, omdat hier $M < M_0$. (Wright, Brown, & Boateng, 2008)

De netto contante waardeberekening (NCW berekening) wordt in deze masterproef uitgevoerd in verschillende stappen. Deze stappen zijn de:

- Berekening van de kapitaalkost;
- Berekening van de jaarlijkse operating kosten;
- Uitvoering van de NCW berekening; en
- Sensitiviteitsanalyse.

4.4.1 BEREKENING KAPITAALKOSTEN

Alvorens de kapitaalkost te kunnen bepalen, dient de capaciteit van de installatie bepaald te worden. In de Noorderkempen wordt uitgegaan van een jaarlijkse input aan biomassa van 21.000 ton per jaar. Op basis van volgende formule kan de capaciteit van de installatie bepaald worden: (Wright, Brown, & Boateng, 2008)

$$F * E_p * \eta_{BTF} = M * E_B$$

Waarbij F de totale jaarlijkse input in ton aan pyrolyseolie is, M de capaciteit weergeeft (eenheid is in liters weergegeven), E_p en E_B vertegenwoordigen de energie-inhoud van respectievelijk pyrolyseolie en benzine. De waarde van η_{BTF} is procesafhankelijk en bedraagt voor dit proces 0,58 (voor het proces van bio-olie naar brandstoffen). (Wright, Brown, & Boateng, 2008)

De energieinhoud van benzine bedraagt 45,8 MJ/kg (Rodrigue, 2012) of 34,121 MJ/liter⁴¹; de energieinhoud van pyrolyseolie bedraagt gemiddeld 17,5 MJ/kg (Bridgwater A. , 2011). De formule voor de berekening van de capaciteit kan op basis van deze gegevens ingevuld worden. (Wright, Brown, & Boateng, 2008)

⁴¹ 0,745 kg/liter voor benzine (Massachusetts Institute of Technology, 2007)

$$\left(21.000 \frac{\text{ton}}{\text{jaar}} * 0,65\right) * 17.500 \frac{\text{MJ}}{\text{ton}} * 0,58 = M * 34,12 \frac{\text{MJ}}{\text{liter}}$$

$$M = \frac{\left(21.000 \frac{\text{ton}}{\text{jaar}} * 0,65\right) * 17.500 \frac{\text{MJ}}{\text{ton}} * 0,58}{34,121 \text{ MJ/liter}} = 4.060.475,953 \frac{\text{liter}}{\text{jaar}}$$

Op basis van de verschillende veronderstellingen wordt de installatie verondersteld om **jaarlijks 4.060.475,953 liter benzine equivalenten** voort te brengen.

In deze masterproef gaan we uit van pyrolyseolie als input voor de productie van transportbrandstoffen. De productie van deze brandstoffen wordt voltooid in verschillende stappen. Deze stappen zijn: vergassing, gasreiniging, gasbewerking en FT synthese. Daarnaast is er nog een gasturbine nodig voor de productie van elektriciteit uit off-gassen. (Tijmensens, Faaij, Hamelinck, & van Hardeveld, 2002)

De kapitaalkosten staan weergegeven in onderstaande tabel en zijn aangepast aan de vereiste capaciteit noodzakelijk in de Noorderkempen. De berekening wordt uitgevoerd met behulp van onderstaande formule. De vergassingsinstallatie uit de referentie heeft een geschatte kapitaalkost van 49,59 miljoen EUR. De installatie is dan ingebouwd in een geheel waarvan de jaarlijkse productiecapaciteit van 132,49 miljoen liter benzine equivalent. De kapitaalkost wordt omgerekend met een schalingsfactor van 0,6 naar een installatie met een jaarlijkse productiecapaciteit van 4.060.475,953 liter benzine equivalent. De formule wordt ingevuld om de kapitaalkost van de vergasser te bekenen:

$$C_p = C_{p0} \left(\frac{M}{M_0}\right)^n$$

$$C_p = 49,59 \text{ miljoen EUR} \left(\frac{4.060.475,953 \text{ liter/jaar}}{132.498.412,3 \text{ liter/jaar}}\right)^{0,6} = 6,13 \text{ miljoen EUR}$$

De andere kapitaalkosten worden op dezelfde wijze berekend.

Tabel 26: Kapitaalkosten van een vergassingsinstallatie (Wright, Brown, & Boateng, 2008)

Kapitaalkost	Kost (in miljoen EUR)
Vergassing	6,13
Zuurstofproductie	5,10
Gasreiniging	6,13
Scheiding	0,34
FT reactor	2,05
Gasturbine	2,38
Warmte terugwinning	3,74
Andere	1,05

De totale kapitaalkost van de installatie is 26,92 miljoen EUR. De assumptie is dat installatiekosten reeds zijn opgenomen in de kapitaalkosten van de verschillende onderdelen. De installatie wordt gedurende een periode van 15 jaren afgeschreven. De discontovoet, die in de berekening wordt opgenomen, bedraagt 10%.

4.4.2 BEREKENING JAARLIJKSE OPERATIONELE KOSTEN

Naast de kapitaalkosten zijn er ook jaarlijkse operationele kosten. Deze zijn hoofdzakelijk afhankelijk van de grootte van de installatie. De wijze van berekening wordt overgenomen uit het artikel van Wright et al. (2008). Onderstaande tabel vat de operationele kosten samen. De laatste kolom van deze tabel geeft de overgenomen berekeningswijze weer.

Tabel 27: Operationele kosten van vergassing (Wright, Brown, & Boateng, 2008) (Tijmenssen, Faaij, Hamelinck, & van Hardeveld, 2002)

Operationele kost	Jaarlijkse kost (in miljoen EUR)	Verklaring
Kapitaallasten	3,53	13,1% van TKK ⁴² ⁴³
Onderhoud	0,81	3% van TKK
Personeel	0,055	Lineaire schaling ⁴⁴
Dolomiet	0,026	Lineaire schaling
Afvalwater	0,025	Lineaire schaling
ZnO consumptie	0,025	25.000 EUR/jaar
FT katalysator verbuiksverzekering	0,018	1% van jaarlijkse lineaire afschrijving
Aankoop pyrolyseolie	3,54	13650 ton aan 259,32 EUR/ton

De totale operationele kosten bedragen jaarlijks 8,029 miljoen EUR.

4.4.3 BEREKENING JAARLIJKSE OPBRENGSTEN

Wright et al. (2008) geven in hun artikel aan dat de omzetting van pyrolyseolie naar FT brandstoffen een efficiëntie heeft van 58%. Dit percentage wordt berekend door de energie-inhoud van pyrolyseolie te delen door de energie-inhoud van FT brandstoffen. De energiewaarde van brandstoffen (benzine) bedraagt 34,12 MJ per liter. Op basis van een energie-inhoud voor

⁴² TKK: totale kapitaalkosten

⁴³ Reële interestvoet = 10%; afschrijvingsperiode = 15 jaar; (Tijmenssen, Faaij, Hamelinck, & van Hardeveld, 2002) inflatie \approx 3%; nominale rentevoet = 13,1%

⁴⁴ Lineaire schaling (schalingsfactor = $n = 1$)

pyrolyseolie van 17,5 MJ per kg of 21,0 MJ per liter⁴⁵, klopt deze berekening bij benadering. Deze efficiëntie werd gebruikt in de berekening van de jaarlijkse output. (Wright, Brown, & Boateng, 2008)

De minimale verkoopprijs van deze brandstoffen wordt bepaald aan de hand van een NCW berekening. Jaarlijks kan er in de centrale 4.060.475,953 liter brandstoffen geproduceerd worden. De verkoopprijs van benzine op basis van fossiele grondstoffen bedraagt in Europa gemiddeld 1,281 EUR per liter exclusief taksen en 1,554 EUR per liter inclusief taksen (maart 2012). (Wright, Brown, & Boateng, 2008) (Europe's energy Portal, 2012)

4.4.4 UITVOEREN NCW BEREKENING

Op basis van de informatie kan een netto contante waardeberekening uitgevoerd worden. Deze kan berekend worden op basis van volgende formule: (Kuppens, Pyrolyse voor de valorisatie van korteomloophout uit fyto-remediatie (Gastcollege Duurzame Ontwikkeling), 2010)

$$NCW = \sum_{n=1}^N \frac{CF_n}{(1+i)^n} - I_0$$

De levensduur (N) van deze toepassing wordt geschat op 15 jaar (Tijmensens, Faaij, Hamelinck, & van Hardeveld, 2002). De jaarlijkse kasstromen bestaan uit twee componenten. Enerzijds zijn er de jaarlijkse uitgaven die 8,029 miljoen EUR bedragen. Anderzijds zijn er de jaarlijkse inkomsten. De jaarlijkse inkomsten worden berekend door de verkoopprijs te vermenigvuldigen met het aantal liter brandstof (benzine equivalent). De berekening van de jaarlijkse cashflow geeft dan (onder de assumptie dat belastingen (τ) 33% bedragen en subsidies gelijk zijn aan het niet heffen van accijnzen op biobrandstoffen):

$$CF_n = (1 - \tau) * (\text{inkomende kasstromen} - \text{uitgaande kasstromen}) + (\tau * D_n)$$

met:

- τ : vennootschapsbelasting;
- $(\tau * D_n)$: belastingsschild; en
- D_n : jaarlijkse afschrijving.

$$CF_n = (0,67) * \left[\left(\text{verkoopprijs brandstoffen} \left(\text{in } \frac{\text{EUR}}{\text{liter}} \right) * 4.060.475,953 \frac{\text{liter}}{\text{jaar}} \right) - 8,029 \text{ miljoen EUR} \right] + (0,33 * \frac{26,92 \text{ miljoen EUR}}{N})$$

⁴⁵ Dichtheid pyrolyseolie: 1,2 kg/liter (Bridgwater A. , 2011)

De investering wordt uitgevoerd in jaar 0 en bedraagt 26,92 miljoen EUR. De discontovoet wordt in deze berekening vastgelegd op 10% (Tijmenssen, Faaij, Hamelinck, & van Hardeveld, 2002). De NCW berekening ziet er als volgt uit:

$$NCW = \sum_{n=1}^{15} \frac{\left[(0,67) * \left(\left(VP \left(in \frac{EUR}{liter} \right) * 4.060.475,953 \text{ liter} \right) - 8,029 \text{ miljoen EUR} \right) + (0,592 \text{ miljoen EUR}) \right]}{(1 + 0,1)^n} - 26,92 \text{ miljoen EUR}$$

Om de minimale verkoopprijs van brandstoffen te berekenen die een break-even scenario realiseert, wordt de NCW gelijk aan 0 gesteld. De berekening resulteert in een minimale verkoopprijs van 3,06 EUR/liter. Indien de levensduur van de installatie toeneemt tot 20 jaar (met de assumptie dat alle andere parameters gelijk blijven, alsook de jaarlijkse kost van de FT katalysator verbruiksverzekering), daalt de minimale verkoopprijs naar 2,98 EUR/liter. Dit toont aan dat door het wijzigen van de levensduur van de installatie (+5 jaren) de minimale verkoopprijs daalt met slechts 0,08 EUR of met 2,68%.

Het resultaat levert een onrealistische verkoopprijs in vergelijking met fossiele concurrenten die een verkoopprijs van 1,281 EUR/liter exclusief taksen (maart 2012) hebben. Rekening houdende met taksen bedraagt de verkoopprijs in Europa gemiddeld 1,554 EUR/liter. De prijs van brandstoffen op basis van pyrolyseolie ligt 96,91% hoger bij een realistische levensduur van de installatie van 15 jaren dan deze van de fossiele concurrent (inclusief taksen), wat de interesse in een pyrolyseolie vergassingsinstallatie sterk doet dalen. Indien we de minimale verkoopprijs vergelijken met deze van de fossiele concurrent exclusief taksen, bedraagt het verschil zelfs 138,88% in het voordeel van fossiele brandstoffen. De belangrijkste reden voor de hoge prijs is de kleine schaal van de vergassingsinstallatie in de Noorderkempen. Een jaarlijkse input van 21.000 ton biomassa is te weinig om een concurrentiële pyrolyseolie vergassingsinstallatie te bouwen. In de sensitiviteitsanalyse wordt hier dieper op ingegaan. Wel kan rekeningen worden gehouden met een eventuele premieprijs voor brandstoffen op basis van biomassa en/of subsidies naast het wegvallen van accijnzen voor deze ecovriendelijke toepassing in vergelijking met de fossiele concurrent. Hier wordt in volgende delen nog dieper op ingegaan.

4.4.5 SENSITIVITEITSANALYSE

In de netto contante waardeberekening zijn de waarden van de parameters op basis van veronderstellingen en een literatuurstudie bepaald. Deze veronderstellingen en het overnemen van data uit literatuur gebeurt uiteraard op basis van een kritische analyse. De bekomen waarde voor de minimale verkoopprijs geeft een indicatie voor de werkelijke minimale verkoopprijs.

Door de verschillende parameters te laten fluctueren binnen een range van waarden, neemt de betrouwbaarheid van de resultaten toe. Op basis van deze eerder algemene berekening loont het enkel de moeite om de algemene parameters (deze met belang) te laten fluctueren. Het loont bijvoorbeeld niet de moeite om individuele componenten van de kapitaalkost te laten fluctueren, maar wel om de volledige kapitaalkost te laten fluctueren. Onderstaande tabel laat de belangrijkste parameters zien met de initieel gekozen waarde, de rationele range van mogelijke waarden (overgenomen uit Tijmensen et al. (2002)) en de verdeling van deze range. Op de range van de kapitaalkost wordt hieronder dieper ingegaan. De overige zijn overgenomen uit Tijmensen et al. (2002).

Tabel 28: Sensitieve parameters van de pyrolyseolie vergassings- en FT synthese-installatie (Tijmensen, Faaij, Hamelinck, & van Hardeveld, 2002)

Parameter	Initiële waarde	Range	Verdeling
Kapitaalkost	26,92 miljoen EUR	35 – 100 % van IW ⁴⁶	Triangulair
Operationele kosten	8,029 miljoen EUR/jaar	75 – 125 % van IW	Uniform
Opbrengsten (liter/jaar)	4.060.475,953	75 – 125 % van IW	Uniform
Discontovoet	10 %	6 – 15 %	Uniform
Levensduur	15 jaar	9 – 23 jaar	Uniform

De kapitaalkost bedraagt initieel 26,92 miljoen EUR. Door een gebrek aan meer gedetailleerde informatie is deze overgenomen uit Wright et al. (2008) en geschaald naar de juiste grootte. De schalingsfactor bedraagt 0,6 en werd eveneens overgenomen uit Wright et al. (2008). Dit heeft echter belangrijke gevolgen. De basisgegevens zijn voor een installatie met een productiecapaciteit van 132.498.412,3 liter transportbrandstoffen per jaar. Een installatie in de Noorderkempen met een capaciteit van 4.060.475,953 liter is 32,63 maal kleiner. De kapitaalkost daarentegen is slecht 8,08 maal kleiner (217,58 miljoen EUR in vergelijking met 26,92 miljoen EUR). Het is duidelijk dat een vergassingsinstallatie schaalvoordelen geniet, maar over de grootte ervan is onzekerheid. Bijvoorbeeld indien de schalingsfactor niet 0,6, maar 0,7 zou bedragen daalt de totale kapitaalkost van de installatie naar 18,96 miljoen EUR. Dit is een daling met 41,98 %. Daarom wordt een brede range verondersteld voor de parameter kapitaalkost. (Kuppens, 2012)

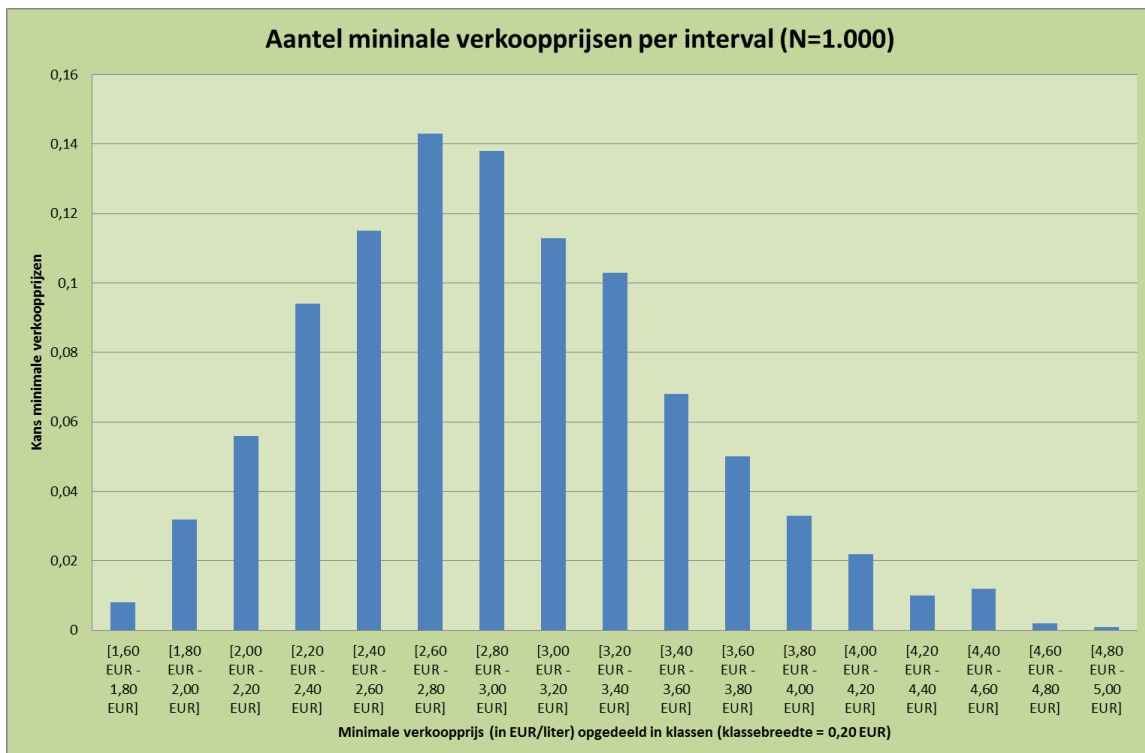
Er wordt in deze masterproef verondersteld dat een realistische schalingsfactor voor de kapitaalkost tussen 0,6 en 0,9 ligt, maar met een grotere kans dat deze dichter bij 0,6 dan bij 0,9 ligt. Met andere woorden wordt een triangulaire verdeling verondersteld met als grenzen 0,6 en 0,9 en met 0,6 als punt met de grootste kans. De kapitaalkost berekend op basis van een schalingsparameter van 0,9 bedraagt 9,45 miljoen EUR. Bijgevolg bedraagt de range van de kapitaalkost (uitgedrukt in een percentage van IW) 35% tot 100% van IW met als 100% als extra parameter voor de triangulaire verdeling.

⁴⁶ IW: initiële waarde

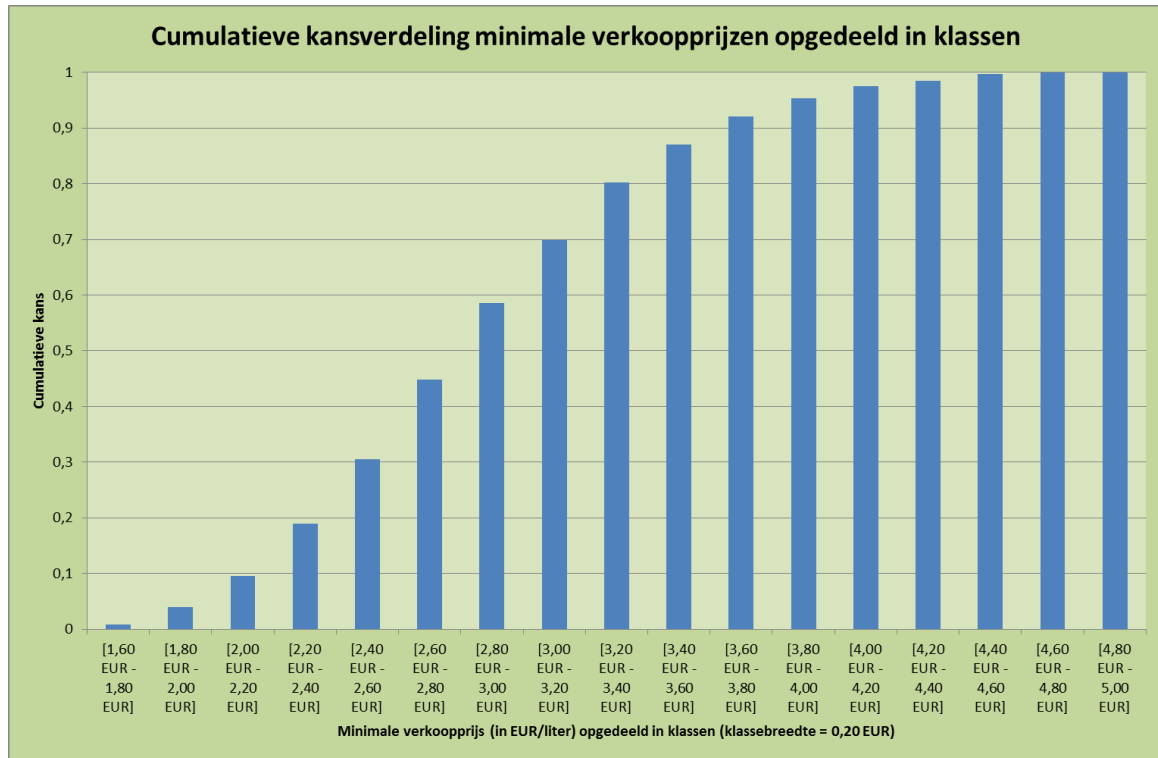
De overige parameters krijgen allemaal een uniforme verdeling opgelegd. Deze verdeling wordt gekozen, omdat alle waarden in de range een even grote kans hebben om de werkelijke waarde te representeren.

Door middel van een Monte Carlo simulatie wordt een beter beeld geschetst over de minimale verkoopprijs van brandstoffen. De simulatie wordt 1.000 maal uitgevoerd, wat voldoende moet zijn om de vijf parameters voldoende te laten fluctueren en de impact ervan op de minimale verkoopprijs te kunnen weergeven.

Hieronder staan twee figuren en een tabel die de resultaten van de Monte Carlo simulatie weergegeven. Op de eerste figuur zijn de minimale verkoopprijzen van de 1.000 simulaties opgedeeld in klassen met een klassebreedte van 0,20 EUR. De verdeling is bij benadering een normale verdeling (kurtoses ≈ 0) met een rechtse staart (scheefheid > 0). De gemiddelde minimale verkoopprijs bedraagt 2,92 liter en de mediaan is 2,88 EUR. Op de figuur is te zien dat de omliggende klassen ook een groot aantal minimale verkoopprijzen in hun interval bevatten. De standaardfout bedraagt 0,58 EUR. Met een betrouwbaarheid van 95% en onder de veronderstelling van een normale verdeling zit de waarde van de minimale verkoopprijs in het interval [1,7832 ; 4,0568] EUR per liter. Op de tweede figuur is de cumulatieve kans te zien van de minimale verkoopprijs. Op deze figuur is bijvoorbeeld te zien dat 0% van de minimale verkoopprijzen kleiner zijn dan 1,554 EUR/liter.



Figuur 37: Kansverdeling minimale verkoopprijs via Monte Carlo simulatie (1.000 simulaties)



Figuur 38: Cumulatieve kans minimale verkoopprijs via Monte Carlo simulatie (1.000 simulaties)

Tabel 29: Samenvatting resultaat Monte Carlo simulatie

Summary statistics			
Steekproefgrootte (N)	1.000		
Locatie (midden)			
Gemiddelde	2,92 EUR/liter	Mediaan	2,88 EUR/liter
Standaardfout van het gemiddelde	0,02 EUR/liter		
Spreiding			
Standaardfout	0,58 EUR/liter	Q (,75)	3,28 EUR/liter
Maximum	4,80 EUR/liter	Q (,25)	2,51 EUR/liter
Minimum	1,62 EUR/liter	IQ range	0,77 EUR/liter
Range	3,18 EUR/liter		
Vorm			
Scheefheid	0,4420		
Kurtosis	-0,0146		

Door de belangrijke parameters te laten fluctueren binnen een realistische range blijkt opnieuw dat het potentieel van de verwerking van pyrolyseolie tot transportbrandstoffen klein is. Geen enkele simulatie leverde een concurrentiele minimale verkoopprijs op in vergelijking met de fossiele concurrenten. De vergassing en de FT synthese van pyrolyseolie tot transportbrandstoffen

blijkt pas rendabel vanaf een minimale verkoopprijs van transportbrandstoffen van 2,92 EUR/liter (benzine equivalent) op basis van deze analyse. In vergelijking met fossiele concurrenten (inclusief taksen) ligt de verkoopprijs 1,366 EUR/liter (=3,35 EUR/liter - 1,554 EUR/liter) hoger. Er kan verwacht worden dat transportbrandstoffen op basis van biomassa gesubsidieerd worden of dat er een premumprijs gevraagd kan worden, maar hoe groot deze subsidie en of premumprijs zijn, valt buiten het onderzoeksdomein van deze masterproef. Echter lijkt het uitgesloten dat per liter brandstof er 1,366 EUR verschil goedge maakt wordt via een premium en/of subsidie.

4.4.6 SCHAALVERGROTING

Het belangrijkste nadeel voor de vergassing en FT synthese van pyrolyseolie tot transportbrandstoffen in de Noorderkempen is de te kleine jaarlijkse input aan biomassa. Een input van 21.000 ton biomassa of 13.650 ton pyrolyseolie per jaar is te klein om te kunnen profiteren van schaalvoordelen. Om dit duidelijk te maken wordt een simulatie uitgevoerd. De jaarlijkse geproduceerde hoeveelheid liter brandstoffen wordt verhoogd en het effect ervan op de minimale verkoopprijs (bij NCW=0) wordt geanalyseerd. De inputgegevens zijn in onderstaande tabel weergegeven en zijn berekend op basis van de initiële waarde aangepast aan de schaalvergrotingen. De initiële waarde van de discontovoet (10%) en levensduur (15 jaren) blijven behouden.

Tabel 30: Input data voor schaalvergroting installatie van vergassing en FT-synthese pyrolyseolie

Schaalvergroting ten opzichte van IW	Jaarlijkse brandstofproductie in liter	Investering (in miljoen EUR)	Jaarlijkse operationele kosten (in EUR)
100% (IW)	4.060.475,95	26,92	8,02
150% (IW*1,5)	6.090.713,93	34,33	11,04
200% (IW*2)	8.120.951,91	40,80	13,91
500% (IW*5)	20.302.379,77	70,71	29,68
1.000% (IW*10)	40.604.759,53	107,17	53,81
5.000% (IW*50)	203.023.797,7	281,49	227,82
10.000% (IW*100)	406.047.595,3	426,65	433,57
50.000% (IW*1000)	2.030.237.977	1.120,62	2.004,05
100.000% (IW*1000)	4.060.475.953	1.698,54	3.920,34

De schaalvergroting is willekeurig gekozen, maar de maximale schaalvergroting is gekozen op basis van trial-and-error zodat een voldoende grote schaal waarbij de minimale verkoopprijs lager ligt dan die van de fossiele concurrentie. De jaarlijkse brandstofproductie wordt berekend op basis van de schaalgrootte.

Voorbeeld. Bij een verdubbeling van de jaarlijkse input aan biomassa (van 21.000 ton naar 42.000 ton) bedraagt de jaarlijkse input aan pyrolysolie 27.300 ton. Op basis van de formule van Wright et al. (2008) kan de jaarlijkse output bepaald worden:

$$F * E_p * \eta_{BTF} = M * E_G$$

$$\left(42.000 \frac{\text{ton}}{\text{jaar}} * 0,65\right) * 17.500 \frac{\text{MJ}}{\text{ton}} * 0,58 = M * 34,12 \frac{\text{MJ}}{\text{liter}}$$

$$M = \frac{\left(27.300 \frac{\text{ton}}{\text{jaar}}\right) * 17.500 \frac{\text{MJ}}{\text{ton}} * 0,58}{34,121 \text{ MJ/liter}} = 8.120.951,906 \frac{\text{liter}}{\text{jaar}}$$

In dit voorbeeld wordt er jaarlijks 8.120.951,906 liter benzine geproduceerd.

De investering wordt ook aangepast aan de verschillende schaalgrootten. De berekening op basis van de formule overgenomen uit Wright et al. (2008) maakt het mogelijk om de kapitaalkost te berekenen op meerdere schaalgrootten.

Bij een verdubbeling van de jaarlijkse input aan biomassa, verdubbeld de kapitaalkost niet. Aangezien in deze masterproef gebruik wordt gemaakt van de zes-tiende regel en geen lineaire regel gehanteerd wordt, zal bij een verdubbeling van de capaciteit de kapitaalkost minder dan verdubbelen. Dit kan op basis van de formule van Wright et al. (2008) bewezen worden:

$$C_p = C_{p0} \left(\frac{M}{M_0}\right)^n$$

$$\text{met } 2 * M_0 = M ; n = 0,6$$

$$\text{waardoor } \left(\frac{M}{M_0}\right)^n < 1$$

$$\text{bijgevolg } C_p < 2 * C_{p0}$$

De jaarlijkse operationele kasstromen worden opnieuw berekend op basis van de verklaring overgenomen van Wright et al. (2008). Voor sommige componenten (personeel, dolemiet, aankoop pyrolyseolie en afvalwater) leunt een lineaire benadering het dichtste aan bij de werkelijkheid, terwijl voor anderen (kapitaallasten, onderhoud en FT katalysator verbruikverzekering) dit een procentueel deel van de totale kapitaalkosten of de afschrijvingen is. De kost van de ZnO consumptie blijft constant en bedraagt 25.000,00 EUR.

De resultaten van alle uitgerekende schaalvergrotingen zijn opgenomen in onderstaande tabel. De berekening wordt uitgevoerd aan de hand van volgende formule, waarbij de NCW gelijk is aan nul:

$$NCW = 0 = \sum_{n=1}^n \frac{CF_n}{(1+i)^n} - I_0$$

Voorbeeld. Bij een schaal van 100% (parameters gelijk aan initiële waarden) wordt de investering uitgevoerd in jaar 0. Van jaar 1 tot en met jaar 15 zijn er opbrengsten en kosten die jaarlijks een kasstroom (= opbrengsten – kosten) genereren.

$$NCW = 0 = \sum_{n=1}^{15} \frac{\left[(0,67) * \left(\left(VP \left(in \frac{EUR}{liter} \right) * 4.060.475,953 \text{ liter} \right) - 8,029 \text{ miljoen EUR} \right) + (0,592 \text{ miljoen EUR}) \right]}{(1 + 0,1)^n}$$

– 26,92 miljoen EUR

Via de functie 'doelzoeken' in Excel kan de minimale verkoopprijs berekend (in EUR/liter) worden waarbij de netto contante waarde van de investering gelijk is aan nul. De functie doelzoeken werkt op basis van een algoritme dat via trail-and-error de juiste waarde berekend. Aan de hand van dit algoritme kan bepaald worden dat de minimale verkoopprijs 3,06 EUR (zoals reeds hierboven bepaald werd) per ton bedraagt.

Tabel 31: Effect schaalvergrotingen op minimale verkoopprijs

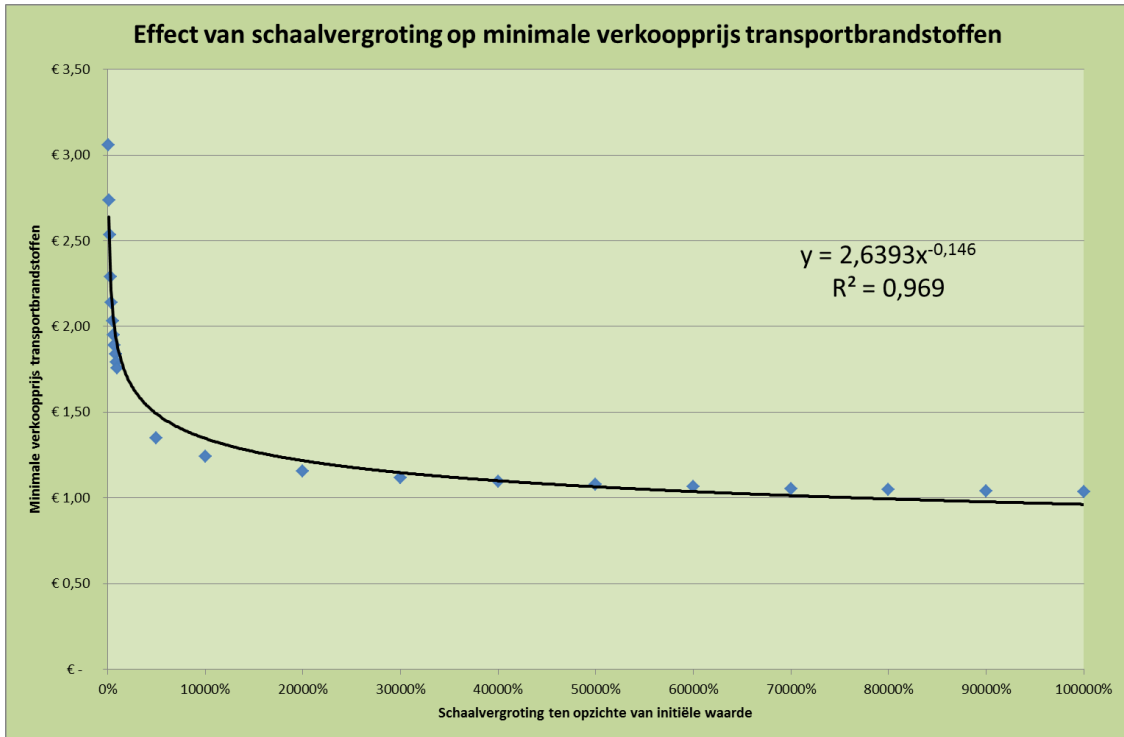
Productiecapaciteit	Investering (in miljoen EUR)	Minimale verkoopprijs per liter (bij NCW=0)	Jaarlijkse operationele kosten (in miljoen EUR)	Opbrengsten (in miljoen EUR)	Jaarlijkse CF (in miljoen EUR)
100% (IW)	26,92	3,06	8,02	12,42	3,54
150% (IW*1,5)	34,33	2,73	11,04	16,65	4,51
200% (IW*2)	40,80	2,53	13,91	20,58	5,36
500% (IW*5)	70,71	2,03	29,68	41,24	9,30
1.000% (IW*10)	107,17	1,76	53,81	71,32	14,09
5.000% (IW*50)	281,49	1,35	227,82	273,81	37,01
10.000% (IW*100)	426,65	1,24	433,57	503,28	56,09
50.000% (IW*1000)	1.120,62	1,08	2.004,05	2.187,15	147,33
100.000% (IW*1000)	1.698,54	1,03	3.920,34	4.197,87	223,31

In de tabel valt onmiddellijk het effect op van de grote daling in de minimale verkoopprijs van transportbrandstoffen door de toename in de capaciteit als gevolg van de grotere jaarlijkse input.

De jaarlijkse input zou *moeten vertwintigvoudigen* opdat het proces van de productie van transportbrandstoffen via vergassing en FT synthese van pyrolyseolie een minimale verkoopprijs oplevert die concurrentieel is met de fossiele concurrenten ervan (inclusief taksen). Via trial-and-error wordt berekend dat een toename in de schaal van 2000% eenzelfde verkoopprijs oplevert. Dit komt overeen met een jaarlijkse input 2.730.000 ton biomassa. Het effect van de schaalvergroting op de minimale verkoopprijs van transportbrandstoffen wordt hieronder uitgezet op een grafiek. De schaal wordt in onderstaande figuur vergroot tot duizendmaal de initiële

waarden. Dit komt overeen met een jaarlijkse input van 21 miljoen ton biomassa. De reden van deze grote schaalvergroting is om het effect ervan duidelijk te kunnen weergegeven op de grafiek.

Bijlage 15 bevat de tabel waarin alle schaalvergrotingen zijn opgenomen samen met de bijhorende investeringen, kosten en opbrengsten.



Figuur 39: Effect van schaalvergroting op de minimale verkoopprijs van transportbrandstoffen

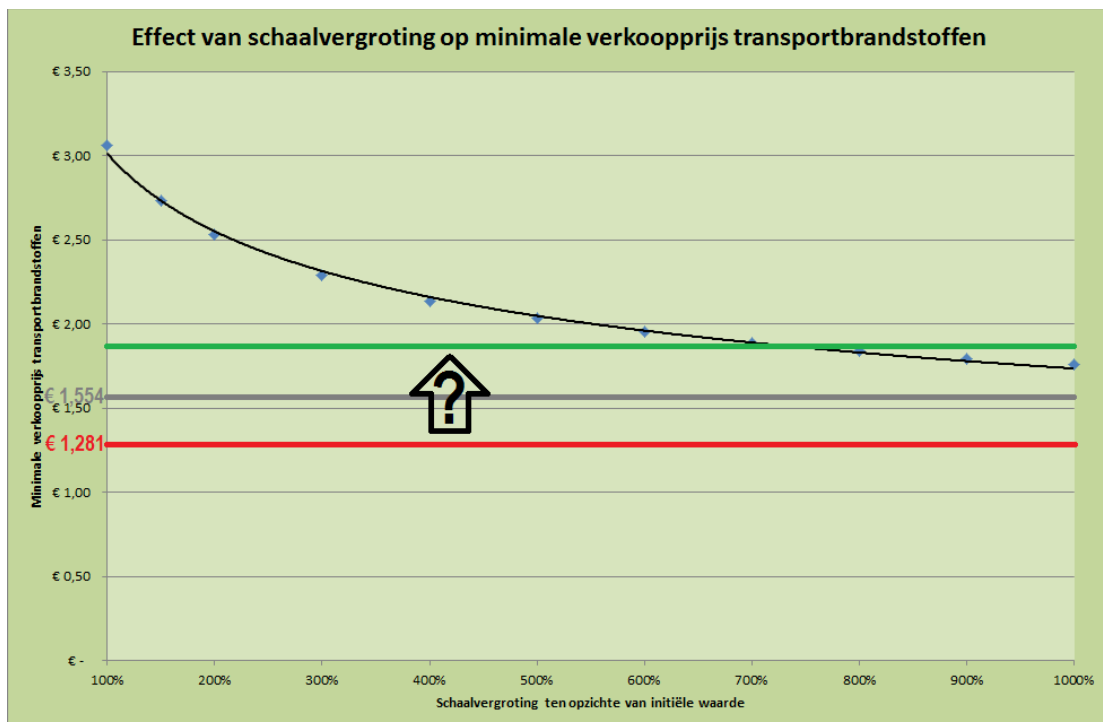
De reden dat de netto contante waardeberekening die een beeld moet geven over het potentieel van de verwerking van pyrolyseolie tot transportbrandstoffen opgenomen is in de deelconclusie is dat bovenstaande figuur de samenvatting van dit hoofdstuk bevat. Schaalvoordelen of voor de toepassing in de Noorderkempen schaalnadelen beslissen voor een belangrijk deel over de haalbaarheid van de toepassingen. De haalbaarheid wordt in bovenstaande figuur weergegeven. De trendlijn wordt toegevoegd om het effect duidelijk te maken. Op de x-as staat de schaalgrootte weergegeven. Een scenario voor de Noorderkempen is weergegeven als 100%. Op de y-as is de minimale verkoopprijs (bij NCW = 0) weergegeven. De toegevoegde trendlijn vertoont bij benadering een verticaal, een overgang en een horizontaal gedeelte. In het verticaal gedeelte is het mogelijk om door een relatief kleine toename in de capaciteit van de installatie een relatief grote prijsdaling in de minimale verkoopprijs te realiseren. In het horizontale deel is een prijsdaling moeilijk te realiseren door het vergroten van de capaciteit van de installatie. In de overgang is het effect gematigd.

De trendlijn heeft als vergelijking:

$$\text{minimale verkoopprijs} \left(\frac{\text{EUR}}{\text{liter}} \right) = 2,6393 * \text{Schaalgrootte (in \%)}^{-0,146}$$

De schaalgrootte is een procentuele waarde met als basis 100% waarvoor de parameters van de Noorderkempen genomen zijn. In het verticale deel van de trendlijn heeft een schaalwijziging een grotere impact op de minimale verkoopprijs dan in het horizontale deel van de trendlijn.

De toepassing is pas haalbaar als de minimale verkoopprijs (bepaald bij een NCW=0 en discontovoet van 10%) concurrentieel is met de prijzen van fossiele brandstoffen. In maart 2012 bedroeg de gemiddelde prijs van benzine (exclusief taksen) in Europa 1,281 EUR/liter en 1,554 EUR/liter (inclusief taksen) (Europe's energy Portal, 2012). Wanneer ervan uitgegaan wordt dat brandstoffen op basis van biomassa een premieprijs mogen vragen en/of subsidie krijgen is de brandstof concurrentieel als ze de prijs van fossiele brandstoffen benadert. Hoe groot het verschil mag zijn, ligt buiten het onderzoek van deze masterproef. De idee ervan wordt weergegeven op onderstaande figuur (schaalvergroting tot tien maal de initiële waarde). De onzekerheid over de grootte van het verschil tussen de prijs van brandstoffen op basis van fossiele grondstoffen en brandstoffen op basis van biomassa wordt weergegeven door een '?'. Op de figuur wordt de huidige (maart 2012) prijs van fossiele brandstoffen weergegeven in het rood (exclusief taksen) en in het grijs (inclusief taksen). Beide prijzen weerspiegelen het Europees gemiddelde. De groene lijn duidt op de prijs van transportbrandstoffen op basis van biomassa, maar voor de exacte ligging ervan is verder onderzoek vereist.



Figuur 40: Onzekerheid over grootte verschil tussen prijzen brandstoffen

Het is wel duidelijk dat de schaal die in de Noorderkempen verondersteld wordt, te klein is om conventionele transportbrandstoffen te produceren. Een installatie voor de Noorderkempen (schaal weergegeven als 100%) zou in het verticale deel van de trendlijn opereren, waardoor een relatief kleine schaaltoename resulteert in een significante prijsdaling.

Deze conclusie wordt ondersteunt door verschillende bronnen. Al in 2002 vermeldden Tijmensen et al. dat schaalvoordelen een significante invloed hebben op de productiekosten. In 2008 voerden Wright et al. dezelfde analyse uit als hier gedaan is. Zij bekomen sterk gelijkende resultaten, omdat ook dezelfde inputgegevens gebruikt werden. Aangezien hun inputkost van pyrolyseolie veel lager lag (0,13 EUR/liter, terwijl hier 0,2161 EUR/liter gehanteerd is), is hun kost ook lager en bijgevolg ook hun minimale verkoopprijs lager (0,30 EUR/liter).

Als eindconclusie van de toepassing van pyrolyseolie als transportbrandstof zijn het vooral de schaalvoordelen die de toepassingen in de Noorderkempen zullen benadelen. De relatief kleine jaarlijkse input is onvoldoende om een concurrentiële installatie op te bouwen. Stijgende prijzen van fossiele brandstoffen kunnen het potentieel in de hand werken, maar om een marge te behouden moeten er manieren gevonden worden om de jaarlijkse input aan biomassa te vergroten.

4.4.7 WAARDE PYROLYSEOLIE

Tot slot wordt de waarde van pyrolyseolie bepaald. Hiervoor wordt verondersteld dat de minimale verkoopprijs van de transportbrandstoffen op basis van biomassa gelijk is aan de prijs van fossiele brandstoffen inclusief taksen en exclusief taksen (benzine equivalent). De prijs van conventionele brandstoffen bedraagt 1,554 EUR/liter inclusief taksen en 1,281 exclusief taksen. De waarde van pyrolyseolie wordt bepaald aan de hand van break-even scenario's. De netto contante waarde van de investering wordt gelijkgesteld aan nul.

Voorgaande analyses werden uitgevoerd door de minimale verkoopprijs te laten fluctueren tot de NCW gelijk was aan nul. De waarde van pyrolyseolie lag echter vast op 259,32 EUR/ton. Hier wordt het omgekeerde gedaan. De minimale verkoopprijs wordt vastgelegd op 1,281 EUR/liter of 1,554 EUR/liter en de waarde van pyrolyseolie wordt gekozen opdat de NCW gelijk is aan nul.

De berekening wordt uitgevoerd aan de hand van volgende formule:

$$NCW = \sum_{n=1}^n \frac{CF_n}{(1+i)^n} - I_0$$

Waarbij NCW gelijk wordt gesteld aan nul.

Voorbeeld. Bij een schaal van 100% (parameters gelijk aan initiële waarden) wordt de investering uitgevoerd in jaar 0. Van jaar 1 tot en met jaar 15 zijn er opbrengsten en kosten die een jaarlijkse kasstroom (= opbrengsten – kosten) genereren.

De berekening verschilt van de voorgaande berekening, omdat hier op basis van trail-and-error (via Excel) de kosten worden aangepast in plaats van de opbrengsten. De kosten worden aangepast om een NCW=0 te verkrijgen

$$NCW = 0$$

$$= \sum_{n=1}^N \frac{(1 - \tau) * (\text{inkomende kasstroom} - \text{uitgaande kasstroom}) + (\tau * D_n)}{(1 + i)^n} - I_0$$

$$= \sum_{n=1}^{15} \left[\frac{(0,67) * \left[(6.309.979,631 \text{ EUR}) - \left(8,092 \text{ miljoen EUR} + \left(AP \left(\text{in } \frac{\text{EUR}}{\text{ton}} \right) * 13.650 \text{ ton} \right) \right) + (592.240,00 \text{ EUR}) \right]}{(1 + 0,1)^n} \right]_n$$

– 26,92 miljoen EUR

Via de functie 'doelzoeken' in Excel kan de minimale verkoopprijs berekend (in EUR/liter) worden waarbij de netto contante waarde van de investering gelijk is aan nul. De functie doelzoeken werkt op basis van een algoritme dat via trial-and-error de juiste waarde berekend. Aan de hand van dit algoritme kan berekend worden dat de aankoopprijs (AP) van pyrolysolie per ton –188,40 EUR/ton bedraagt bij een verkoopprijs van 1,554 EUR per liter.

Bij een verkoopprijs van 1,281 EUR per liter wordt de vergelijking:

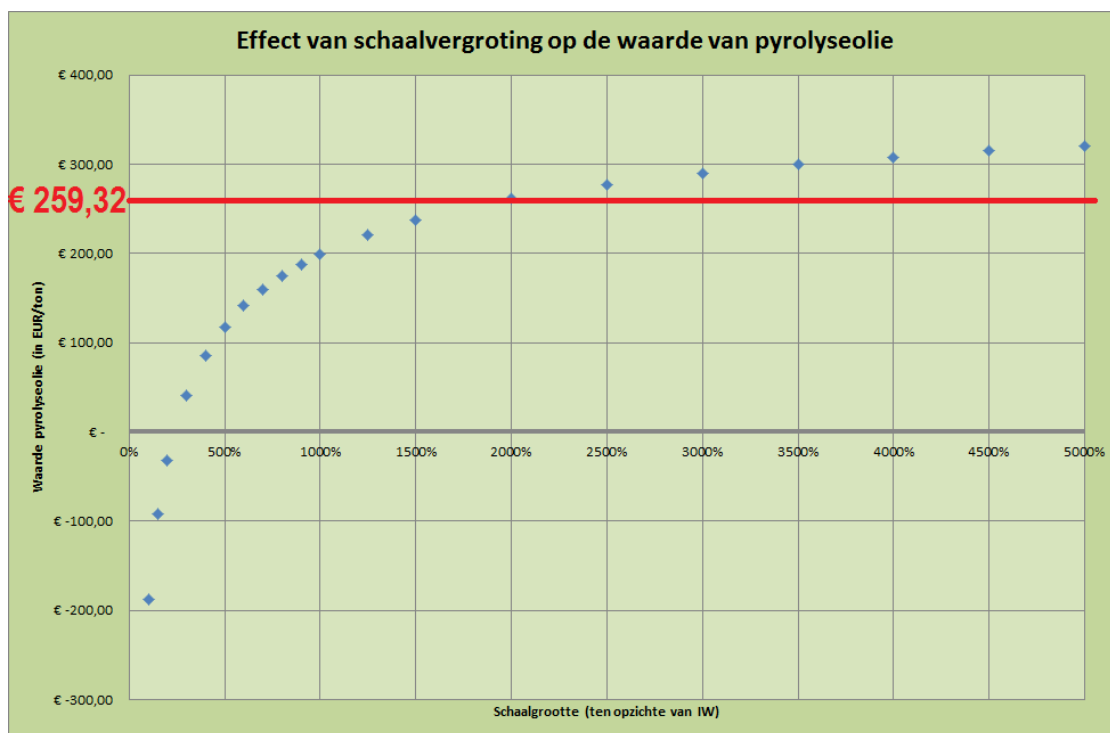
$$= \sum_{n=1}^{15} \left[\frac{(0,67) * \left[(5.201.469,696 \text{ EUR}) - \left(8,092 \text{ miljoen EUR} + \left(AP \left(\text{in } \frac{\text{EUR}}{\text{ton}} \right) * 13.650 \text{ ton} \right) \right) + (592.240,00 \text{ EUR}) \right]}{(1 + 0,1)^n} \right]_n$$

– 26,92 miljoen EUR

De aankoopprijs van pyrolyseolie per ton bedraagt nu -269,61 EUR/ton. Het valt onmiddellijk op dat de hoogte van de verkoopprijs van de transportbrandstoffen een grote invloed heeft op de berekening van de aankoopprijs van pyrolyseolie. Onderstaande tabel en figuur geven de resultaten weer van deze berekeningen.

Tabel 32: Resultaten van de berekening van de waarde van pyrolyseolie met een verkoopprijs van 1,554 EUR/liter

Productie-capaciteit	Investing (in miljoen EUR)	Verkoopprijs (EUR/liter)	Kosten (in miljoen EUR)	Opbrengsten (in miljoen EUR)	Jaarlijkse CF (in miljoen EUR)	Waarde pyrolyseolie (EUR/ton)
100% (IW)	26,92	1,554	1,91	6,31	3,54	-188,40
150% (IW*1,5)	34,33	1,554	3,85	9,46	4,51	-91,81
200% (IW*2)	40,80	1,554	5,95	12,62	5,36	-32,25
500% (IW*5)	70,71	1,554	20,00	31,55	9,30	117,38
1.000% (IW*10)	107,17	1,554	45,59	63,10	14,09	199,11
2.000% (IW*20)	162,44	1,554	99,66	126,20	21,36	261,00
3.000% (IW*30)	207,18	1,554	155,45	189,30	27,24	289,98
4.000% (IW*40)	246,21	1,554	212,17	252,40	32,37	307,88
5.000% (IW*50)	281,49	1,554	269,51	45,59	14,09	320,40



Figuur 41: Effect van schaalvergroting op de waarde van pyrolyseolie met een verkoopprijs van 1,554 EUR/liter

Op deze figuur is duidelijk te zien dat om concurrentieel te kunnen zijn er bij een schaal van 100% (bij de initiële waarden van de parameters) pyrolyseolie geen waarde heeft. Er zou zelfs geld bovenop de levering dienen te worden betaald van -188,40 per ton pyrolyseolie opdat de centrale break-even zou kunnen draaien. Opnieuw kan geconcludeerd worden dat een schaalvergroting zich opdringt.

Vanaf een schaalvergroting van ongeveer 2000% (twintig maal de IW) kan de installatie bij een break-even situatie minimaal 259,32 EUR/ton pyrolyseolie betalen. Bij een verdere vergroting van de schaal neemt de waarde van pyrolyseolie verder toe.

Geconcludeerd kan worden dat het potentieel van de toepassing van pyrolyseolie voor transportbrandstoffen in de Noorderkempen klein is, maar indien de jaarlijkse input aan biomassa kan toenemen, neemt het potentieel van de toepassing toe. Deze masterproef geeft geen aanbeveling over de optimale grootte van een installatie die pyrolyseolie omzet in transportbrandstoffen, maar geeft wel aan dat een input van 21.000 ton biomassa per jaar (op basis van de gekozen parameters) te klein zal om concurrentieel te zijn met de huidige prijzen van fossiele substituten. Ook toont deze masterproef aan dat bij een toename in de schaalgrootte van de installatie, het potentieel toeneemt.

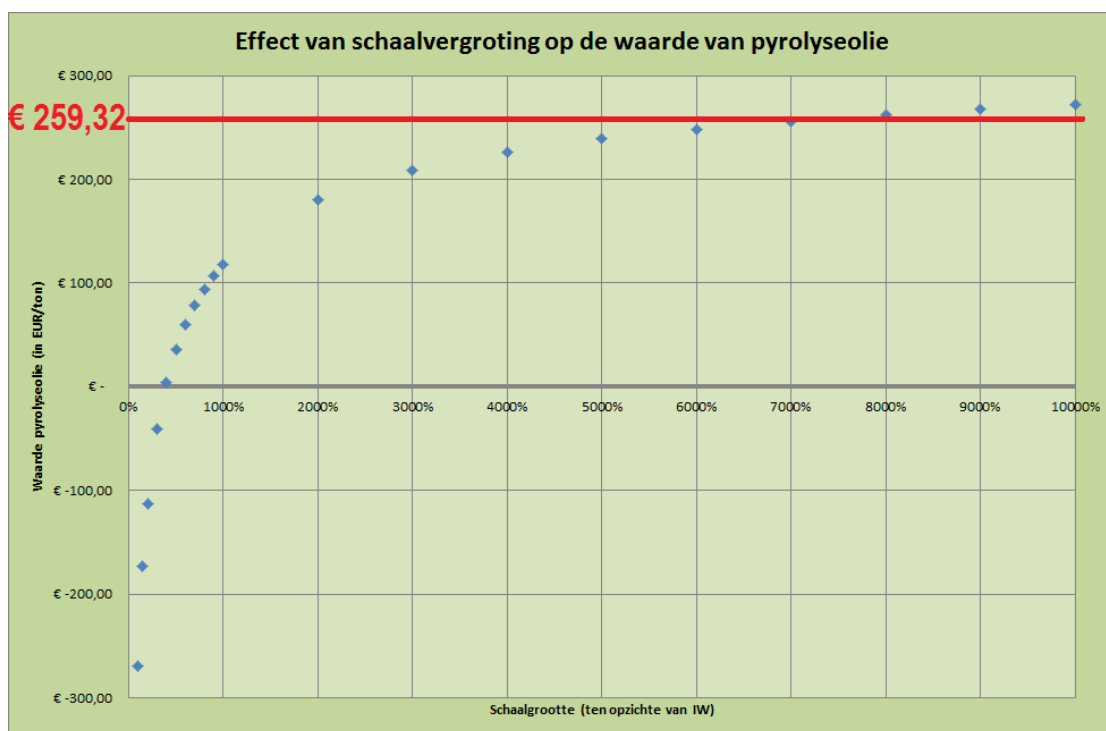
In de veronderstelling dat brandstoffen op basis van biomassa dient te concurreren met brandstoffen op basis van fossiele bronnen exclusief taksen, worden onderstaande resultaten bekomen.

Tabel 33: Resultaten van de berekening van de waarde van pyrolyseolie met een verkoopprijs van 1,281 EUR/liter

Productie-capaciteit	Investering (in miljoen EUR)	Verkoopprijs (EUR/liter)	Kosten (in miljoen EUR)	Opbrensten (in miljoen EUR)	Jaarlijkse CF (in miljoen EUR)	Waarde pyrolyse-olie (EUR/ton)
100% (IW)	26,92	1,281	0,80	5,20	3,54	-269,61
150% (IW*1,5)	34,33	1,281	2,19	7,80	4,51	-173,02
200% (IW*2)	40,80	1,281	3,74	10,40	5,36	-113,46
500% (IW*5)	70,71	1,281	14,45	26,01	9,30	36,17
1.000% (IW*10)	107,17	1,281	34,50	52,01	14,09	117,90
2.000% (IW*20)	162,44	1,281	77,49	104,03	21,36	179,79
5.000% (IW*50)	281,49	1,281	214,08	260,07	37,01	239,19
6.000% (IW*60)	314,03	1,281	260,78	312,09	41,29	248,63
7.000% (IW*70)	344,46	1,281	307,82	364,10	45,29	256,08
8.000% (IW*80)	373,19	1,281	355,14	416,12	49,06	262,18
9.000% (IW*90)	400,52	1,281	402,69	468,13	52,66	267,30
10.000% (IW*100)	452,65	1,281	450,43	520,15	56,09	271,67

Hier ligt de waarde van pyrolyseolie een stuk lager bij de initiële instelling van de parameters (-269,61 EUR/ton in vergelijking met -188,40 EUR/ton). Dit resultaat is minder bevredigend; de centrale levert pas een haalbare aankooprijs van pyrolyseolie op vanaf een *verzeventigvoudiging*. Dit wordt duidelijk gemaakt op onderstaande figuur. Bij het interpreteren van dit resultaat dient

wel rekening gehouden te worden met de assumptie die gemaakt werd waardoor een lagere verkoopprijs verkregen kan worden.



Figuur 42: Effect van schaalvergroting op de waarde van pyrolyseolie met een verkoopprijs van 1,281 EUR/liter

Onderstaande figuur vat de resultaten van dit hoofdstuk bondig samen.



Figuur 43: Conclusie toepassing van pyrolyseolie als transportbrandstof

HOOFDSTUK V: EINDCONCLUSIE

Deze masterproef geeft een uitgebreid beeld over de waarde van pyrolyseolie. De drie toepassingsgebieden die besproken zijn, zijn de toepassing als energiebron, de toepassing als grondstof voor chemicaliën en de toepassing als transportbrandstoffen. Elke toepassing is uitgebreid besproken. Per toepassing zijn de mogelijkheden in het deelgebied besproken, samen met een technologische achtergrond.

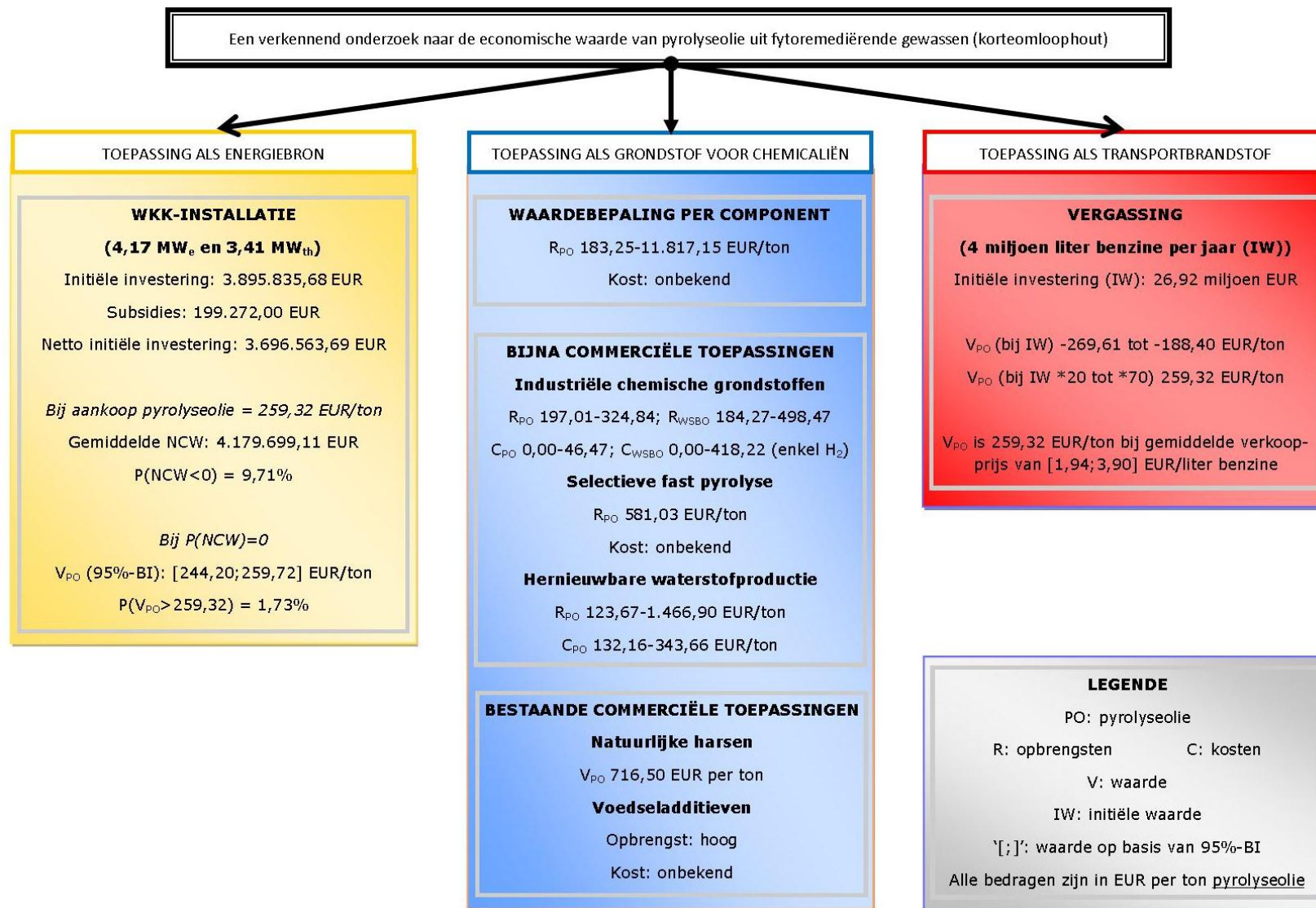
Uiteraard is het belangrijkste aspect van deze masterproef het economische aspect. Dit is dan ook uitvoerig aan bod gekomen. De belangrijkste resultaten zijn weergegeven op onderstaande figuur. Deze figuur geeft de samenvatting van deze masterproef weer. De drie besproken toepassingen van pyrolyseolie zijn weergegeven per kolom op de figuur.

De toepassing als energiebron (hoofdstuk II) geeft de toepassing van pyrolyseolie weer als energiebron. Pyrolyseolie kan verbrand worden voor de productie van elektriciteit en/of warmte. De toepassing als energiebron is uitgewerkt aan de hand van een voorbeeldinstallatie. Indien in de Noorderkempen gekozen wordt voor een WKK-installatie met als input 13.650 ton pyrolyseolie per jaar (of 21.000 ton biomassa per jaar), kan een installatie gebouwd worden met een elektrische capaciteit van 4,17 MW en een thermische capaciteit van 3,41 MW. Jaarlijks kan er 30 GWh elektriciteit geproduceerd worden samen met 24 GWh warmte. Deze installatie vergt een investering van 3.541.581,72 EUR. Indien rekening wordt gehouden met een aankoop prijs van pyrolyseolie van 259,32 EUR per ton is de netto contante waarde gemiddeld 4.179.699,11 EUR, maar er dient rekening gehouden te worden dat 9,71 % van de simulaties (Monte Carlo simulatie) een negatieve NCW oplevert. Indien een investering een NCW groter dan nul vereist met 95% zekerheid, ligt de waarde van pyrolyseolie volgens het 95%-BI [244,20-259,72] EUR per ton.

De toepassing als chemicaliën (hoofdstuk III) geeft de toepassing van pyrolyseolie weer als grondstof voor chemicaliën. De toepassing is in drie stukken besproken. Een eerste deel omvat een waardebepaling aan de hand van de componenten van pyrolyseolie. Via de waarde van de verschillende componenten en de bijhorende concentratie, wordt op basis van een sensitiviteitsanalyse de waarde van pyrolyseolie bepaald. Het 95%-BI wordt geschat op [183,25-11.817,15] EUR per ton. Het tweede deel bevat de bijna-commerciële toepassingen: industriële chemische grondstoffen, selectieve fast pyrolyseolie en hernieuwbare waterstofproductie. Pyrolyseolie kan dienen als grondstof voor de productie van industriële chemische grondstoffen. De waarde van pyrolyseolie wordt geschat aan de hand van de waarde van de producten die uit pyrolyseolie gehaald kunnen worden. De waarde van pyrolyseolie wordt geschat op [197,01-324,84] EUR per ton (95%-BI). De mogelijkheid bestaat om enkel WSBO als input te gebruiken. De waarde van pyrolyseolie (zonder de waarde van WIBO) is dan [184,27-498,47] EUR per ton. De kost van dit proces is niet bepaald, enkel de inputkost van waterstof. Deze kost is afhankelijk van het proces en de input en bedraagt per ton pyrolyseolie maximaal 418,22 EUR. Selectieve fast

pyrolyse is een techniek die inspeelt op fast pyrolyse. Hierdoor wordt de concentratie van bepaalde economisch waardevolle componenten verhoogd. Bijgevolg stijgt de waarde van pyrolyseolie tot 581,03 EUR per ton. Bij hernieuwbare waterstofproductie wordt pyrolyseolie gebruikt om waterstof te produceren. De waarde van pyrolyseolie schommelt tussen 123,67 en 1.466,90 EUR per ton, terwijl de kosten schommelen tussen 132,16 en 343,66 EUR per ton. Het derde deel omvat de bestaande commerciële toepassingen. Twee bestaande technieken zijn besproken: natuurlijke harsen en voedseladditieven. Uit pyrolyseolie kunnen natuurlijke harsen geproduceerd worden. Pyrolyseolie heeft dan een waarde van 716,50 EUR per ton. De kostprijs van dit proces is niet bepaald. Over voedseladditieven is geweten dat de waarde ervan hoog is, waardoor de waarde van pyrolyseolie ook hoog is. De informatie ontbreekt om exacte waarde en kosten te bepalen.

De toepassing als transportbrandstoffen (hoofdstuk IV) geeft de toepassing van pyrolyseolie weer als transportbrandstof. Pyrolyseolie dient een aantal stappen te ondergaan om als transportbrandstof inzetbaar te zijn. Indien in de Noorderkempen gekozen wordt voor een vergassingsinstallatie om transportbrandstoffen te produceren met als input 13.650 ton pyrolyseolie per jaar (of 21.000 ton biomassa per jaar). De installatie heeft het potentieel om jaarlijks 4 miljoen liter benzine equivalenten te produceren. De initiële investering bedraagt 26,92 miljoen EUR. De waarde van pyrolyseolie bij deze gegevens is echter negatief en dus onrealistisch. Indien de schaal wordt vergroot, verhoogd ook de waarde van pyrolyseolie. Echter is een schaalvergroting van maal 20 tot maal 70 vereist voordat pyrolyseolie een waarde heeft van 259,32 EUR per ton. Ook kan gesteld worden dat bij de initiële waarden en met een waarde van pyrolyseolie van 259,32 EUR per ton er een verkoopprijs van benzine is van [1,94-3,90 EUR] per ton.



Figuur 44: Samenvatting economische resultaten

Een aantal bevindingen kunnen gekoppeld worden aan de verschillende resultaten die een beeld scheppen over de waarde van pyrolyseolie. Een eerste bevinding is de duidelijkheid en de mate van detail van de resultaten die gelinkt kan worden aan de hoeveelheid data die beschikbaar is over de toepassing. Over de toepassing als energiebron is reeds veel geschreven, waardoor de resultaten relatief duidelijk zijn. Dit in tegenstelling tot de toepassing van pyrolyseolie als chemicaliën, waarbij weinig economische data is terug te vinden in de literatuur. Dit heeft als gevolg dat de resultaten weergegeven zijn in een brede range of dat kosten niet of nauwelijks bekend zijn. De resultaten van de toepassing van pyrolyseolie als transportbrandstoffen liggen hier tussenin. Er is voldoende data beschikbaar, maar de schaalgrootte komt niet overeen met wat in de Noorderkempen haalbaar is. Hierdoor kunnen de resultaten mogelijk een vertekend beeld opleveren.

Het potentieel van de toepassingen is niet gelijk. Zo is er in de Noorderkempen weinig potentieel om een vergassingsinstallatie te installeren voor de productie van transportbrandstoffen. De voorziene input (13.650 ton pyrolyseolie of 21.000 ton biomassa) per jaar is te weinig om een concurrentiële installatie te bouwen. In tegenstelling tot dit is dat er wel degelijk potentieel is voor een WKK-installatie in de Noorderkempen. De waarde van pyrolyseolie schommelt rond tot net onder de kostprijs ervan. Het potentieel van de toepassing als chemicaliën is wel degelijk aanwezig. Hoe groot dit potentieel is, is onduidelijk. De waarde van pyrolyseolie schommelt sterk, terwijl de kostprijs bij deze berekening onbekend is.

Een derde bevinding is dat de marge op de verkoop van pyrolyseolie verschilt tussen de verschillende toepassingen van pyrolyseolie. De resultaten geven aan dat er het meeste marge is bij de toepassing van pyrolyseolie als grondstof voor chemicaliën. De zekerheid van deze grote marge is onduidelijk, terwijl bij de toepassing als energiebron wel duidelijkheid geeft over de marge. Deze marge is echter zeer klein. De marge op de toepassing als transportbrandstoffen is afhankelijk van de schaalgrootte. De schaalgrootte waarop er marge kan zijn, is te groot op basis van de veronderstelling gemaakt in de Noorderkempen.

De vierde bevinding is dat de vereiste investeringen sterk verschillen tussen de verschillende toepassingen. Zo is er een investering vereist van 3,5 miljoen EUR bij de toepassing als energiebron, terwijl dit oploopt tot bijna 27 miljoen EUR bij de toepassing als transportbrandstoffen. Over de vereiste investering bij een toepassing als chemicaliën is geen informatie beschikbaar.

Een vijfde bevinding betreft de haalbaarheid van de verschillende toepassingen. De toepassing van pyrolyseolie als energiebron kan als haalbaar bestempeld worden, aangezien de installatie beschikbaar is. De literatuur haalt aan dat er problemen kunnen optreden, maar dat oplossingen beschikbaar zijn. De toepassing van pyrolyseolie als chemicaliën is minder haalbaar, aangezien bestaande toepassingen beschermd zijn door patenten en de andere mogelijkheden technisch nog

niet haalbaar zijn. Pyrolyseolie als grondstof voor brandstoffen is technisch wel haalbaar, maar de economische haalbaarheid ervan in de Noorderkempen is zeer klein wegens de te kleine schaal.

De laatste bevinding is de termijn waarop de toepassingen haalbaar zijn. Pyrolyseolie als energiebron voor de productie van warmte en/of elektriciteit is haalbaar op korte termijn. De haalbaarheid van pyrolyseolie als chemicaliën is eerder op lange termijn gericht, omdat technische moeilijkheden eerst overwonnen moeten worden. Pyrolyseolie als transportbrandstoffen is ook eerder haalbaar op lange termijn. De reden hiervoor is dat eerst gezocht moet worden naar extra input aan biomassa.

Als conclusie kan gesteld worden dat de waarde van pyrolyseolie met 95% betrouwbaarheid [244,20-259,72] EUR per ton bedraagt op basis van een WKK-installatie. Deze waarde kan echter oplopen tot enkele duizenden euro's per ton, indien technologische vooruitgang wordt geboekt bij de scheidingsmethoden van economisch waardevolle chemische componenten uit pyrolyseolie.

De fasescheiding van pyrolyseolie kan leiden tot gezamenlijke toepassingen van pyrolyseolie. De toepassing van pyrolyseolie als grondstof voor chemicaliën maakt afwisselend gebruik van WIBO en WSBO. WSBO kan de grondstof zijn voor verschillende toepassingen zoals industriële chemische grondstoffen en hernieuwbare waterstofproductie. WIBO kan de grondstof zijn voor fenolen in de productie van natuurlijke harsen. De toepassing van pyrolyseolie als transportbrandstoffen maakt hoofdzakelijk gebruik van WSBO. Restfracties kunnen verbrand worden voor warmte en/of elektriciteit in de toepassing van pyrolyseolie als energiebron.

LIJST VAN DE GERAADPLEEGDE WERKEN

- Adam Judit, Antonakou, E., Lappas, A., Stöcker, M., Nilsen, M., Bouzga, A., et al. (2006). In situ catalytic upgrading of biomass derived fast pyrolysis vapours in a fixed bed reactor using mesoporous materials. *Microporous and mesoporous materials*(96), 93-101.
- Adjaye, J., & Bakhshi, N. (1995). Production of hydrocarbons by catalytic upgrading of a fast pyrolysis bio-oil. Part I: Conversion over various catalysts. *Fuel Processing Technology*(45), 161-183.
- Athanassiadou, E. (2008, September 17). Bio-resins for the production of composite wood panels. *Presentatie voor 1e workshop 4F crops*. Bologna, Italië: Chimar Helass S.A.
- Balat, M., Balat, M., Kirtay, E., & Balat, H. (2009). Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems. *Energy Conversion and Management*(50), 3147-3157.
- Bartels, J., Pate, M., & Olson, N. (2010). An economic survey of hydrogen production from conventional and alternative energy sources. *International Journal of Hydrogen Energy*(35), 8371-8384.
- Bennett, N. M., Helle, S. S., & Duff, S. J. (2009). Extraction and hydrolysis of levoglucosan from pyrolysis oil. *Bioresource Technology*(100), 6059-6063.
- Bleeker, M., Gorter, S., Kersten, S., van der Ham, L., van den Berg, H., & Veringa, H. (2010). Hydrogen production from pyrolysis oil using the steam-iron process: a process design study. *Clean Tehn Environ Policy*(12), 125-135.
- Bond Beter Leefmilieu. (sd). *Thema: Klimaat & Energie*. Opgeroepen op mei 1, 2011, van Visietekst: <http://www.bondbeterleefmilieu.be/theme.php/3/visie>
- Bradley, D. (2006). *European Market Study for BioOil (Pyrolysis Oil)*. Ottawa: Climate Change Solutions.
- Brammer, J., Lauer, M., & Bridgwater, A. (2006). Opportunities for biomass-derived "bio-oil" in European heat and power markets. *Energy Policy*(34), 2871-2880.
- Brandstofprijzen.info. (2012, Maart 29). *Brandstofprijzen zonder accijns en btw in Nederland, België en Luxemburg donderdag 29 maart 2012*. Opgeroepen op Maart 29, 2012, van Benzine, diesel en LPG prijzen per liter, zonder accijns en btw in Nederland, België en Luxemburg: <http://www.brandstofprijzen.info/brandstof-zonder-belasting.php>
- Bridgwater, A. (1996). Production of high grade fuels and chemicals from catalytic pyrolysis of biomass. *Catalysis Today*(29), 285-295.
- Bridgwater, A. (2008). Biofuel production. *Bioenergy Research Group*. Birmingham: Aston University.
- Bridgwater, A. (2011). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass & Bioenergy*, 1-27.
- Bridgwater, A. V. (2004). Biomass fast pyrolysis. *Thermal Science*(8), 21-49.

- Bridgwater, A., Meier, D., & Radlein, D. (1999). An overview of fast pyrolysis of biomass. *Organic Geochemistry*(30), 1479-1943.
- Bridgwater, A., Toft, A., & Brammer, J. (2002). A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*(6), 181-248.
- Brown, R. (2003). *Biorenewable Resources Engineering New Products from Agriculture*. Ames IA: Iowa State Press.
- BTG-BTL. (2012). *Biomass-to-liquid*. Opgeroepen op April 16, 2012, van Price of Pyrolysis Oil: <http://www.btg-btl.com/index.php?id=130&rid=63&r=projectdev>
- Bulushev, D. A., & Ross, J. R. (2011). Catalysis for conversion of biomass to fuels via pyrolysis and gasification: A review. *Catalysis Today*(171), 1-13.
- Caputo, A. C., Palumbo, M., Pelaggage, P. M., & Scacchia, F. (2005). Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables. *Biomass & Energy*(28), 35-51.
- Carlson, T., Vispute, T., & Huber, G. (2008). Green gasoline by catalytic fast pyrolysis of solid biomass derived compounds. *Chemsuschem*(1), 397-400.
- Centrum voor Milieukunde. (sd). *Fytoremediatie*. Opgeroepen op april 14, 2011, van Milieubiologie: <http://www.uhasselt.be/cmkk>
- COGEN Vlaanderen. (2006). *COGEN Vlaanderen. Voor kwalitatieve warmtekrachtkoppeling in Vlaanderen*. Opgeroepen op April 7, 2012, van <http://www.cogenvlaanderen.be/>
- COGEN Vlaanderen. (2010). *WKK-wegwijzer 2010*. Leuven: COGEN Vlaanderen vzw.
- Czernik, S., Evans, R., & French, R. (2007). Hydrogen from biomass-production by steam reforming of biomass pyrolysis oil. *Catalysis Today*(129), 265-268.
- De Senate. (2009, maart 4). *De Belgische Grondwet*. Opgeroepen op mei 1, 2011, van Titel Ibis: http://www.senate.be/doc/const_nl.html#t1bis
- De Vocht, A. (2008). *SPSS*. Utrecht: Bijleveld Press.
- de Wild, P., den Uil, H., Reith, J., Kiel, J., & Heeres, H. (2009). Biomass valorisation by staged degasification. A new pyrolysis-based thermochemical conversion option to produce value-added chemicals from lignocellulosic biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*(85), 124-133.
- Demirbas, A. (2009). Biorefineries: Current activities and future developments. *Energy Conversion and Management*(50), 2782-2801.
- Dobele, G., Dizhbite, T., Rossinskaja, G., Telysheva, G., Meier, D., Radtke, S., et al. (2003). Pre-treatment of biomass with phosphoric acid prior to fast pyrolysis: A promising method for obtaining 1,6-anhydrosaccharides in high yields. *Journal of Analytical and Applied pyrolysis*(68-69), 197-211.

- Dobele, G., Meier, D., Faix, O., Radtke, S., Rossinskaja, G., & Telysheva, G. (2001). Volatile products of catalytic flash pyrolysis of celluloses. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*(58-59), 453-463.
- Dobele, G., Rossinskaja, G., Dizhbite, T., Telysheva, G., Meier, D., & Faix, O. (2005). Application of catalysts for obtaining 1,6-anhydrosaccharides from cellulose and wood by fast pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*(74), 401-405.
- Dobele, G., Rossinskaja, G., Telysheva, G., Meier, D., & Faix, O. (1999). Cellulose dehydration and depolymerization reactions during pyrolysis in the presence of phosphoric acid. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*(49), 307-317.
- Effendi, A., Gerhauser, H., & Bridgwater, A. (2008). Production of renewable phenolic resins by thermochemical conversion of biomass: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*(12), 2092-2116.
- Elliott, D. C. (2007). Historical Developments in Hydroprocessing Bio-oils. *Energy & Fuels*(21), 1792-1815.
- Elliott, D. C., Hart, T. R., Neuenschwander, G. G., Rotness, L. J., & Zacher, A. H. (2009). Catalytic Hydroprocessing of Biomass Fast Pyrolysis Bio-oil to Produce Hydrocarbon Products. *Environmental Progress & Sustainable Energy*(28), 441-449.
- Energie- & milieu-informatiesysteem voor het Vlaams Gewest. (2009). *MVV - Brandstofcelaandrijving*. Opgeroepen op Februari 8, 2012, van Energie- & milieu-informatiesysteem voor het Vlaams Gewest: <http://www.emis.vito.be/mvv-brandstofcelaandrijving>
- Energie Observatorium. (2011). *Tarief nr: 2011/110*. Brussel: FOD Economie, KMO, Middenstand en Energie.
- Ensyn. (2010, Juni 15). *Pyrolysis Oil: Heat, Electricity, Green Transportation Fuel, and Chemicals Too*. Opgeroepen op Maart 19, 2012, van http://www.canbio.ca/events/ottawa10/goodfellow_e.pdf
- Ensyn. (2011). *Ensyn*. Opgeroepen op Januari 6, 2012, van Producing renewable liquid fuels and chemicals: <http://www.ensyn.com/>
- Essom CO. LTD. (sd). *Heating Values of Hydrogen and Fuels*. Opgeroepen op Maart 19, 2012, van http://www.essom.com/backend/data-file/engineer/engin21_1.pdf
- European Central Bank. (2012, Januari 2). *European Central Bank - Statistical Data Warehouse - Quick View*. Opgeroepen op Januari 2, 2012, van Parameters and transformation: http://sdw.ecb.europa.eu/quickview.do?SERIES_KEY=120.EXR.A.INR.EUR.SP00.A
- European Central Bank. (2012, Januari 2). *European Central Bank - Statistical Data Warehouse - Quick View*. Opgeroepen op Januari 2, 2012, van Parameters and transformation: http://sdw.ecb.europa.eu/quickview.do?SERIES_KEY=120.EXR.A.GBP.EUR.SP00.A
- European Central Bank. (2012, Januari 2). *European Central Bank - Statistical Data Warehouse - Quick View*. Opgeroepen op Januari 2, 2012, van Parameters and transformation: http://sdw.ecb.europa.eu/quickview.do?SERIES_KEY=120.EXR.D.USD.EUR.SP00.A

- European commison. (2011, Oktober 5). *Eurostat*. Opgeroepen op Oktober 17, 2011, van Energy: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/data/main_tables
- European Commission. (2010, oktober 18). *What is the EU doing on climate change?* Opgeroepen op mei 1, 2011, van Climate Action: http://ec.europa.eu/clima/policies/brief/eu/index_en.htm
- European Commission. (2010, oktober 18). *What's causing climate change?* Opgeroepen op mei 1, 2011, van Climate Action: http://ec.europa.eu/clima/policies/brief/causes/index_en.htm
- European Union. (2010). *Energy 2020*. Luxemburg: Publication Office.
- European Union. (sd). *The Market Observatory for Energy*. Luxemburg: Publication Office.
- Europe's energy Portal. (2012, Maart 12). *Europe's energy portal*. Opgeroepen op Maart 12, 2012, van Fuel Prices: <http://www.energy.eu/>
- Eurostat. (2012, Januari 2). *HICP - inflation rate*. Opgeroepen op Januari 2, 2012, van Annual average rate of change (%): <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&plugin=1&language=en&pcode=tsieb060>
- Evans, R., Boyd, L., Elam, C., Czernik, S., French, R., Feik, C., et al. (2004). *Hydrogen from Biomass Catalytic Reforming of Pyrolysis Vapors*. Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- Evans, R., Czernik, S., Chornet, E., Feik, C., French Richard, & Philips, S. (2002). *Engineering scale up of renewable hydrogen production by catalytic steam reforming of peanut shells pyrolysis products*. US: National Renewable Energy Laboratory.
- Fabbri, D., Torri, C., & Baravelli, V. (2007). Effect of zeolites and nanopowder metal oxides on the distribution of chiral anhydrosugars evolved from pyrolysis of cellulose: An analytical study. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*(80), 24-29.
- Federale Overheidsdienst Economie, K.M.O., Middenstand en Energie. (2011). *De energiemarkt in 2008*. Brussel: Federale Overheidsdienst Economie, K.M.O., Middenstand en Energie.
- Feel, B. A., & Graham, R. G. (1998). *Patentnr. US Patent 5 792 340*. Verenigde Staten.
- FOD Economie, K.M.O., Middenstand en Energie. (sd). *Duurzame ontwikkeling met betrekking tot energie*. Opgeroepen op mei 1, 2011, van Economie: http://economie.fgov.be/nl/ondernemingen/enerige/duurzame_ontwikkeling_energie/
- Giroux, R., Freel, B., & Graham, R. (2001). *Patentnr. US Patent 6 326 461*. Verenigde Staten.
- Giroux, R., Freel, B., & Graham, R. (2003). *Patentnr. US Patent 6 555 649*. Verenigde Staten.
- Google Belgium. (2012, Maart 17). *Google*. Opgeroepen op Maart 17, 2012, van Gallon: <http://www.google.be>
- Groep Gemix. (2009). *Welke is de ideale energiemix voor België tegen 2020 en 2030?* Antwerpen: Groep Gemix.

- Groep Gemix. (2010, maart 24). Welke ideale energiemix voor België tegen 2020 en 2030? Antwerpen, Antwerpen, België.
- Guo, X., Wang, S., Guo, Z., Liu, Q., Luo, Z., & Cen, K. (2010). Pyrolysis characteristics of bio-oil fraction separated by molecular distillation. *Applied Energy*(87), 2892-2898.
- H2 NWV. (sd). *Wat is waterstof*. Opgeroepen op April 6, 2012, van De Nederlandse Waterstof en Brandstofcellen vereniging: <http://www.waterstofvereniging.nl/waterstofEnBrandstofcellen/>
- Helle, S., Bennett, N. M., Lau, K., Matsui, J. H., & Duff, S. J. (2007). A kinetic model for production of glucose by hydrolysis of levoglucosan and cellobiosan from pyrolysis oil. *Carbohydrate Research*(342), 2365-2370.
- Hew, K., Tamide, A., Yusup, S., Lee, K., & Ahmad, M. (2010). Catalytic cracking of bio-oil to organic liquid product (OLP). *Bioresource Technology*(101), 8855-8858.
- Hogen, E. (2002, Augustus 16). The Pyrolysis Biorefinery Concept for the Production of Green Fuels and Chemicals. *Presentatie van CANMET Energy Technology Center, Natural Resources Canada*. Concord, NH.
- Holmgren, J., Gosling, C., Marinageli, R., Marker, T., Faraci, G., & Perego, C. (2007). New developments in renewable fuels offer more choices. *Hydrocarbon processing*, 67-72.
- Holmgren, J., Marinangeli, R., Nair, P., Elliott, D., & Bain, R. (2008). Consider upgrading pyrolysis oils into renewable fuels. *Hydrocarbon Processing*, 95-100.
- Horne, P., & Williams, P. (1996). Upgrading of biomass-derived pyrolytic vapours over zeolite ZSM-5 catalyst: effect of catalyst dilution on product yields. *Fuel*(9), 1043-1050.
- Huber, G. W., & Corma, A. (2007). Synergies between Bio- and Oil Refineries for the Production of Fuels from Biomass. *Angewandte Chemie*(46), 7184-7201.
- Huber, G., & Dale, B. (2009). Grassoline at the Pump. *Scientific American*, 52-59.
- Huber, G., Iborra, S., & Corma, A. (2006). Synthesis of Transportation Fuels from Biomass: Chemistry, Catalysts, and Engineering. *Chemical Reviews*(106), 4044-4098.
- Indian Chemicals. (2011, December). *Retail market price trends*. Opgeroepen op December 2011, van Indian Chemicals: <http://www.indian-chemicals.com/chemiprices.htm>
- Indian Office of Energy and Economic Development. (sd). *Tribal energy and environmental information*. Opgeroepen op Maart 17, 2012, van How much energy is there in biomass?: <http://teeic.anl.gov/er/biomass/restech/uses/howmuch/index.cfm>
- InflationData. (2012, Januari 2). *InflationData.com*. Opgeroepen op Januari 2, 2012, van Historical Inflation: http://inflationdata.com/inflation/inflation_rate/historicalinflation.aspx
- Informatie Projectbureau Actief Bodembeheer de Kempen (ABdK). (2008). *Cadmium op landbouwpercelen in de Kempen*. Actief bodembeheer De Kempen.
- Jones, S., Valkenburg, C., Walton, C., Elliott, D., Holladay, J., Stevens, D., et al. (2009). *Production of Gasoline and Diesel from Biomass via Fast Pyrolysis, Hydrotreating and hydrocracking: A Design Case*. Springfield: U.S. Department of Energy.

- Keenan, R. (2010). *Statistical aspects of the energy economy in 2009*. Eurostat.
- Kuppens, T. (2010, November 24). Pyrolyse voor de valorisatie van korteomloophout uit fyto-remediatie (Gastcollege Duurzame Ontwikkeling). Diepenbeek, Limburg, België.
- Kuppens, T. (2012, Maart 6).
- Kuppens, T., & Thewys, T. (2009). *Methode voor de bepaling van de prijs voor korteomloophout uit fyto-remediatie*. Diepenbeek: Universiteit Hasselt.
- Kuppens, T., & Thewys, T. (2010). 18th European Biomass Conference and Exhibition. *Economics of flash pyrolysis of short rotation willow from phytoextraction*.
- Lan, P., Xu, Q., Zhou, M., Lan, L., Zhang, S., & Yan, Y. (2010). Catalytic steam reforming of fast pyrolysis bio-oil in fixed bed and fluidized bed reactors. *Chemical Engineering Technology*(33), 2021-2028.
- Lea-Langton, A., Zin, R., Dupont, V., & Twigg, M. (2012). Biomass pyrolysis oils for hydrogen production using chemical looping reforming. *International journal of hydrogen energy*(37), 2037-2043.
- Lea-Langton, A., ZIn, R., Dupont, V., & Twing, M. (2012). Biomass pyrolysis oils for hydrogen production using chemical looping reforming. *International journal of hydrogen energy*, 37, 2037-2043.
- Lu, Q., Li, W.-Z., Zhang, D., & Zhu, X.-f. (2009). Analytical pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS) of sawdust with Al/SBA-15 catalysts. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*(84), 131-138.
- Lu, Q., Xiong, W.-M., Li, W.-Z., Guo, Q.-X., & Zhu, X.-F. (2009). Catalytic pyrolysis of cellulose with sulfated metal oxides: A promising method for obtaining high yield of light furan compounds. *Bioresource Technology*(100), 4871-4876.
- Lu, Q., Zhang, Z.-F., Dong, C.-Q., & Zhu, X.-F. (2010). Catalytic Upgrading of Biomass Fast Pyrolysis Vapors with Nano Metal Oxides: An Analytical Py-GC/MS Study. *Energies*(3), 1805-1820.
- Lund, P. (2011). Boosting new renewable technologies towards grid parity - Economic and policy aspects. *Renewable Energy*(36), 2776-2784.
- Marker, T., Petri, J., Kalnes, T., McCall, M., Mackowiak, D., Jerosky, B., et al. (2005). *Opportunities for Biorenewables in Oil Refineries. Final Technical Report*. Illinois: US Department of Energy.
- Market Publishers. (2012, Januari 23). *Butene (Butylene): European Union Market Outlook 2011 and Forecast till 2016*. Opgeroepen op Februari 16, 2012, van Market Publishers: <http://marketpublishers.com/>
- Marsman, J., Wildschut, J., Evers, P., de Koning, S., & Heeres, H. (2008). Identification and classification of components in flash pyrolysis oil and hydrodeoxygenated oils by two-dimensional gas chromatography and time-of-flight mass spectrometry. *Journal of Chromatography*(1188), 17-25.

- Marsman, J., Wildschut, J., Mahfud, F., & Heeres, H. (2007). Identification of components in fast pyrolysis oil and upgraded products by comprehensive two-dimensional gas chromatography and flame ionisation detection. *Journal of Chromatography*(1150), 21-27.
- Massachusetts Institute of Technology. (2007, April 15). *Units & conversions facts sheet*. Opgeroepen op April 5, 2012, van MIT Energy Club: http://www.mitenergyclub.org/assets/2008/11/15/Units_ConvFactors.MIT_EnergyClub_Factsheet.v8.pdf
- Medisch Milieukundigen. (2006). *FAQ Zware Metalen Noorderkempen 2006*. Brussel: Medisch Milieukundigen.
- Medisch Milieukundigen. (2011). *Gezondheidseffecten?* Opgeroepen op April 28, 2011, van Gezondheid en Milieu: <http://www.mmk.be>
- Meers, E., Van Slycken, S., Adriaensen, K., Ruttens, A., Vangronsveld, J., Du Laing, G., et al. (2010). The use of bio-energy crops (*Zea mays*) for 'phytoattenuation' of heavy metals on moderately contaminated soils: A field experiment. *Chemosphere*(78), 35-41.
- Meiresonne, L. (2006). *Kansen, mogelijkheden en toekomst voor de populierenteelt in Vlaanderen. Korte-omloop hout voor energieproductie plaats in het Vlaams bosbeleid*. Geraardsbergen: Instituut voor natuur- en bosonderzoek.
- Mercken, R. (2004). *De investeringsbeslissing*. Antwerpen-Apeldoorn: Garant.
- Moens, L. (2009). Upgrading of Bio-oil for Fuel Production. *13th Annual Green Chemistry & Engineering Conference*, (pp. 1-21).
- Nakos, P., Tsiantzi, S., & Athanassiadou, E. (2001). *Wood Adhesives Made with Pyrolysis Oil*. Hanover: European Panel Federation & Wilhelm Klauwitz Institute.
- Nawrot, T., Plusquin, M., Hogervorst, J., Roals, H., Celis, H., Thijs, L., et al. (2006). Environmental exposure to cadmium and risk of cancer: a positive population-based study. *Lancet Oncology*(7), 119-126.
- New Hampshire Office of Energy & Planning. (2004). *New Hampshire Bio-oil Opportunity Analysis*. New Hampshire.
- Ni, M., Leung, D., Leung, M., & Sumathy, K. (2006). An overview of hydrogen production from biomass. *Fuel Processing Technology*(87), 461-472.
- Nik-Azar, M., Hajaligol, M., Sohrabi, M., & Dabir, B. (1997). Mineral matter effects in rapid pyrolysis of beech wood. *Fuel Processing Technology*(51), 7-17.
- Nowakowski, D., Jones, J., Brydson, R., & Ross, A. (2007). Potassium catalysis in the pyrolysis behaviour of short rotation willow coppice. *Fuel*(86), 2389-2402.
- Olsson, O., Vinterbäck, J., & Porsö, C. (2010). *WP3 - Wood fuel price statistics in Europe - D 3.1*. Uppsala: Swedisch University of Agricultural Sciences.
- Oomen, A., Janssen, P., van Eijkeren, J., Bakker, M., & Baars, A. (2006). *Cadmium in de Kempen. Een integrale risicobeoordeling*. Mechelen: OVAM.

- Pacific Northwest National Laboratory & National Renewable Energy Laboratory. (2004). *Top value added chemicals from biomass. Volume 1 - Results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gas*. Oak Ridge: US department of Energy.
- Padro, C., & Putsche, V. (1999). *Survey of the economics of hydrogen technologies*. Colorado: National Renewable Energy Laboratory Technical Report.
- Pan, W.-P., & Richards, G. (1989). Influence of metal ions on volatile products of pyrolysis of wood. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*(16), 117-126.
- Patel, R. N., Bandyopadhyay, S., & Ganesh, A. (2011). Extraction of cardanol and phenol from bio-oils obtained through vacuum pyrolysis of biomass using supercritical fluid extraction. *Energy*(36), 1535-1542.
- Pattiya, A., Titiloye, J., & Bridgwater, A. (2008). Fast pyrolysis of cassava rhizome in the presence of catalyts. *Journal of Analitical and Applied Pyrolysis*(81), 72-79.
- Peacocke, G., Bridgwater, A., & Brammer, J. (2006). Techno-economic assessment of power production from the Wellman and BTG fast pyrolysis processes. In A. Bridgwater, & D. Boocock, *Berg Books* (pp. 1785-1802). CPL Press.
- Piskorz, J., Majerski, P., Radlein, D., Vladars-Usas, A., & Scott, D. (200). Flash pyrolysis of cellulose for production of anhydro-oligomers. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*(56), 145-166.
- Portaal belgium.be. (2011). *Hoe wordt de opwarming van de aarde aangepakt?* Opgeroepen op mei 1, 2011, van Leefmilieu: <http://www.belgium.be/nl/leefmilieu/klimaatverandering/aanpak/>
- Prins, M., Ptasinski, K., & Janssen, F. (2006). Torrefaction of wood Part 2. Analysis of products. *Journal of Analytical and Applied pyrolysis*(77), 35-40.
- Prins, W. (1998). *Marktstudie voor toepassing van pyrolyse olie*. Enschede: Biomass technology group.
- Red Arrow Products Company LLC. (2010). *Red Arrow*. Opgeroepen op Januari 6, 2012, van Creating a savory experience: <http://www.redarrowusa.com/index.html>
- Reed Business Information Limited. (2011, December). *ICIS pricing*. Opgeroepen op December 2011, van ICIS pricing: <http://www.icispricing.com>
- Reed Business Information Limited. (2011, Juni 24). *ICIS pricing Phenol (Europe)*. Opgeroepen op Januari 7, 2012, van ICIC pricing: http://www.icispricing.com/il_shared/Samples/SubPage52.asp
- Resource Systems Group Inc. (2005). *Markets for chemicals from a pyrolysis oil bio-refinery in New Hampshire*. New Hampshire: New Hampshire Office of Energy and Planning.
- Ringer, M., Putsche, V., & Scahill, J. (2006). *Large-Scale Pyrolysis Oil Production: A Technology Assessment and Economic Analysis*. Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- Rodrigue, J.-P. (2012). *Energy Content of some Combustibles (in MJ/kg)*. Opgeroepen op Maart 10, 2012, van The geography of transport systems: <http://people.hofstra.edu/geotrans/eng/ch8en/conc8en/energycontent.html>

- Rogers, J., & Brammer, J. (2012). Estimation of the production of fast pyrolysis bio-oil. *Biomass and Bioenergy*(36), 208-217.
- Shimada, N., Kawamoto, H., & Saka, S. (2008). Different action of alkali/alkaline earth metal chlorides on cellulose pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*(81), 80-87.
- Sigma-Aldrich Co. (2011, December). *Sigma-Aldrich*. Opgeroepen op December 2011, van Sigma-Aldrich: <http://www.sigmaaldrich.com>
- Sleco. (2012). *Sleco*. Opgeroepen op April 7, 2012, van Rookgasreiniging: <http://www.sleco.be/Rookgasreiniging.962.0.html?&L=1>
- Staessen, J., Carrein, J., Richart, T., Nawrot, T., Roels, H., Thijs, L., et al. (2009). *Cadmiumpraktijkids voor Artsen*. Jan A. Staessen.
- Stals, M., Carleer, R., Reggers, G., Schreurs, S., & Yperman, J. (2010). Flash pyrolysis of heavy metal contaminated hardwoods from phytoremediation: Characterisation of biomass, pyrolysis oil and char/ash fraction. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*(89), 22-29.
- Stals, M., Thijssen, E., Vangronsveld, J., Carleer, R., Schreurs, S., & Yperman, J. (2010). Flash pyrolysis of heavy metal contaminated biomass from phytoremediation: Influence of temperature, entrained flow and wood/leaves blended pyrolysis on the behaviour of heavy metals. *Journal of analytical and applied pyrolysis*(87), 1-7.
- Szmant, H. H. (1989). *Organic building blocks of the chemical industry*. Canada: John Wiley & Sons Inc.
- Terrachoise. (sd). *EcoLogo Program*. Opgeroepen op Januari 6, 2012, van Third-party Certification of environmentally-preferable products: <http://www.ecologo.org/en/>
- Thane, P. (2010, Oktober). Bioenergy pyrolysis oil for heat and power. *Bioenergy Insight*, pp. 52-54.
- The European Wind Energy Association. (2010). *Wind energy The facts*. Opgeroepen op 10 17, 2011, van Chapter 6: Wind power compared to conventional power generation: <http://www.wind-energy-the-facts.org/en/part-3-economics-of-wind-power/chapter-6-wind-power-compared-to-conventional-power-generation/>
- Thewys, T., & Kuppens, T. (2008). Economics of willow pyrolysis after phytoextraction. *International Journal of Phytoremediation*(6), 561-583.
- Tijmenssen, M., Faaij, A., Hamelinck, C., & van Hardeveld, M. (2002). Exploration of the possibilities for production of Fischer Tropsch liquids and power via biomass gasification. *Biomass en Bioenergy*(23), 129-152.
- Torri, C., Lesci, I., & Fabri, D. (2009). Analytical study on the pyrolytic behaviour of cellulose in the presence of MCM-41 mesoporous materials. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*(85), 192-196.
- Tribolex. (sd). *Dynamische en kinematische viscositeit*. Opgeroepen op mei 5, 2011, van Tribologie/smeertechnieken: <http://www.tribolex.nl/viscositeit.html>

- Vagia, E., & Lemonidou, A. (2007). Thermodynamic analysis of hydrogen production via steam reforming of selected components of aqueous bio-oil fraction. *International Journal of Hydrogen Energy*(32), 212-223.
- van Haveren, J., Scott, E. L., & Sanders, J. (2008). Bulk chemicals from biomass. *Biofuels Biodproducts Biorefining*(2), 41-57.
- Vangronsveld, J., Herzig, R., Weyens, N., Boulet, J., Adriaensen, K., & Ruttens, A. (2009). Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field [review]. *Environmental Science and Pollution Research*(16), 765-794.
- Venderbosch, R. H., & Prins, W. (2010). Fast pyrolysis technology development. *Biofuels Biodproducts & Biorefining*, 4, 178-208.
- Verbinnen, B., Van Caneghem, J., Vandecasteele, C., Block, C., & Van Hooste, H. (2010, december). *Milieurapport Vlaanderen Achtergronddocument Industrie*. Opgeroepen op april 8, 2011, van Vlaamse Milieumaatschappij: <http://www.milieurapport.be>
- Vergopoulou-Markessini, E., & Thessaloniki, G. (2003). *Patentnr. US Patent 6 579 963*. Verenigde Staten.
- Verykios, X. (2004). Bio-Electricity. *Efficient and clean production of electricity from biomass via pyrolysis oil and hydrogen utilizing fuel cells* (pp. 1-11). Uppsala: European commission.
- Vispute, T. P., Zhang, H., Sanna, A., Xiao, R., & Huber, G. W. (2010). Renewable Chemical Commodity Feedstocks from Integrated Catalytic Processing of Pyrolysis Oils. *Science*(330), 1222-1227.
- Vispute, T. P., Zhang, H., Sanna, A., Xiao, R., & Huber, G. W. (2010, November 26). *Supporting Online Material for Renewable Chemical Commodity Feedstocks from Integrated Catalytic Processing of Pyrolysis Oils*. Opgeroepen op Oktober 20, 2011, van Science: www.science.org/cgi/content/full/330/6008/1222/DC1
- Vitasari, C. R., Meindersma, G., & de Haan, A. B. (2011). Water extraction of pyrolysis oil: The first step for recovery of renewable chemicals. *Bioresource Technology*(102), 7204-7210.
- VITO & ODE Vlaanderen. (2006). *Bio-energie. Omzetten van vaste biomassa in hernieuwbare warmte en elektriciteit*. Kessel-lo: ODE Vlaanderen.
- Vlaams energieagentschap. (2012). *Verhoogde investeringsaftrek voor energiebesparende investeringen*. Brussel: Vlaamse Overheid.
- Vlaams Instituut voor Wetenschappelijk en Technologisch Aspectenonderzoek (viWTA). (2008). *Waterstof. Motor van de toekomst?* Brussel: Vlaams Parlement.
- Vlaamse Overheid. (2006). *Actieplan cadmium*.
- Vlaamse Overheid. (2012). *Agentschap onderenemen. Vlaams energieagentschap. Limitatieve technologieënlijst*. Vlaamse overheid.
- Vlaamse overheid Departement Leefmilieu, Natuur & Energie. (2006). *Het Vlaams Klimaatbeleidsplan 2006-2012*. Brussel: Vlaamse overheid Departement Leefmilieu, Natuur & Energie.

- Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt. (2012). *WKK- warmtekrachtkoppeling*. Opgeroepen op Maart 26, 2012, van Uw WKK-Project: <http://www.vreg.be/wkk-warmtekrachtkoppeling>
- Voets, T., Kuppens, T., Cornelissen, T., & Thewys, T. (2011). Economics of electricity and heat production by gasification or flash pyrolysis of short rotation coppice in Flanders (Belgium). *Biomass & Energy*, 1-13.
- Wins, C. (2008). *Fytoremediatie in de Belgische Kempen. Effect op het landbouwinkomen*. Diepenbeek: U Hasselt.
- Wright, M. M., Brown, R. C., & Boateng, A. A. (2008). Distributed processing of biomass to bio-oil for subsequent production of Fischer-Tropsch liquids. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, 2, 229-238.
- Wright, M. M., Daugaard, D. E., Satrio, J. A., & Brown, R. C. (2010). Techno-economic analysis of biomass fast pyrolysis to transportation fuels. *Fuel*(89), 2-10.
- Wright, M. M., Satrio, J. A., Brown, R. C., Daugaard, D. E., & Hsu, D. D. (2010). *Techno-Economic Analysis of Biomass Fast Pyrolysis to Transportation Fuels*. Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- Zeitsch, K. (2000). *The chemistry and technology of furfural and its many by-products*. Amsterdam: Elsevier Science B.V.
- Zhang, Q., Chang, J., Wang, T., & Xu, Y. (2007). Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research. *Energy Conversion & Management*, 87-92.
- Zhang, S., Yan, Y., Tingchen, L., & Ren, Z. (2005). Upgrading of liquid fuel from the pyrolysis of biomass. *Bioresource Technology*(96), 545-550.
- Zhang, Y., Li, W., Zhang, S., Xu, Q., & Yan, Y. (2012). Steam Reforming of Bio-Oil for Hydrogen Production: Effect of Ni-Co Bimetallic Catalysts. *Chemical Engineering Technology*(35), 302-308.
- Zhu, X.-f., & Lu, Q. (2010). Production of chemicals from Selective Fast Pyrolysis of Biomass. In M. Momba, & F. Bux, *Biomass* (p. 202). Sciyo, Croatia: Sciyo.com.

FIGURENLIJST

Figuur 1: Toepassingen pyrolyseproducten (Bridgwater A. , 2011)

Figuur 2: De prijs van pyrolyseolie (BTG-BTL, 2012)

Figuur 3: Verkoopprijs pyrolyseolie (met wilg als input) (Rogers & Brammer, 2012)

Figuur 4: Processtappen energieproductie *(Balat, Balat, Kirtay, & Balat, 2009) *(VITO & ODE Vlaanderen, 2006) *** (Bridgwater, Toft, & Brammer, 2002)

Figuur 5: Processtappen chemicaliën

Figuur 6: Processtappen transportbrandstoffen

Figuur 7: Concept van een bio-raffinaderij. (Vitasari, Meindersma, & de Haan, 2011)

Figuur 8: Bioplex (Hogen, 2002)

Figuur 9: Schaal WKK-installatie (COGEN Vlaanderen, 2010)

Figuur 10: Model voor berekening output op basis van input (Caputo, Palumbo, Pelaggage, & Scacchia, 2005)

Figuur 11: Vergelijking WKK en gescheiden opwekking

Figuur 12: Kansverdeling NCW WKK-installatie via Monte Carlo simulatie (1.000 simulaties)

Figuur 13: Cumulatieve kansverdeling NCW WKK-installatie via Monte Carlo simulatie (1.000 simulaties)

Figuur 14: Kansverdeling maximale waarde pyrolyseolie WKK-installatie via Monte Carlo simulatie (1.000 simulaties)

Figuur 15: Cumulatieve kansverdeling maximale waarde pyrolyseolie WKK-installatie via Monte Carlo simulatie (1.000 simulaties)

Figuur 16: Kansverdeling maximale waarde pyrolyseolie WKK-installatie bij $P(\text{NCW} > 0) = 0,95$ (120 trails-and-errors)

Figuur 17: Cumulatieve kansverdeling maximale waarde pyrolyseolie WKK-installatie bij $P(\text{NCW} > 0) = 0,95$ (120 trails-and-errors)

Figuur 18: Conclusie toepassing van pyrolyseolie als energiebron

Figuur 19: Marktgrootte en marktprijs voor chemicaliën uit pyrolyseolie (New Hampshire Office of Energy & Planning, 2004)

Figuur 20: Chemische samenstelling pyrolyseolie (Moens, 2009)

Figuur 21: Kansverdeling van de waarde van pyrolyseolie (EUR/ton)

Figuur 22: Cumulatieve kansverdeling van de waarde van pyrolyseolie (EUR/ton)

Figuur 23: Blokdiagram van het proces voor de omzetting van pyrolyseolie tot chemische grondstoffen. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

Figuur 24: Procentuele productverdeling van WSBO, WSBO na LTH en WSBO na LTH en HTH. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

Figuur 25: Verdeling eindproducten van WSBO en biomassa. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

Figuur 26: OSB model (Resource Systems Group Inc., 2005)

Figuur 27: EcoLogo (Terrachoise)

Figuur 28: Typische proces voor de isolatie van natuurlijk hars uit pyrolyseolie (gepatenteerd) (Effendi, Gerhauser, & Bridgwater, 2008)

Figuur 29: Conclusie toepassing van pyrolyseolie als grondstof voor chemicaliën

Figuur 30: Van biomassa tot transportbrandstoffen via hydroprocessing (Bridgwater A. , 2011)

Figuur 31: Geschatte productopbrengst van het hydrotreating en hydrocracking van WIBO (Marker, et al., 2005)

Figuur 32: Katalytisch kraken (Bridgwater A. , 2011)

Figuur 33: Katalytisch kraken van pyrolyseolie tot geüpgraded stabiele olie (Bridgwater A. , 2011)

Figuur 34: Omvorming van componenten in pyrolyseolie (met ZSM-5 katalysator) (Huber & Corma, 2007)

Figuur 35: Van cellulose tot aromaten via katalytisch kraken (Huber & Dale, 2009)

Figuur 36: Van biomassa tot transportbrandstoffen via vergassing (Bridgwater A. , 2011)

Figuur 37: Kansverdeling minimale verkoopprijs via Monte Carlo simulatie (1.000 simulaties)

Figuur 38: Cumulatieve kans minimale verkoopprijs via Monte Carlo simulatie (1.000 simulaties)

Figuur 39: Effect van schaalvergroting op de minimale verkoopprijs van transportbrandstoffen

Figuur 40: Onzekerheid over grootte verschil tussen prijzen brandstoffen

Figuur 41: Effect van schaalvergroting op de waarde van pyrolyseolie met een verkoopprijs van 1,554 EUR/liter

Figuur 42: Effect van schaalvergroting op de waarde van pyrolyseolie met een verkoopprijs van 1,281 EUR/liter

Figuur 43: Conclusie toepassing van pyrolyseolie als transportbrandstof

Figuur 44: Samenvatting economische resultaten

Figuur 45: Fasescheiding WIBO en WSBO (Moens, 2009)

Figuur 46: Productiekost pyrolyseolie op basis van Monte Carlo simulatie (N=1.000)

Figuur 47: Effect van het conversiepercentage op de productiekost van pyrolyseolie

Figuur 48: Triangulaire kansverdeling marktwaarden 'formic acid'

Figuur 49: Uniforme kansverdeling verkleiningsfactor 'propionic acid'

Figuur 50: Reactieschema van hydrogeneren en zeoliet upgrading van pyrolyseolie. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

Figuur 51: Relatie tussen waterstoftoevoeging en chemische eindproducten. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

Figuur 52: Relatie tussen charvorming en H/Ceff ratio. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

Figuur 53: Werking van een brandstofcel (Vlaams Instituut voor Wetenschappelijk en Technologisch Aspectenonderzoek (viWTA), 2008)

Figuur 54: Schematisch diagram van catalytic steam reforming van pyrolyseolie in een fluidized bed reactor (Lan, Xu, Zhou, Lan, Zhang, & Yan, 2010)

Figuur 55: Schematisch diagram van een steam-iron proces (Bleeker, Gorter, Kersten, van der Ham, van den Berg, & Veringa, 2010)

Figuur 56: Reacties in het steam-iron proces (Bleeker, Gorter, Kersten, van der Ham, van den Berg, & Veringa, 2010)

Figuur 57: Productieproces transportbrandstoffen (Jones, et al., 2009)

Figuur 58: Vergassing van pyrolyseolie tot transportbrandstoffen (Wright, Brown, & Boateng, 2008)

TABELLENLIJST

Tabel 1: Marktaandeel van de energiebronnen in België (2009) (Federale Overheidsdienst Economie, K.M.O., Middenstand en Energie, 2011)

Tabel 2: Marktwaaarde pyrolyse-substituten

Tabel 3: Marktwaaarde pyrolyseolie (vergelijkingsbasis)

Tabel 4: Sensitieve parameters bij bepaling productiekost pyrolyseolie

Tabel 5: Beschikbare technologieën voor de omzetting van pyrolyseolie in energie (elektriciteit en warmte) (Brammer, Lauer, & Bridgwater, 2006)

Tabel 6: Gemiddelde maandprijs van een warmtekrachtcertificaat in het afgelopen jaar (Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt, 2012)

Tabel 7: Gemiddelde maandprijs van een groenestroomcertificaat van het afgelopen jaar (Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt, 2012)

Tabel 8: Componenten lening (alle bedragen in EUR)

Tabel 9: NCW berekening van investering in een WKK-installatie (warmteopbrengst 100%) (alle bedragen in EUR)

Tabel 10: Sensitieve parameters van WKK installatie

Tabel 11: Samenvatting resultaat Monte Carlo simulatie

Tabel 12: Samenvatting resultaat Monte Carlo simulatie

Tabel 13: Samenvatting resultaat trial-and-error

Tabel 14: Data voor regressie verkleiningsfactor

Tabel 15: Summary statistics van kansverdeling van de waarde van pyrolyseolie

Tabel 16: Productverdeling chemische grondstoffen (met onder aromaten: benzeen (B), toluen (T), xyleen (X), ethylbenzeen (E), styreen (S), indeen (I) en naftaleen (N) en met onder olefins: ethyleen (E), propyleen (P) en butyleen (B)). (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

Tabel 17: Marktwaaarde chemische bouwstenen

Tabel 18: Inputgegevens van waterstof voor de productie van industriële chemische grondstoffen (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

Tabel 19: Resultaat model industriële chemische grondstoffen (per ton pyrolyseolie)

Tabel 20: Toepassingen van selectieve fast pyrolyse (Zhu & Lu, 2010)

Tabel 21: Karakteristieken van pyrolyseolie (Bridgwater A. , 2011)

Tabel 22: Inputkost voor upgraden WIBO volgens Marker et al. (2005)

Tabel 23: Waarde van de output bij upgraden WIBO volgens Marker et al. (2005)

Tabel 24: Waarde eindproducten geïntegreerde katalytische pyrolyse

Tabel 25: Verschillen tussen de vergassing van biomassa en de vergassing van pyrolyseolie (Bridgwater A. , 2008)

Tabel 26: Kapitaalkosten van een vergassingsinstallatie (Wright, Brown, & Boateng, 2008)

Tabel 27: Operationele kosten van vergassing (Wright, Brown, & Boateng, 2008) (Tijmensen, Faaij, Hamelinck, & van Hardeveld, 2002)

Tabel 28: Sensitieve parameters van de pyrolyseolie vergassings- en FT synthese-installatie (Tijmensen, Faaij, Hamelinck, & van Hardeveld, 2002)

Tabel 29: Samenvatting resultaat Monte Carlo simulatie

Tabel 30: Input data voor schaalvergroting installatie van vergassing en FT-synthese pyrolyseolie

Tabel 31: Effect schaalvergrotingen op minimale verkoopprijs

Tabel 32: Resultaten van de berekening van de waarde van pyrolyseolie met een verkoopprijs van 1,554 EUR/liter

Tabel 33: Resultaten van de berekening van de waarde van pyrolyseolie met een verkoopprijs van 1,281 EUR/liter

Tabel 34: Gehanteerde wisselkoersen

Tabel 35: Gehanteerde inflaties

Tabel 36: Productiekost pyrolyseolie op basis van Monte Carlo simulatie (N=1.000)

Tabel 37: Inkomsten NCW berekening van investering in WKK-installatie (warmte opbrengst 50%) (alle bedragen in EUR)

Tabel 38: Lijst met parameters, initiële waarden en grenswaarden toepassing als energiebron

Tabel 39: Chemische componenten uit pyrolyseolie

Tabel 40: Waardebepaling per component van pyrolyseolie

Tabel 41: Marktwaaarde componenten

Tabel 42: Toepassingen van waterstof (Vlaams Instituut voor Wetenschappelijk en Technologisch Aspectenonderzoek (viWTA), 2008)

Tabel 43: Grondstoffen, conversietechnieken en co-producten van de productie van waterstof (Evans, Czernik, Chornet, Feik, French Richard, & Philips, 2002)

Tabel 44: Schaalvergrotingen vergassingsinstallatie (toepassing als transportbrandstoffen)

BIJLAGEN

BIJLAGE 1: GEHANTEERDE WISSELKOERSEN EN INFLATIECORRECTIES

Alle bedragen in deze bundel zijn omgerekend zodat ze zijn uitgedrukt in EUR aangepast aan de inflatie tot 2011. Onderstaande tabel bevat de wisselkoersen op 30 december 2011 voor de verschillende munten die gebruikt werden bij de uitwerking van deze masterproef.

Tabel 34: Gehanteerde wisselkoersen

Munteenheid	Wisselkoers (30/11/2011)	Bron
Dollar	1 EUR = 1,2939 USD	(European Central Bank, 2012)
Britse Pond	1 EUR = 0,86788 GBP	(European Central Bank, 2012)
Indiase Roepie	1 EUR = 64,8859 INR	(European Central Bank, 2012)

De volgende tabel geeft de gemiddelde inflatie per jaar weer van Europa en de Verenigde Staten van Amerika.

Tabel 35: Gehanteerde inflaties

Jaar	Inflatie EU ⁴⁷	Inflatie VS ⁴⁸
2011	1,6%	3,16%
2010	1,1%	1,64%
2009	1,1%	-0,34%
2008	2,1%	3,85%
2007	2,3%	2,85%
2006	2,2%	3,24%
2005	2,1%	3,39%
2004	2,1%	2,68%
2003	2,2%	2,27%
2002	2,2%	1,59%
2001	2,1%	2,83%
2000	3,3%	3,38%
1999	0,3%	2,19%
1998	1,6%	1,55%
1997	2,7%	2,34%

Indien in de literatuur een getal is teruggevonden, werd deze waarde via de inflatiecorrectie in een waarde voor 2011 omgerekend. Vervolgens wordt indien nodig de waarde via de wisselkoersen uitgedrukt in EUR. Dus alle getallen (tenzij anders vermeld) zijn uitgedrukt in EUR met een inflatiecorrectie tot en met 2011.

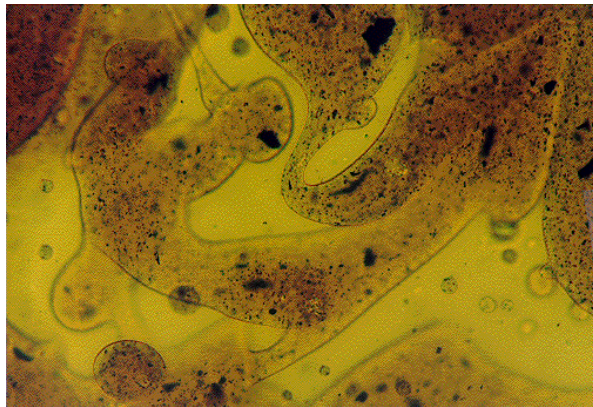
⁴⁷ (Eurostat, 2012)

⁴⁸ (InflationData, 2012)

BIJLAGE 2: PRIMAIRE OPDELING

De primaire opdeling is een belangrijke techniek waar bij vele toepassingen gebruik van gemaakt kan worden. De primaire opdeling is een fasescheiding die optreedt bij het toevoegen van een bepaalde hoeveelheid water aan pyrolyseolie waarbij het maximale watergehalte van pyrolyseolie overschreden wordt. Dit ligt typisch in de range van 30-45 wt%. Een andere methode om de fasen te scheiden is door middel van zwaartekracht. Uiteindelijk ontstaan er twee fasen: een waterige fase (WSBO) en een olie fase (WIBO). (Vitasari, Meindersma, & de Haan, 2011) (Marker, et al., 2005)

De verhouding WSBO over WIBO schommelt tussen 0,70/0,30 en 0,60/0,40 wanneer rekening wordt gehouden met biomassa als input voor het fast pyrolyse proces. (Marker, et al., 2005) (Vitasari, Meindersma, & de Haan, 2011)



Figuur 45: Fasescheiding WIBO en WSBO (Moens, 2009)

Volgens Hew et al. (2010) is het mogelijk de verhouding tussen WIBO en WSBO te veranderen. De procesparameter van fast pyrolyse met het meeste invloed op de verhouding is de temperatuur. Van alle procesparameters die invloed hebben op deze verhouding, is de invloed van temperatuur 71,54%. Dit wil zeggen dat door enkel de temperatuur (waarop fast pyrolyse wordt uitgevoerd) te veranderen, kan de verhouding tussen WIBO en WSBO sterk wijzigen. Het belangrijkste effect is dat bij een toenemende temperatuur de verhouding tussen WIBO en WSBO wijzigt in het nadeel van WIBO. Met andere woorden zorgt een toename van de temperatuur tijdens fast pyrolyse ervoor dat de opbrengst aan WIBO daalt.

Het WSBO gedeelte van pyrolyseolie bevat C2 tot C6 geoxideerde waterkoolstoffen met verschillende functionele groepen. Hieruit kunnen de verschillende chemicaliën gehaald worden. Het WIBO gedeelte van pyrolyseolie wordt ook wel het pyrolytisch lignine genoemd, omdat het afkomstig is van het lignine deel van biomassa. Dit deel kan eveneens als grondstof voor chemicaliën dienen, maar ook voor de productie van transportbrandstoffen. (Vitasari, Meindersma, & de Haan, 2011)

BIJLAGE 3: TECHNOLOGIËN ENERGIEBRONNEN

Boiler

Boilers zijn over het algemeen minder efficiënt dan motoren en turbines voor de opwekking van elektriciteit en warmte, maar zijn daarentegen wel robuuster in de behandeling van verschillende types oliën. In Neste Oy (aangehaald door Bridgwater (2004)) werden in een boiler met een vermogen van 2,5 MW en met behulp van een duale brandstofverbrander testen uitgevoerd. De testen leverden positieve resultaten op in die zin dat er weinig problemen waren tijdens de verbranding. De verbranding van pyrolyseolie zonder hulpbrandstoffen werd aangetoond, al waren er kleine aanpassingen aan de boiler noodzakelijk. De belangrijkste conclusies van deze studie en van de studie door Oilon Oy en VTT Energy (aangehaald door Bridgwater (2004)) geven aan dat:

- De stabiliteit van de verbranding verbeterd moet worden;
- Een hulpbrandstof noodzakelijk is tijdens de opstart van de verbranding;
- Verschillende types pyrolyseolie leveren verschillende resultaten op in verband met de verbranding en de uitstoot. Vooral een hoog watergehalte, veel vaste delen en een hoge viscositeit hebben hier een negatieve invloed op; en
- De emissies (o.a. NO_x en SO_x) zijn over het algemeen lager in vergelijking met de emissies van fossiele brandstoffen, behalve voor kleine partikels. Belangrijke eigenschappen van pyrolyseolie hierbij zijn de voorbehandeling en de intrinsieke kenmerken (vb. watergehalte en zuurstofgehalte).

Een mogelijke optie met boilers is de co-verbranding met fossiele brandstoffen. Red Arrow (aangehaald door Bridgwater (2004)) voerde testen uit in een 20 MW_e boiler. Uit de testen bleek dat geen modificaties nodig waren aan de boiler en dat de prestaties en de emissies gelijk bleven in vergelijking met de pure fossiele verbranding. (Bridgwater A. V., 2004)

Hieruit blijkt dat de eigenschappen van pyrolyseolie belangrijk zijn. Vooral zouden deze constant moeten zijn in de tijd, wat de instelling van proces gerelateerde parameters eenvoudiger moet maken. Ook zijn aanpassingen aan de boiler onvermijdelijk om op lange termijn een constante productie van elektriciteit en warmte te bewerkstelligen. (Bridgwater A. V., 2004)

Motor

Hoewel boilers als WKK gebruikt kunnen worden, zijn ze vooral ontwikkeld voor de productie van warmte. Motoren, bijvoorbeeld dieselmotoren, daarentegen zijn ontworpen voor de productie van elektriciteit. Toch bestaat ook de mogelijkheid om uit de uitlaatgassen van de motor warmte te halen zodat een WKK-installatie ontstaat. Lage en mediumsnelheid motoren zijn gekend om hun capaciteit om de wisselende kwaliteit van oliën te verwerken. (Bridgwater A. V., 2004)

De belangrijkste problemen die overwonnen dienen te worden zijn hoofdzakelijk gerelateerd aan de specifieke eigenschappen van pyrolyseolie. Zo zorgen de lage energie-inhoud en het hoge watergehalte dat de ontsteking bemoeilijkt wordt. Andere specifieke eigenschappen hebben als gevolg een hoge kans op corrosie en de vorming van cokes. Belangrijke modificaties zijn noodzakelijk aan het injectiesysteem en betere katalysatoren die uitlaatgassen omvormen. De katalysatoren dienen vooral om de CO uitstoot te doen dalen. (Bridgwater A. V., 2004)

Suppes (aangehaald door Bridgwater (2004)) voerde aan de universiteit van Kansas een reeks testen uit om meer te weten te komen over de verbranding van pyrolyseolie in een motor (Lister Petter Diesel motor). De testen leverden sterk gelijkende resultaten op in vergelijking met fossiele verbranding als pyrolyseolie verbrand werd in een mengeling van pyrolyseolie (72%), methanol (24%) en een cetaangetal verbeteraar (4%). Hun conclusie was dat pure pyrolyseolie best verbrand kan worden in lage snelheid motoren. Hoge snelheid motoren zijn ook mogelijk, maar dan is er nood aan een mengeling met een hulpbrandstof en een toevoeging van cetaangetal verbeterende additieven.

Shihadeh (aangehaald door Bridgwater (2004)) voerde ook een aantal testen uit van de verbranding van pyrolyseolie in een motor. Hun belangrijkste resultaat was dat de thermische efficiëntie dezelfde was als bij de verbranding van diesel en dat het proces stabiel verloopt. De verbranding van pyrolyseolie kan verbeterd worden door een filtratie (hoge temperatuur) van de olie. Dit verlaagt het watergehalte en het moleculair gewicht met als gevolg een kortere vertraging van de ontsteking, snellere verbranding en minder vorming van cokes.

Ormod Diesels (aangehaald door Bridgwater (2004)) voerden testen uit in verband met de stabiliteit van de verbranding van pyrolyseolie. Hun conclusie was dat er een zwarte afzetting was op pompen en injectoren, maar dat deze de prestaties van de motor op lange termijn niet beïnvloeden.

Turbine

Turbines worden wereldwijd gebruikt voor een brede waaier aan toepassingen. Hoewel de meerderheid van deze turbines draait op petroleum afgeleide brandstoffen of gasbrandstoffen, kunnen ze ook draaien op andere brandstoffen (o.a. pyrolyseolie) mits een goed ontwerp ervan. Vooral gasturbines zijn geschikt voor aanpassingen om pyrolyseolie te kunnen verwerken. Deze modificaties hebben betrekking op de automatisatie van de verbranding, de efficiëntie, vorming van roetdeeltjes en de emissies. Daarnaast moet bij het herontwerp aandacht besteed worden aan de materialen die gebruikt zullen worden. Deze moeten bestendig zijn tegen erosie en corrosie tijdens de verbranding van pyrolyseolie. (Bridgwater A. V., 2004)

Uit testen uitgevoerd door Kasper et al. (aangehaald door Bridgwater (2004)) bleek dat een goed ontworpen gasturbine een verbranding kan realiseren met een efficiëntie hoger dan 99% (verbrandingsefficiëntie). De emissies voor CO waren hoger en de emissies van CH en NO_x waren dezelfde in vergelijking met de verbranding van een gasbrandstof. Het geleidelijk opbouwen van slak blijkt een terugkerend probleem.

De emissies en stabiliteit van het proces zijn ook getest door Orenda Aerospace corporation (aangehaald door Bridgwater (2004)). Ze tonen aan dat bepaalde types motoren aangepast kunnen worden om pyrolyseolie te kunnen verwerken. Daarnaast onderzoeken ze de emissies en concluderen dat de uitstoot aan partikels hoger is, maar de uitstoot aan NO_x en SO₂ lager is dan bij de verbranding van gasbrandstoffen.

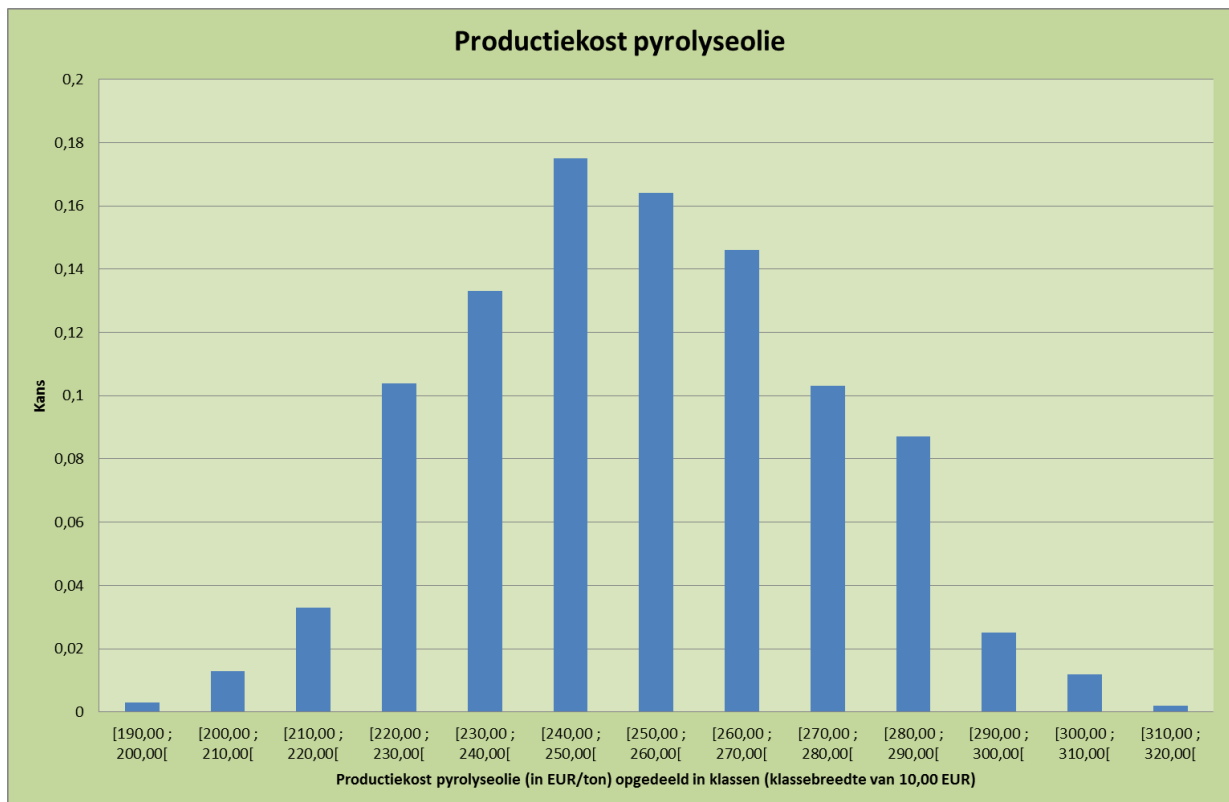
BIJLAGE 4: KOSTPRIJS PRODUCTIE PYROLYSEOLIE

In deze bijlage wordt dieper ingegaan op de kostprijs van de productie van pyrolyseolie. Aan de hand van de formule van Bridgwater (2012) kan de productiekostprijs bepaald worden, rekening houdend met de specifieke kenmerken van de Noorderkempen.

$$\text{Productiekost pyrolyseolie} \left(\text{in } \frac{\text{EUR}}{\text{ton}} \right) = 1,1 * [(B + (H * 16.935 * F^{-0,33})) Y^{-1}]$$

De formule heeft vier inputparameters, waarvan er drie een verdeling opgelegd krijgen en één parameter een vaste waarde heeft. De kapitaal en kapitaal gerelateerde lasten (H) behoudt de standaardwaarde 0,18. De kost van biomassa (B) en de fractionele olieopbrengst (Y) krijgen een uniforme verdeling opgelegd en de jaarlijkse toevoerstream aan biomassa (F) krijgt een triangulaire verdeling opgelegd zoals reeds in deel 1.5.1 van deze masterproef uitgelegd is.

Op basis van een Monte Carlo simulatie (N = 1.000) worden volgende resultaten bekomen.



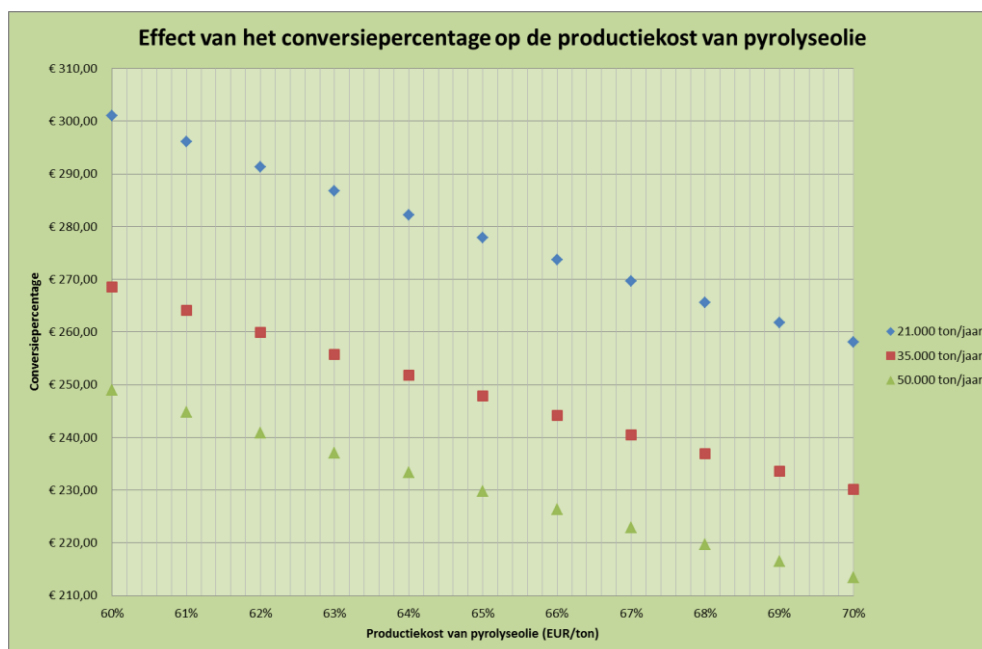
Figuur 46: Productiekost pyrolyseolie op basis van Monte Carlo simulatie (N=1.000)

Tabel 36: Productiekost pyrolyseolie op basis van Monte Carlo simulatie (N=1.000)

Summary statistics			
Steekproefgrootte (N)	1.000		
Locatie (midden)			
Gemiddelde	253,29 EUR/ton	Mediaan	253,00 EUR/ton
Standaardfout van het gemiddelde	0,68 EUR/ton		
Spreiding			
Standaardfout	21,51 EUR/ton	Q (,75)	269,07 EUR/ton
Maximum	315,63 EUR/ton	Q (,25)	237,46 EUR/ton
Minimum	197,40 EUR/ton	IQ range	31,26 EUR/ton
Range	118,24 EUR/ton		
Vorm			
Scheefheid	0,1115		
Kurtosis	-0,4501		

De gemiddelde productiekost ligt kortbij de in deze masterproef veronderstelde 259,32 EUR/ton.

In deze simulatie schommelt dit conversiepercentage tussen slechts 60% en 70%. Onderstaande figuur laat de kostprijs van pyrolyseolie zien afhankelijk van het conversiepercentage. De jaarlijkse input aan biomassa wordt constant gehouden op 21.000 ton per jaar (en 35.000 ton per jaar en 50.000 ton per jaar) net als de kostprijs van biomassa en de kapitaal en kapitaal gerelateerde lasten. Op deze figuur ziet u op de x-as het conversiepercentage en op de y-as de kostprijs van de productie van pyrolyseolie.



Figuur 47: Effect van het conversiepercentage op de productiekost van pyrolyseolie

BIJLAGE 5: NCW INVESTERING WKK-INSTALLATIE (BIJ 50% WARMTEVERKOOP)

Deze bijlage geeft de berekening van de netto contante waarde van de investering in een WKK-installatie in de Noorderkempen in detail weer. De berekening verschilt van de berekening in hoofdstuk II, omdat de verkoop van warmte hier slechts 50% bedraagt. Hierdoor daalt het aantal verkregen warmtekrachtcertificaten. De berekeningswijze is in hoofdstuk II reeds in detail besproken. De netto initiële investering bedraagt 3.696.563,69 EUR en wordt uitgevoerd in jaar 0. De inkomsten ontstaan uit de verkoop van elektriciteit, groenestroomcertificaten (GSC), warmte en WKK-certificaten. Naast de verkoop van WKK-certificaten staat de fractie vermeld van het aantal certificaten dat het label 'aanvaardbaar' krijgt. Deze inkomsten zijn gebaseerd op een verkoop van warmte van 50%. De uitgaven bestaan uit de aankoop van pyrolyseolie, de interestaflossing en de onderhoud- en uitbatingskosten.

Tabel 37: Inkomsten NCW berekening van investering in WKK-installatie (warmte opbrengst 50%) (alle bedragen in EUR)

Jaar	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
Inkomsten	4.800.312,16	4.800.312,16	4.800.312,16	4.800.312,16	4.778.743,05
Verkoop elektriciteit	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67
Verkoop groenestroomcertificaten	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00
Verkoop warmte	238.875,00	238.875,00	238.875,00	238.875,00	238.875,00
Verkoop WKK-certificaten	474.020,49	474.020,49	474.020,49	474.020,49	452.451,38
<i>Waarde WKK-certificaten</i>	<i>474.020,49</i>	<i>474.020,49</i>	<i>474.020,49</i>	<i>474.020,49</i>	<i>474.020,49</i>
<i>Jaarlijks gemiddeld aandeel 'aanvaardbaar'</i>	<i>1,00</i>	<i>1,00</i>	<i>1,00</i>	<i>1,00</i>	<i>0,95</i>
Uitgaven	4.416.504,18	4.411.082,11	4.405.405,29	4.399.461,77	4.393.239,01
Variabele kosten	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00
<i>Aankoopkost pyrolyseolie</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>
Vaste kosten	876.786,18	871.364,11	865.687,29	859.743,77	853.521,01
<i>Onderhoud- en uitbatingskosten</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>
<i>Interestaflossing</i>	<i>167.628,94</i>	<i>162.206,87</i>	<i>156.530,06</i>	<i>150.586,54</i>	<i>144.363,77</i>
Cashflow (inkomsten - uitgaven)	383.807,98	389.230,05	394.906,87	400.850,39	385.504,04
Belastingen ($\tau = 0,33$)	126.656,63	128.445,92	130.319,27	132.280,63	127.216,33
Belastingsschild	64.281,29	64.281,29	64.281,29	64.281,29	64.281,29
Cashflow verdisconteerd (CF_n)	292.211,49	268.649,11	247.084,06	227.341,75	200.289,97

Jaar	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00
Inkomsten	4.738.923,16	4.699.103,27	4.659.283,38	4.619.463,49	4.579.643,60
Verkoop elektriciteit	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67
Verkoop groenestroomcertificaten	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00
Verkoop warmte	238.875,00	238.875,00	238.875,00	238.875,00	238.875,00
Verkoop WKK-certificaten	412.631,49	372.811,60	332.991,71	293.171,82	253.351,93
<i>Waarde WKK-certificaten</i>	<i>474.020,49</i>	<i>474.020,49</i>	<i>474.020,49</i>	<i>474.020,49</i>	<i>474.020,49</i>
<i>Jaarlijks gemiddeld aandeel 'aanvaardbaar'</i>	<i>0,87</i>	<i>0,79</i>	<i>0,70</i>	<i>0,62</i>	<i>0,53</i>
Uitgaven	4.386.723,88	4.379.902,66	4.372.760,97	4.365.283,74	4.357.455,21
Variabele kosten	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00
<i>Aankoopkost pyrolyseolie</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>
Vaste kosten	847.005,88	840.184,66	833.042,97	825.565,74	817.737,21
<i>Onderhoud- en uitbatingskosten</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>
<i>Interestaflossing</i>	<i>137.848,65</i>	<i>131.027,43</i>	<i>123.885,73</i>	<i>116.408,50</i>	<i>108.579,98</i>
Cashflow (inkomsten - uitgaven)	352.199,28	319.200,61	286.522,41	254.179,75	222.188,39
Belastingen ($\tau = 0,33$)	116.225,76	105.336,20	94.552,40	83.879,32	73.322,17
Belastingsschild	64.281,29	64.281,29	64.281,29	64.281,29	64.281,29
Cashflow verdisconteerd (CF_n)	169.486,01	142.732,72	119.543,12	99.485,55	82.177,59
Jaar	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00
Inkomsten	4.539.823,71	4.500.003,82	4.460.183,93	4.420.364,04	4.380.544,15
Verkoop elektriciteit	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67
Verkoop groenestroomcertificaten	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00
Verkoop warmte	238.875,00	238.875,00	238.875,00	238.875,00	238.875,00
Verkoop WKK-certificaten	213.532,04	173.712,15	133.892,26	94.072,37	54.252,48
<i>Waarde WKK-certificaten</i>	<i>474.020,49</i>	<i>474.020,49</i>	<i>474.020,49</i>	<i>474.020,49</i>	<i>474.020,49</i>
<i>Jaarlijks gemiddeld aandeel 'aanvaardbaar'</i>	<i>0,45</i>	<i>0,37</i>	<i>0,28</i>	<i>0,20</i>	<i>0,11</i>
Uitgaven	4.349.258,88	4.340.677,47	4.331.692,88	4.322.286,18	4.312.437,52
Variabele kosten	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00
<i>Aankoopkost pyrolyseolie</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>
Vaste kosten	809.540,88	800.959,47	791.974,88	782.568,18	772.719,52
<i>Onderhoud- en uitbatingskosten</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>
<i>Interestaflossing</i>	<i>100.383,65</i>	<i>91.802,23</i>	<i>82.817,65</i>	<i>73.410,94</i>	<i>63.562,29</i>
Cashflow (inkomsten - uitgaven)	190.564,83	159.326,35	128.491,05	98.077,86	68.106,62
Belastingen ($\tau = 0,33$)	62.886,39	52.577,70	42.402,05	32.365,69	22.475,19
Belastingsschild	64.281,29	64.281,29	64.281,29	64.281,29	64.281,29
Cashflow verdisconteerd (CF_n)	67.280,71	54.495,41	43.556,92	34.231,34	26.312,23

Jaar	16,00	17,00	18,00	19,00	20,00
Inkomsten	4.341.042,44	4.326.291,67	4.326.291,67	4.326.291,67	4.326.291,67
Verkoop elektriciteit	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67	1.459.791,67
Verkoop groenestroomcertificaten	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00	2.627.625,00
Verkoop warmte	238.875,00	238.875,00	238.875,00	238.875,00	238.875,00
Verkoop WKK-certificaten	14.750,77	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Waarde WKK-certificaten</i>	<i>474.020,49</i>	<i>474.020,49</i>	<i>474.020,49</i>	<i>474.020,49</i>	<i>474.020,49</i>
<i>Jaarlijks gemiddeld aandeel 'aanvaardbaar'</i>	<i>0,03</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
Uitgaven	4.302.126,16	4.291.330,34	4.280.027,31	4.268.193,24	4.255.803,17
Variabele kosten	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00	3.539.718,00
<i>Aankoopkost pyrolyseolie</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>	<i>3.539.718,00</i>
Vaste kosten	762.408,16	751.612,34	740.309,31	728.475,24	716.085,17
<i>Onderhoud- en uitbatingskosten</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>	<i>709.157,23</i>
<i>Interestaflossing</i>	<i>53.250,92</i>	<i>42.455,11</i>	<i>31.152,07</i>	<i>19.318,00</i>	<i>6.927,94</i>
Cashflow (inkomsten - uitgaven)	38.916,28	34.961,33	46.264,36	58.098,43	70.488,50
Belastingen ($\tau = 0,33$)	12.842,37	11.537,24	15.267,24	19.172,48	23.261,20
Belastingsschild	64.281,29	64.281,29	64.281,29	64.281,29	64.281,29
Cashflow verdisconteerd (CF_n)	19.663,92	17.352,04	17.136,66	16.875,21	16.575,04

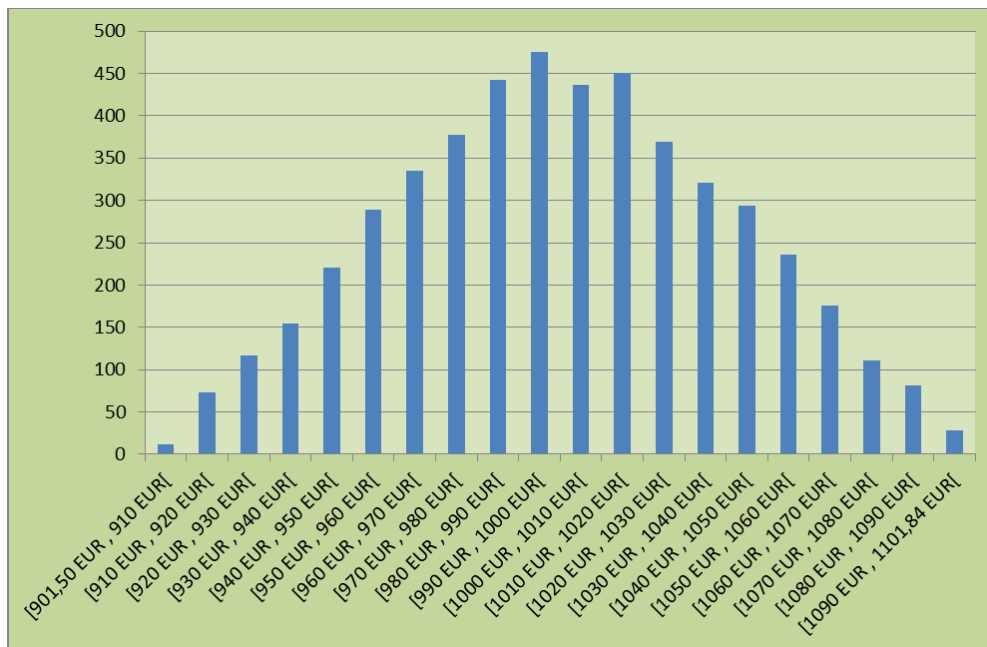
De som van de verdisconteerde cashflows van jaar 1 tot en met jaar 20 bedraagt 2.162.480,86 EUR. Om de netto contante waarde van de investering te kennen, dient dit bedrag verminderd te worden met de netto initiële investering.

Het resultaat van de investering is een netto contante waarde van -1.534.082,83 EUR. Het resultaat is negatief. Dit geeft aan dat de waarde van pyrolyseolie van 259,32 EUR te hoog is, rekening houdende met een NCW die positief zou moeten zijn.

BIJLAGE 6: GEHANTEERDE VERDELINGEN SENSITIVITEITSANALYSES

De sensitiviteitsanalysen in deze masterproef maken gebruik van twee soorten verdelingen. Een uniforme en een triangulaire verdeling. Deze verdelingen zijn ideaal voor het gebruik in sensitiviteitsanalysen. Ze hebben beide een minimale en een maximale waarde. De triangulaire verdeling heeft ook nog een 'gemiddelde' waarde waar de kans maximaal is.

Als voorbeeld van een triangulaire verdeling wordt de marktwaarde van formic acid weergegeven. De marktwaarde van formic acid wordt verondersteld triangulair verdeeld te zijn in de sensitiviteitsanalyse (hoofdstuk III). De minimale waarde bedraagt 901,50 EUR/ton en de maximale waarde bedraagt 1.101,84 EUR/ton. De meest waarschijnlijke waarde bedraagt 1.001,67 EUR/ton.



Figuur 48: Triangulaire kansverdeling marktwaarden 'formic acid'

Op bovenstaande figuur (N=5.000) is te zien dat de kans dat een marktwaarde gekozen wordt tussen 901,50 EUR/ton en 1.101,84 EUR/ton 100% is. De kans is groter dat een waarde kort rond het gemiddelde (1.001,67 EUR/ton) gekozen wordt, dan een waarde korter bij het minimum of het maximum.

Als voorbeeld van een uniforme verdeling wordt de verdeling van de verkleiningsfactor van propionic acid (hoofdstuk III) weergegeven. De minimale waarde van deze verkleiningsfactor wordt bepaald op 39,25 terwijl de maximale waarde geschat wordt op 65,41. De kansverdeling is evenredig verdeeld tussen deze twee waarden.



Figuur 49: Uniforme kansverdeling verkleiningsfactor 'propionic acid'

Op bovenstaande figuur (N=5.000) is de uniforme verdeling te zien die de kans weergeeft dat een bepaalde waarde voor de verkleiningsfactor gekozen wordt. De kans dat een waarde tussen 39,25 en 65,41 uit de verdeling genomen wordt, is 100%. De kans dat een waarde wordt genomen tussen deze twee waarden is evenredig verdeeld.

BIJLAGE 7: SIMULATIEVOORBEELDEN WKK-INSTALLATIE

Deze bijlage bevat een gedetailleerde lijst van alle parameters en grenswaarden samen met twee simulaties. In de eerste kolom van onderstaande tabel staan alle parameters opgesomd. Van sommige parameters verschilt de waarde van jaar tot jaar, waardoor alle jaren zijn opgenomen. Indien de parameter van jaar 1 tot en met jaar 20 een gelijke waarde heeft, is slechts een waarde weergegeven. De verkoop WKK (J ...) geeft de verkoop van WKK-certificaten weer rekening houdende met het gedeelte dat het label 'aanvaardbaar' draagt. VCF staat voor verdisconteerde cashflows. De laatste twee rijen geven de waarde van de twee uniforme verdelingen: het conversiepercentage van het fast pyrolyseproces en de discontovoet.

Kolom twee en drie zijn twee simulatie voorbeelden. Kolom twee geeft een simulatie weer met een negatieve NCW (- 356.168,70 EUR) en kolom drie geeft een simulatie weer met een positieve NCW (5.992.452,76 EUR).

De laatste drie kolommen geven controles weer. Ze bevatten het gemiddelde, het minimum en het maximum van de 1000 simulaties die uitgevoerd zijn.

Tabel 38: Lijst met parameters, initiële waarden en grenswaarden toepassing als energiebron

Netto contante waarde	-356.168,70	5.992.452,76	Controle		
Parameters			Minimum	Maximum	Gemiddelde
Investing	4.043.900,68	5.085.729,07	3.487.026,83	6.213.906,85	4.620.809,95
Investeringsaftrek	206.845,52	260.135,04	178.361,42	317.841,34	236.354,43
Netto investering	3.837.055,16	4.825.594,03	3.308.665,40	5.896.065,52	4.384.455,53
Inkomsten (J 1)	6.207.218,95	10.557.028,83	4.588.532,21	16.302.580,33	8.572.819,14
Inkomsten (J 2)	6.207.218,95	10.557.028,83	4.588.532,21	16.302.580,33	8.572.819,14
Inkomsten (J 3)	6.207.218,95	10.557.028,83	4.588.532,21	16.302.580,33	8.572.819,14
Inkomsten (J 4)	6.207.218,95	10.557.028,83	4.588.532,21	16.302.580,33	8.572.819,14
Inkomsten (J 5)	6.172.918,16	10.538.204,10	4.565.600,02	16.172.096,01	8.519.018,95
Inkomsten (J 6)	5.982.168,50	10.470.422,44	4.523.263,66	15.931.201,88	8.419.695,52
Inkomsten (J 7)	5.931.140,78	10.381.352,55	4.480.927,30	15.690.307,75	8.320.372,09
Inkomsten (J 8)	5.880.113,07	10.292.282,65	4.438.590,94	15.449.413,62	8.221.048,66
Inkomsten (J 9)	5.829.085,35	10.203.212,76	4.396.254,57	15.208.519,49	8.121.725,23
Inkomsten (J 10)	5.778.057,63	10.114.142,87	4.353.918,21	14.967.625,36	8.022.401,80
Inkomsten (J 11)	5.727.029,92	10.025.072,97	4.311.581,85	14.726.731,23	7.923.078,37
Inkomsten (J 12)	5.676.002,20	9.936.003,08	4.269.245,49	14.485.837,10	7.823.754,94
Inkomsten (J 13)	5.624.974,49	9.846.933,19	4.226.909,13	14.244.942,97	7.724.431,52
Inkomsten (J 14)	5.573.946,77	9.757.863,29	4.184.572,77	14.004.048,84	7.625.108,09
Inkomsten (J 15)	5.522.919,06	9.668.793,40	4.142.236,41	13.763.154,71	7.525.784,66

Inkomsten (J 16)	5.472.299,08	9.580.435,22	4.100.238,34	13.524.185,46	7.427.254,88
Inkomsten (J 17)	5.453.396,51	9.547.440,41	4.084.555,38	13.434.949,29	7.390.461,78
Inkomsten (J 18)	5.453.396,51	9.547.440,41	4.084.555,38	13.434.949,29	7.390.461,78
Inkomsten (J 19)	5.453.396,51	9.547.440,41	4.084.555,38	13.434.949,29	7.390.461,78
Inkomsten (J 20)	5.453.396,51	9.547.440,41	4.084.555,38	13.434.949,29	7.390.461,78
Verkoop elektriciteit	1.620.400,89	2.986.090,75	1.122.855,77	4.560.661,07	2.289.871,12
Verkoop warmte	530.719,09	948.586,50	232.339,99	1.401.101,49	582.149,40
Verkoop GSC	3.302.276,53	5.612.763,16	2.523.825,92	8.004.206,96	4.518.441,26
Verkoop WKK (J 1)	753.822,44	1.009.588,41	500.216,52	2.867.631,03	1.182.357,36
Verkoop WKK (J 2)	753.822,44	1.009.588,41	500.216,52	2.867.631,03	1.182.357,36
Verkoop WKK (J 3)	753.822,44	1.009.588,41	500.216,52	2.867.631,03	1.182.357,36
Verkoop WKK (J 4)	753.822,44	1.009.588,41	500.216,52	2.867.631,03	1.182.357,36
Verkoop WKK (J 5)	719.521,65	990.763,69	477.455,43	2.737.146,71	1.128.557,17
Verkoop WKK (J 6)	528.771,98	922.982,03	435.434,95	2.496.252,58	1.029.233,74
Verkoop WKK (J 7)	477.744,27	833.912,13	393.414,47	2.255.358,46	929.910,31
Verkoop WKK (J 8)	426.716,55	744.842,24	351.394,00	2.014.464,33	830.586,88
Verkoop WKK (J 9)	375.688,84	655.772,35	309.373,52	1.773.570,20	731.263,45
Verkoop WKK (J 10)	324.661,12	566.702,45	267.353,04	1.532.676,07	631.940,03
Verkoop WKK (J 11)	273.633,41	477.632,56	225.332,57	1.291.781,94	532.616,60
Verkoop WKK (J 12)	222.605,69	388.562,67	183.312,09	1.050.887,81	433.293,17
Verkoop WKK (J 13)	171.577,98	299.492,77	141.291,61	809.993,68	333.969,74
Verkoop WKK (J 14)	120.550,26	210.422,88	99.271,14	569.099,55	234.646,31
Verkoop WKK (J 15)	69.522,54	121.352,99	57.250,66	328.205,42	135.322,88
Verkoop WKK (J 16)	18.902,57	32.994,81	15.565,95	89.236,17	36.793,10
Verkoop WKK (J 17)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Verkoop WKK (J 18)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Verkoop WKK (J 19)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Verkoop WKK (J 20)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Uitgaven (J 1)	5.462.509,64	8.177.692,48	4.109.668,52	11.666.978,79	6.854.272,52
Uitgaven (J 2)	5.418.221,64	8.180.622,48	4.099.430,52	11.663.833,79	6.849.096,98
Uitgaven (J 3)	5.410.300,64	8.132.862,48	4.094.751,52	11.649.959,79	6.843.618,38
Uitgaven (J 4)	5.413.275,64	8.164.487,48	4.087.081,67	11.635.886,79	6.837.337,06
Uitgaven (J 5)	5.421.112,64	8.166.324,48	4.076.365,67	11.630.661,79	6.830.010,09
Uitgaven (J 6)	5.410.255,64	8.135.617,48	4.094.859,67	11.619.952,79	6.823.979,19
Uitgaven (J 7)	5.394.571,64	8.126.809,48	4.089.913,67	11.582.710,79	6.817.872,03
Uitgaven (J 8)	5.400.810,64	8.103.343,48	4.069.287,67	11.603.878,79	6.809.613,50
Uitgaven (J 9)	5.389.143,64	8.097.495,48	4.058.062,52	11.572.482,79	6.802.756,87
Uitgaven (J 10)	5.361.668,64	8.120.547,48	4.055.051,67	11.584.482,79	6.793.336,12
Uitgaven (J 11)	5.362.938,64	8.082.580,48	4.046.657,52	11.575.702,79	6.785.713,84
Uitgaven (J 12)	5.362.852,64	8.079.286,48	4.038.807,67	11.572.511,79	6.776.925,66

Uitgaven (J 13)	5.360.899,64	8.070.434,48	4.043.298,67	11.550.677,79	6.767.608,00
Uitgaven (J 14)	5.340.905,64	8.072.496,48	4.012.077,67	11.547.939,79	6.757.777,46
Uitgaven (J 15)	5.330.748,64	8.049.316,48	4.004.398,67	11.527.307,79	6.747.606,75
Uitgaven (J 16)	5.322.322,64	8.051.149,48	4.003.685,52	11.529.399,79	6.736.781,23
Uitgaven (J 17)	5.312.726,64	8.040.326,48	3.985.459,67	11.519.158,79	6.726.134,28
Uitgaven (J 18)	5.295.834,64	8.029.034,48	3.979.654,67	11.504.596,79	6.714.254,78
Uitgaven (J 19)	5.285.200,64	8.015.741,48	3.964.854,67	11.492.562,79	6.702.036,86
Uitgaven (J 20)	5.273.558,64	8.001.746,48	3.952.587,67	11.476.975,79	6.689.301,79
Variabele kosten	4.500.395,24	6.806.076,49	3.274.292,79	9.786.500,37	5.662.545,21
Vaste kosten (J 1)	962.114,40	1.371.615,99	772.694,75	1.915.477,50	1.191.727,31
Vaste kosten (J 2)	917.826,40	1.374.545,99	795.042,73	1.900.316,10	1.186.551,77
Vaste kosten (J 3)	909.905,40	1.326.785,99	757.604,04	1.879.908,98	1.181.073,17
Vaste kosten (J 4)	912.880,40	1.358.410,99	754.768,75	1.889.421,98	1.174.791,86
Vaste kosten (J 5)	920.717,40	1.360.247,99	763.735,96	1.902.344,78	1.167.464,89
Vaste kosten (J 6)	909.860,40	1.329.540,99	740.137,04	1.885.411,10	1.161.433,98
Vaste kosten (J 7)	894.176,40	1.320.732,99	744.385,73	1.885.447,78	1.155.326,82
Vaste kosten (J 8)	900.415,40	1.297.266,99	738.468,75	1.866.166,10	1.147.068,30
Vaste kosten (J 9)	888.748,40	1.291.418,99	747.407,91	1.857.080,78	1.140.211,67
Vaste kosten (J 10)	861.273,40	1.314.470,99	714.979,04	1.847.277,98	1.130.790,92
Vaste kosten (J 11)	862.543,40	1.276.503,99	710.640,04	1.848.042,78	1.123.168,64
Vaste kosten (J 12)	862.457,40	1.273.209,99	700.070,04	1.822.299,98	1.114.380,46
Vaste kosten (J 13)	860.504,40	1.264.357,99	700.783,75	1.814.556,50	1.105.062,80
Vaste kosten (J 14)	840.510,40	1.266.419,99	685.899,04	1.802.182,78	1.095.232,26
Vaste kosten (J 15)	830.353,40	1.243.239,99	674.154,04	1.795.635,78	1.085.061,54
Vaste kosten (J 16)	821.927,40	1.245.072,99	670.106,04	1.787.669,78	1.074.236,02
Vaste kosten (J 17)	812.331,40	1.234.249,99	656.468,04	1.770.829,10	1.063.589,08
Vaste kosten (J 18)	795.439,40	1.222.957,99	644.466,04	1.762.416,78	1.051.709,58
Vaste kosten (J 19)	784.805,40	1.209.664,99	639.986,04	1.752.199,78	1.039.491,65
Vaste kosten (J 20)	773.163,40	1.195.669,99	624.506,04	1.737.444,78	1.026.756,58
Cashflow (J 1)	744.709,31	2.379.336,35	86.803,42	5.283.283,44	1.718.546,62
Cashflow (J 2)	788.997,31	2.376.406,35	103.291,42	5.294.164,44	1.723.722,16
Cashflow (J 3)	796.918,31	2.424.166,35	114.168,42	5.287.003,44	1.729.200,76
Cashflow (J 4)	793.943,31	2.392.541,35	106.382,42	5.296.679,44	1.735.482,07
Cashflow (J 5)	751.805,52	2.371.879,62	110.859,05	5.184.389,12	1.689.008,86
Cashflow (J 6)	571.912,85	2.334.804,96	72.548,50	4.937.610,99	1.595.716,33
Cashflow (J 7)	536.569,14	2.254.543,07	13.073,96	4.706.645,86	1.502.500,06
Cashflow (J 8)	479.302,42	2.188.939,17	-40.926,59	4.474.715,73	1.411.435,16
Cashflow (J 9)	439.941,71	2.105.717,28	-59.541,13	4.242.794,60	1.318.968,36
Cashflow (J 10)	416.388,99	1.993.595,39	-105.848,74	4.006.623,47	1.229.065,68
Cashflow (J 11)	364.091,27	1.942.492,49	-156.163,67	3.791.052,34	1.137.364,53

Cashflow (J 12)	313.149,56	1.856.716,60	-202.640,59	3.562.330,21	1.046.829,28
Cashflow (J 13)	264.074,84	1.776.498,71	-247.164,52	3.324.631,08	956.823,51
Cashflow (J 14)	233.041,13	1.685.366,81	-296.280,45	3.087.915,95	867.330,63
Cashflow (J 15)	192.170,41	1.619.476,92	-337.909,37	2.856.020,82	778.177,91
Cashflow (J 16)	149.976,44	1.529.285,74	-395.050,23	2.632.261,57	690.473,65
Cashflow (J 17)	140.669,87	1.507.113,93	-396.320,98	2.551.629,40	664.327,49
Cashflow (J 18)	157.561,87	1.518.405,93	-387.809,98	2.572.413,40	676.206,99
Cashflow (J 19)	168.195,87	1.531.698,93	-377.041,98	2.581.952,40	688.424,92
Cashflow (J 20)	179.837,87	1.545.693,93	-367.740,98	2.591.588,40	701.159,99
Belastingen (J 1)	245.754,07	785.180,99	28.645,13	1.743.483,53	567.120,38
Belastingen (J 2)	260.369,11	784.214,09	34.086,17	1.747.074,26	568.828,31
Belastingen (J 3)	262.983,04	799.974,89	37.675,58	1.744.711,13	570.636,25
Belastingen (J 4)	262.001,29	789.538,64	35.106,20	1.747.904,21	572.709,08
Belastingen (J 5)	248.095,82	782.720,27	36.583,49	1.710.848,41	557.372,92
Belastingen (J 6)	188.731,24	770.485,64	23.941,01	1.629.411,63	526.586,39
Belastingen (J 7)	177.067,82	743.999,21	4.314,41	1.553.193,13	495.825,02
Belastingen (J 8)	158.169,80	722.349,93	0,00	1.476.656,19	465.789,94
Belastingen (J 9)	145.180,76	694.886,70	0,00	1.400.122,22	435.293,46
Belastingen (J 10)	137.408,37	657.886,48	0,00	1.322.185,74	405.665,82
Belastingen (J 11)	120.150,12	641.022,52	0,00	1.251.047,27	375.440,15
Belastingen (J 12)	103.339,35	612.716,48	0,00	1.175.568,97	345.613,18
Belastingen (J 13)	87.144,70	586.244,57	0,00	1.097.128,26	315.940,33
Belastingen (J 14)	76.903,57	556.171,05	0,00	1.019.012,26	286.470,90
Belastingen (J 15)	63.416,24	534.427,38	0,00	942.486,87	257.260,60
Belastingen (J 16)	49.492,22	504.664,30	0,00	868.646,32	228.734,01
Belastingen (J 17)	46.421,06	497.347,60	0,00	842.037,70	220.272,50
Belastingen (J 18)	51.995,42	501.073,96	0,00	848.896,42	224.061,92
Belastingen (J 19)	55.504,64	505.460,65	0,00	852.044,29	227.964,20
Belastingen (J 20)	59.346,50	510.079,00	0,00	855.224,17	232.072,13
Belastingenschild	63.311,41	79.622,30	54.592,98	97.285,08	72.343,52
VCF (J 1)	506.546,53	1.481.219,16	105.407,17	3.188.342,26	1.111.225,11
VCF (J 2)	480.431,46	1.309.276,02	104.954,42	2.802.401,08	1.012.486,81
VCF (J 3)	436.701,62	1.180.828,40	100.888,38	2.489.352,02	923.246,29
VCF (J 4)	392.111,87	1.031.985,43	88.153,69	2.355.217,60	842.806,63
VCF (J 5)	336.499,43	905.747,82	74.744,14	2.159.268,65	747.884,31
VCF (J 6)	238.713,40	789.615,62	57.625,13	1.939.104,99	645.830,25
VCF (J 7)	203.651,31	675.917,05	34.150,23	1.740.253,06	556.469,69
VCF (J 8)	166.820,45	581.622,72	7.866,72	1.549.986,92	478.815,59

VCF (J 9)	139.979,35	496.149,16	-742,82	1.392.999,72	410.317,41
VCF (J 10)	120.549,94	416.940,08	-21.365,59	1.234.131,89	351.098,51
VCF (J 11)	97.486,11	360.047,51	-41.362,16	1.093.192,49	298.774,03
VCF (J 12)	78.069,31	305.367,49	-56.754,92	967.752,53	253.326,76
VCF (J 13)	61.865,63	259.263,69	-68.922,21	846.812,18	213.668,04
VCF (J 14)	50.911,02	218.405,08	-80.538,92	744.771,94	179.148,61
VCF (J 15)	40.142,54	186.220,26	-87.696,25	645.398,23	149.043,65
VCF (J 16)	30.841,44	156.246,34	-97.879,10	556.302,20	122.999,78
VCF (J 17)	26.727,35	136.410,97	-90.972,24	508.243,42	109.046,93
VCF (J 18)	25.808,28	121.556,04	-82.103,69	481.988,89	101.586,73
VCF (J 19)	24.231,63	108.445,11	-73.526,86	456.866,24	94.695,30
VCF (J 20)	22.797,78	96.782,85	-66.084,91	433.738,62	88.359,92
Conversiepercentage	68,00	68,00	60,00	70,00	64,85
Discontovoet	11,00	13,00	6,00	15,00	10,54
Verkoop warmte	1,00	1,00	0,50	1,00	0,76

BIJLAGE 8: CHEMISCHE COMPONENTEN VAN PYROLYSEOLIE

Onderstaande tabel geeft de chemische componenten van pyrolyseolie weer. Deze lijst is niet compleet aangezien tot op heden slechts 40-50% van de componenten van pyrolyseolie gekend is. (Venderbosch & Prins, 2010)

Tabel 39: Chemische componenten uit pyrolyseolie

CHEMISCHE COMPONENTEN PYROLYSEOLIE							
No.	Component	CAS-nummer	Concentratie (wt% ds)			Significant ⁴⁹	Bron ⁵⁰
			Min	Gem	Max		
1	Formic acid	64-18-6	0,48	4,74	9	S	3,1
2	Acetic acid	64-19-7	0,8	8,9	17	S	1,3
3	Propionic acid	79-09-4	0,2	1,1	2	S	1,3
4	Glycolic acid	79-14-1		0,6		S	1
5	Methyl acetate	79-20-9	0,11	0,29	0,47	NS	3
6	Anhydro-β-D-arabino-furanosa, 1-5	51246-94-7	0,27	1,735	3,2	S	1,3
7	1,6-Anhydro-β-D-glucofuranose (Levoglucofan)	498-07-7	0,38	15,44	30,5	S	3
8	Dianhydro-α-D-glucofuranose, 1,4:3,6	4451-30-3		0,17		NS	1
9	Isopropanol	67-63-0		2,6		S	1
10	1-Hydroxy-2-propanone	166-09-6	1,5	4,98	8,46	S	3
11	Methanol	67-56-1	1,2	3,51	5,82	S	3
12	1-Hydroxy-2-butanone	5077-67-8	0,3	2,205	4,11	S	3
13	1-Hydroxy-2-propane acetate	592-20-1	0,75	0,905	1,06	S	3
14	1-Hydroxy-2-butanone acetate	1575-57-1	0,45	0,71	0,97	S	3
15	Guaiacol	90-05-1	0,2	0,65	1,1	S	3
16	Crotonic acid	107-93-7	0,18	0,57	0,96	S	3
17	Butyrolactone	96-48-0	0,63	0,685	0,74	S	3
18	Propanone (aceton)	67-64-1	0,4	1,2	2	S	3
19	2,3-Butanedione	431-03-8	0,46	0,535	0,61	S	3
20	2,3-Pentanedione	600-14-6	0,34	0,49	0,64	NS	3
21	Valeric acid	109-52-4	0,3	0,51	0,72	S	3
22	Isovaleric acid	503-74-2	0,26	0,47	0,68	NS	3
23	Furfural	98-01-1	1,5	2,25	3	S	3
24	5-Methyl-furfural	620-02-0	0,36	0,505	0,65	S	3
25	Butyric acid	107-92-6	0,23	0,395	0,56	NS	3
26	Isobutyric acid	79-31-2	0,18	0,335	0,49	NS	3

⁴⁹ S: significant; NS: niet significant

⁵⁰ Bronnen:

1: (Venderbosch & Prins, 2010)

2: (Marsman, Wildschut, Evers, de Koning, & Heeres, 2008)

3: (Demirbas, 2009)

4: (Marsman, Wildschut, Mahfud, & Heeres, 2007)

27	Valerolactone	108-29-2	0,35	0,43	0,51	NS	3
28	2-Butanone	78-93-3	0,033	0,23	0,43	NS	4,3
29	Crotonolactone	497-23-4	0,12	0,28	0,44	NS	3
30	Acrylic acid	79-10-7	0,15	0,295	0,44	NS	3
31	2-Cyclopenten-1-one	930-30-3	0,3	1,215	2,13	S	3
32	2-Methyl-2-cyclopenten-1-one	120-73-6	0,14	0,27	0,4	NS	3
33	2-Methyl-cyclopentenone	1120-73-6	0,2	0,245	0,29	NS	3
34	Methyl-2-furancarboxaldehyde	620-02-0	0,38	0,555	0,73	S	3
35	Phenol	108-95-2	0,2	1,15	2,1	S	3
36	2,6-Dimethoxyphenol	91-10-1	0,024	1,15	2,28	S	4,3
37	Dimethyl phenol	105-67-9	0,08	0,49	0,9	NS	3
38	Methyl phenol	8001-28-3	0,32	0,595	0,87	S	3
39	4-Methyl-2,6-dimetoxyphenol	6638-05-7	0,5	1,4	2,3	S	3
40	Hydroxyacetaldehyde	141-46-8	2,5	10	17,5	S	3
41	Acetaldehyde	75-07-0	0,5	4,5	8,5	S	3
42	Furfuryl alcohol	98-00-0	0,006	2,75	5,5	S	4,3
43	Catechol (1,2-Benzenediol)	120-80-9	0,011	2,51	5	S	4,3
44	Methyl Glyoxal	78-98-8	0,6	2,3	4	S	3
45	Ethanol	64-17-5	0,5	2	3,5	S	3
46	Cellobiosan	35405-71-7	0,4	1,85	3,3	S	3
47	Fructose	57-48-7	0,7	1,8	2,9	S	3
48	Glyoxal	107-22-2	0,6	1,7	2,8	S	3
49	Formaldehyde	50-00-0	0,4	2,3	4,2	S	3
50	Methyl formate	107-31-3	0,2	1,05	1,9	S	3
51	Hydroquinone	123-31-9	0,3	1,1	1,9	S	3
52	Acetol	116-09-6	0,2	0,95	1,7	S	3
53	3-Ethylphenol	620-17-7	0,2	0,75	1,3	S	3
54	Syringaldehyde	134-96-3	0,107	0,80	1,5	S	4,3
55	Propanioc acid, ethyl ester	105-37-3		0,6		S	3
56	Propyl nitrite	543-67-9		0,5		NS	3
57	Butanediol	584-03-2		1,7		S	3
58	1-Ethoxy-1-methoxy-ethane	10471-14-4		1		S	3
59	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	80-71-7		0,6		S	3
60	2,2-Dimethyl-3-heptanone	19078-97-8		0,6		S	3
61	3-Furfuraldehyde	498-60-2		2,9		S	3
62	2(5H)-Furanone	497-23-4		3,2		S	3
63	4-Methyl-5H-furan-2-one	6124-79-4		0,6		S	3
64	4-Methoxyphenol	150-76-5		1,8		S	3
65	n-Methyl-D-glucamine	6284-40-8		1,7		S	3
66	2-Methoxy-4-methyl-phenol	93-51-6		1,4		S	3
67	5-Hydroxymethyl-2-Furnacarboxaldehyde	67-47-0		3,5		S	3

68	3-Methoxy-2-methyl-1-propene	22418-49-1	0,9		S	3
69	3-Hydroxy-4-methoxymandelic acid	3695-24-7	0,6		S	3
70	2-Methoxy-4-phenol	97-54-1	0,007	0,30	0,6	NS 4,3
71	2-Propenal	107-02-8	1,342		S	4
72	2-Pentanone	107-87-9	0,068		NS	4
73	Pentanal	110-62-3	0,019		NS	4
74	Cyclopentanone	120-92-3	0,436		NS	4
75	3-Methylcyclopentanone	6672-30-6	0,007		NS	4
76	Cyclohexanone	108-94-1	0,012		NS	4
77	Benzaldehyde	100-52-7	0,034		NS	4
78	3-Methyl-2-cyclopenten-1-one	2758-18-1	0,047		NS	4
79	Methyl phenyl ketone	98-86-2	0,052		NS	4
80	2-Methylfuran	534-22-5	0,080		NS	4
81	2-Ethylfuran	3208-16-0	0,035		NS	4
82	2,5-Dimethylfuran	625-86-5	0,056		NS	4
83	1-Hydroxy-3-methoxybenzene	150-19-6	0,020		NS	4
84	Methoxy-4-hydroxy-1-alkylbenzene	97-53-0	0,000		NS	4
85	Phenylmethanol	100-51-6	0,000		NS	4
86	3-Methoxy-1,2-benzenediol	934-00-9	0,024		NS	4
87	2,3,5-Trimethylphenol	697-82-5	0,007		NS	4
88	2,6-Diisopropylphenol	2078-54-8	0,046		NS	4
89	Benzene	71-43-2	0,040		NS	4
90	1,4-Dimethylbenzene	106-42-3	0,011		NS	4
91	Mesitylene	108-67-8	0,004		NS	4
92	Cyclopentane	287-92-3	0,060		NS	4
93	Hexane	73513-42-5	0,024		NS	4
94	2,2,4-Trimethylpentane	540-84-1	0,006		NS	4
95	Methylcyclohexane	108-87-2	0,016		NS	4
96	Cyclohexane	110-82-7	0,015		NS	4
97	Decane	124-18-5	1,127		S	4
98	Propanol	71-23-8	0,164		NS	4
99	1-Butanol	71-36-3	0,075		NS	4
100	2-Propanol	67-63-0	0,149		NS	4
101	Propane-1,2-diol	57-55-6	0,129		NS	4
102	Pentanol	71-41-0	0,015		NS	4
103	Hexanol	111-27-3	0,000		NS	4
104	Nonanol	143-08-8	0,006		NS	4

BIJLAGE 9: WAARDEBEPALING CHEMISCHE COMPONENTEN PYROLYSEOLIE

Onderstaande tabel geeft de verschillende componenten weer samen met de marktwaarde en de verkoopwaarde met zuiverheid. Van de componenten met volgende nummers werd geen data gevonden: 6, 10, 12, 44, 46, 58, 60, 63, 68 en 69. Deze zijn geschrapt.

Tabel 40: Waardebepaling per component van pyrolyseolie

WAARDEBEPALING COMPONENTEN										
No.	Component	CAS-nummer	Marktwaarde (EUR)			Verkoopwaarde (g)				Bron ⁵¹
			Waarde	Eenheid		Waarde	Eenheid en zuiverheid			
1	Formic acid	64-18-6	1,00	EUR per 1 kg		21,31	EUR per 1 kg	88,0%	7,6	
2	Acetic acid	64-19-7	600,00	EUR per 1 t		25,62	EUR per 1 kg	99,0%	5,6	
3	Propionic acid	79-09-4				19,94	EUR per 1 kg	99,5%	6	
4	Glycolic acid	79-14-1				197,50	EUR per 0,5 kg	97,0%	6	
7	1,6-Anhydro-β-D-glucofuranose (Levoglucofan)	498-07-7				73,00	EUR per 1 g	99,0%	6	
9	Isopropanol	67-63-0	1300,00	EUR per 1 t		72,61	EUR per 1 kg	99,5%	5,6	
11	Methanol	67-56-1	305,00	EUR per 1 t		43,22	EUR per 1 kg	99,8%	5,6	
13	1-Hydroxy-2-propane acetate	592-20-1				5655,81	EUR per 1 kg	98,0%	6	
14	1-Hydroxy-2-butanone acetate	1575-57-1				69,20	EUR per 250 mg		6	
15	Guaiacol	90-05-1				760,00	EUR per 25 kg	98,0%	6	
16	Crotonic acid	107-93-7				117,50	EUR per 3 kg	98,0%	6	
17	Butyrolactone	96-48-0				280,00	EUR per 25 kg	98,0%	6	
18	Propanone (aceton)	67-64-1	1100,00	EUR per 1 t		15,21	EUR per 1 kg	99,8%	5,6	
19	2,3-Butanedione	431-03-8				169,22	EUR per 1 kg	97,0%	6	
21	Valeric acid	109-52-4				405,00	EUR per 25 kg	99,0%	6	

⁵¹ Bronnen:

5: (Reed Business Information Limited, 2011)

6: (Sigma-Aldrich Co., 2011)

7: (Indian Chemicals, 2011)

23	Furfural	98-01-1		340,00	EUR per 25 kg	98,0%	6
24	5-Methyl-furfural	620-02-0		1875,00	EUR per 25 kg	98,0%	6
31	2-Cyclopenten-1-one	930-30-3		408,00	EUR per 100 g	98,0%	6
34	Methyl-2-furancarboxaldehyde	620-02-0		1875,00	EUR per 25 kg	98,0%	6
35	Phenol	108-95-2	1433,00	EUR per 1 t	188,00	EUR per 1,5 kg	99,0% 5,6
36	2,6-Dimethoxyphenol	91-10-1		3500,00	EUR per 10 kg	98,0%	6
38	Methyl phenol	8001-28-3	1452,97	EUR per 1 t	237,00	EUR per 100 g	7,6
39	4-Methyl-2,6-dimetoxyphenol	6638-05-7		1300,00	EUR per 1 kg	97,0%	6
40	Hydroxyacetaldehyde	141-46-8		105,50	EUR per 5 g		6
41	Acetaldehyde	75-07-0		429,00	EUR per 19,5 kg	99,0%	6
42	Furfuryl alcohol	98-00-0		640,00	EUR per 25 kg	98,0%	6
43	Catechol (1,2-Benzenediol)	120-80-9		199,80	EUR per 5 kg	99,0%	6
45	Ethanol	64-17-5	72,00	EUR per 1 hl	68,19	EUR per 1 kg	99,5% 5,6
47	Fructose	57-48-7		207,50	EUR per 5 kg	99,0%	6
48	Glyoxal	107-22-2		75,10	EUR per 3 kg	40,0%	6
49	Formaldehyde	50-00-0		14,68	EUR per 1 kg	37,0%	6
50	Methyl formate	107-31-3		170,00	EUR per 25 kg	95,0%	6
51	Hydroquinone	123-31-9		81,00	EUR per 2 kg	99,0%	6
52	Acetol	67-64-1		15,21	EUR per 1 kg	99,8%	6
53	3-Ethylphenol	620-17-7		177,02	EUR per 1 kg	80,0%	6
54	Syringaldehyde	134-96-3		2450,00	EUR per 5 kg	98,0%	6
55	Propanioc acid, ethyl ester	105-37-3		248,00	EUR per 20 kg	97,0%	6
57	Butanediol	584-03-2	2050,00	EUR per 1 t	43,14	EUR per 1 kg	98,0% 5,6
59	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	80-71-7		750,00	EUR per 25 kg	98,0%	6
61	3-Furfuraldehyde	498-60-2		4500,00	EUR per 1 kg	97,0%	6
62	2(5H)-Furanone	497-23-4		193,50	EUR per 5 g	98,0%	6
64	4-Methoxyphenol	150-76-5		1275,00	EUR per 22,68 kg	99,0%	6
65	n-Methyl-D-glucamine	6284-40-8		63,30	EUR per 0,5 kg	99,0%	6

66	2-Methoxy-4-methyl-phenol	93-51-6		1750,00	EUR per	10	kg	98,0%	6
67	5-Hydroxymethyl-2-Furnacarboxaldehyde	67-47-0		4000,00	EUR per	1	kg	99,0%	6
71	2-Propenal	107-02-8		96,07	EUR per	1	kg	95,0%	6
97	Decane	124-18-5		462,33	EUR per	1	kg	99,0%	6

BIJLAGE 10: WAARDE VAN CHEMISCHE COMPONENTEN UIT PYROLYSEOLIE

Onderstaande tabel geeft per component de verkoopprijs en de marktwaarde weer (werkelijke of berekende). De verkleiningsfactor is opgenomen bij de berekende marktwaarde. Sommige verkleiningsfactoren zijn in het vet product. Dit duidt op het gebruik van een aangepaste verkleiningsfactor. De redenen hiervoor zijn weergegeven in hoofdstuk III – 3.1.3.1.

Tabel 41: Marktwaarde componenten

MARKTWAARDE COMPONENTEN														
No.	Verkoopprijs				Werkelijke marktwaarde				Berekende marktwaarde					
	Waarde	Eenheid		Eenheid		Waarde	Eenheid		factor	Waarde	Eenheid		Verkleiningsfactor	
1	21,31	EUR	per	1	kg	88,0%	1001,67	EUR	per	ton	21,27			
2	25,62	EUR	per	1	kg	99,0%	600,00	EUR	per	ton	42,71			
3	19,94	EUR	per	1	kg	99,5%				381,05	EUR	per	ton	52,33
4	197,50	EUR	per	0,5	kg	97,0%				1685,18	EUR	per	ton	234,40
7	73,00	EUR	per	1	g	99,0%				44753,98	EUR	per	ton	1631,14
9	72,61	EUR	per	1	kg	99,5%	1300,00	EUR	per	ton	55,85			
11	43,22	EUR	per	1	kg	99,8%	305,00	EUR	per	ton	141,71			
13	5655,81	EUR	per	1	kg	98,0%				1943,40	EUR	per	ton	2910,27
14	69,20	EUR	per	250	mg					1696,97	EUR	per	ton	1631,14
15	760,00	EUR	per	25	kg	98,0%				578,34	EUR	per	ton	52,56
16	117,50	EUR	per	3	kg	98,0%				686,92	EUR	per	ton	57,02
17	280,00	EUR	per	25	kg	98,0%				261,62	EUR	per	ton	42,81
18	15,21	EUR	per	1	kg	99,8%	1100,00	EUR	per	ton	13,82			
19	169,22	EUR	per	1	kg	97,0%				1413,69	EUR	per	ton	119,70
21	405,00	EUR	per	25	kg	99,0%				332,41	EUR	per	ton	48,74
23	340,00	EUR	per	25	kg	98,0%				308,88	EUR	per	ton	44,04
24	1875,00	EUR	per	25	kg	98,0%				997,06	EUR	per	ton	75,22
31	408,00	EUR	per	100	g	98,0%				2501,32	EUR	per	ton	1631,14
34	1875,00	EUR	per	25	kg	98,0%				11134,20	EUR	per	ton	75,22

35	188,00	EUR	per	1,5	kg	99,0%	1433,00	EUR	per	ton	87,46	
36	3500,00	EUR	per	10	kg	98,0%					1628,51	EUR per ton 214,92
38	237,00	EUR	per	100	g		1452,97	EUR	per	ton	1631,14	
39	1300,00	EUR	per	1	kg	97,0%					1872,83	EUR per ton 694,14
40	105,50	EUR	per	5	g						12935,74	EUR per ton 1631,14
41	429,00	EUR	per	19,5	kg	99,0%					425,68	EUR per ton 51,68
42	640,00	EUR	per	25	kg	98,0%					510,72	EUR per ton 50,13
43	199,80	EUR	per	5	kg	99,0%					657,18	EUR per ton 60,81
45	68,19	EUR	per	1	kg	99,5%	720,00	EUR	per	ton	94,70	
47	207,50	EUR	per	5	kg	99,0%					673,83	EUR per ton 61,59
48	75,10	EUR	per	3	kg	40,0%					2503,33	EUR per ton 10,00
49	14,68	EUR	per	1	kg	37,0%					1467,89	EUR per ton 10,00
50	170,00	EUR	per	25	kg	95,0%					223,53	EUR per ton 30,42
51	81,00	EUR	per	2	kg	99,0%					663,06	EUR per ton 61,08
52	15,21	EUR	per	1	kg	99,8%					298,51	EUR per ton 50,94
53	177,02	EUR	per	1	kg	80,0%					8851,15	EUR per ton 20,00
54	2450,00	EUR	per	5	kg	98,0%					1713,04	EUR per ton 268,04
55	248,00	EUR	per	20	kg	97,0%					309,73	EUR per ton 40,04
57	43,14	EUR	per	1	kg	98,0%	2050,00	EUR	per	ton	21,04	
59	750,00	EUR	per	25	kg	98,0%					572,95	EUR per ton 52,36
61	4500,00	EUR	per	1	kg	97,0%					1939,88	EUR per ton 2319,74
62	193,50	EUR	per	5	g	98,0%					4745,15	EUR per ton 1631,14
64	1275,00	EUR	per	22,68	kg	99,0%					813,98	EUR per ton 69,06
65	63,30	EUR	per	0,5	kg	99,0%					1207,80	EUR per ton 104,82
66	1750,00	EUR	per	10	kg	98,0%					1388,66	EUR per ton 126,02
67	4000,00	EUR	per	1	kg	99,0%					1930,03	EUR per ton 2072,51
71	96,07	EUR	per	1	kg	95,0%					1267,91	EUR per ton 75,77
97	462,33	EUR	per	1	kg	99,0%					1678,94	EUR per ton 275,37

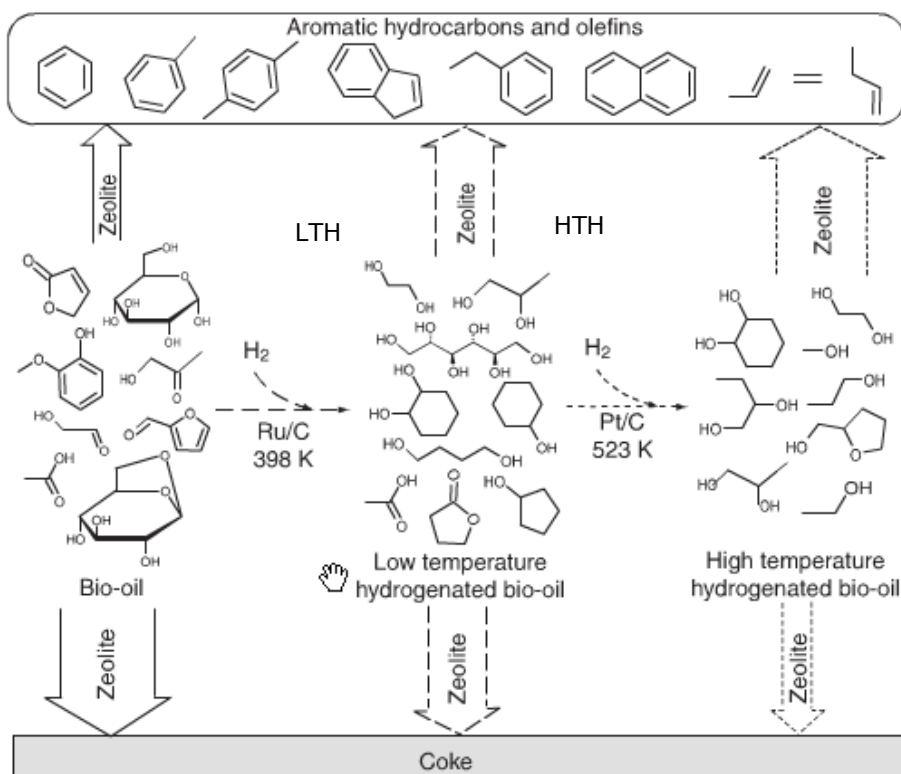
BIJLAGE 11: H/C_{EFF} RATIO

In deze bijlage wordt dieper ingegaan op de H/C_{eff} ratio. Het waterstofgehalte van grondstoffen kan uitgedrukt worden als de effectieve verhouding tussen waterstof en koolstof (H/C_{eff} ratio). De formule van H/C_{eff} ratio is:

$$\frac{H}{C_{eff}} = \frac{\text{mol H} - (2 \times \text{mol O})}{\text{mol C}}$$

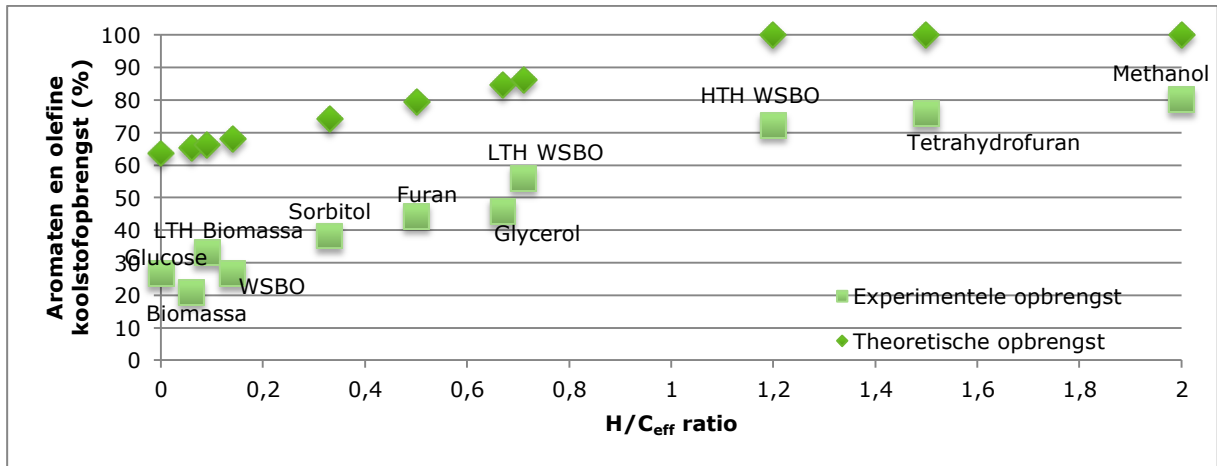
De H/C_{eff} ratio voor petroleumgrondstoffen varieert tussen 1 en 2, terwijl deze van pyrolyseolie afkomstig van houtachtige biomassa schommelt tussen 0 en 0,5. Dit is het resultaat van het hoge zuurstofgehalte in de pyrolyseolie. Tijdens de bewerking van de pyrolyseolie, wordt zuurstof verwijderd in de vorm van H₂O, CO en CO₂. Door de toevoeging van waterstof aan de pyrolyseolie wordt de hoeveelheid verwijderde zuurstof in de vorm van H₂O verhoogd ten opzichte van de verwijdering in de vorm van CO en CO₂. Het toevoegen van waterstof tijdens het bewerkingsproces heeft als gevolg dat de koolstofopbrengst in de chemische eindproducten verhoogt. Als conclusie wordt hierbij gesteld dat de waterstofeconomie en de verwerking van pyrolyseolie tot chemische producten (en transportbrandstoffen) sterk aan elkaar gelinkt zijn. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

Op onderstaande figuur is het proces van genereren en zeoliet upgrading (katalytisch upgraden) weergegeven met als eindproducten aromaten en olefine. Olefine is de benaming voor onverzadigde koolwaterstoffen. Ze zijn onstabiel en hebben een dubbele binding (vb. alkenen). Aromaten bezitten benzeenringen (vb. benzeen). Op de figuur neemt de stabiliteit toe van links naar rechts door hydroprocessing (lage en hoge temperatuur). Ook zorgt hydroprocessing voor een toename van het intrinsieke gehalte van waterstof wat leidt tot een hogere opbrengst aan aromaten en olefine. Coke (char) wordt gevormd door thermisch instabiele functionele groepen. Aangezien de stabiliteit van links naar rechts toeneemt, neemt ook de opbrengst van aromaten en olefine toe van links naar rechts en daalt de opbrengst aan coke (zie breedte van de pijlen). (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)



Figuur 50: Reactieschema van hydrogeneren en zeoliet upgrading van pyrolyseolie. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

De link tussen het waterstofgehalte en de opbrengst aan eindproducten kan grafisch aangetoond worden. Op onderstaande grafiek is te zien dat de opbrengsten aan aromaten en olefine duidelijk toenemen als de H/C_{eff} ratio toeneemt. Deze relatie kan worden doorgetrokken naar een brede waaier aan grondstoffen. Het verschil tussen de theoretische en de experimentele opbrengst ontstaat doordat de toegevoegde waterstof niet alleen gebruikt wordt voor de toename in opbrengst van aromaten en olefine, maar ook voor de toename in H/C_{eff} ratio. Daarom is het economisch gezien belangrijk naar een grondstof te zoeken of te creëren met een hoge H/C_{eff} ratio. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

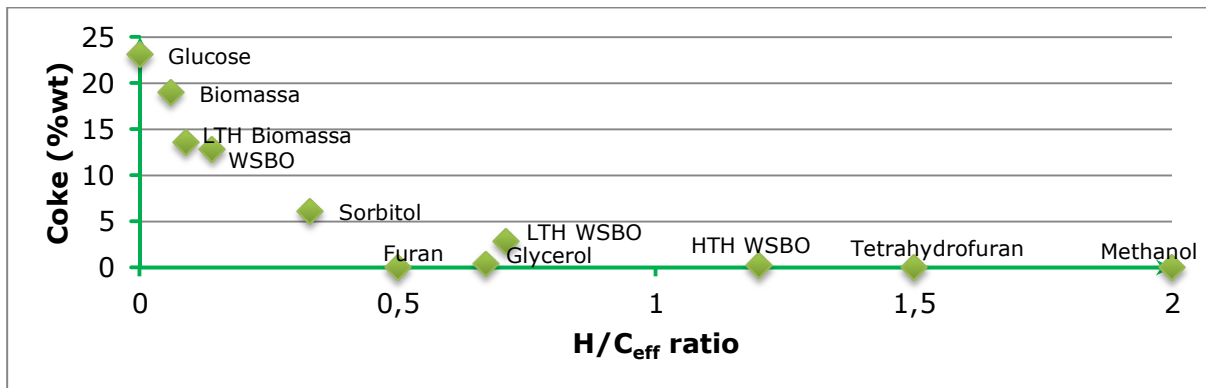


Figuur 51: Relatie tussen waterstoftoevoeging en chemische eindproducten. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

De toename van aromaten en olefine koolstofopbrengsten in pyrolyseolie, wanneer de H/C_{eff} ratio toeneemt, kan worden toegewezen aan twee fenomenen:

- Toename van de thermische stabiliteit van de pyrolyseolie;
- Toename van het intrinsieke waterstofgehalte van de pyrolyseolie.

De toename van de thermische stabiliteit is te wijten aan het hydrogeneren (verbinden aan waterstof) van de functionele groepen (hoofdzakelijk aldehyden en ketonen) die anders zouden ontbinden tot char⁵². Dit is grafisch weergegeven in onderstaande figuur. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)



Figuur 52: Relatie tussen charvorming en H/C_{eff} ratio. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

⁵² Voorbeeld: Glucose levert 23.1 %wt coke op (973 K; helium atmosfeer), terwijl sorbitol slechts 6,1 %wt coke oplevert. Sorbitol is een afgeleid product van glucose waarbij de functionele groep aldehyde is gehydrogeneerd tot alcohol. Sorbitol is ook stabiel. (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

De toename van het intrinsieke waterstofgehalte van de pyrolyseolie (door de externe toevoeging van waterstof stijgt de H/C_{eff} ratio) zorgt voor een hogere theoretische opbrengst van aromatische waterkoolstoffen en olefine, omdat minder koolstof verbruikt wordt bij het verwijderen van zuurstof. De verhouding zuurstof die verwijderd wordt in de vorm van H_2O neemt toe ten opzichte van de zuurstof die verwijderd wordt in de vorm van CO en CO_2 . (Vispute, Zhang, Sanna, Xiao, & Huber, 2010)

BIJLAGE 12: HERNIEUWBARE WATERSTOFPRODUCTIE

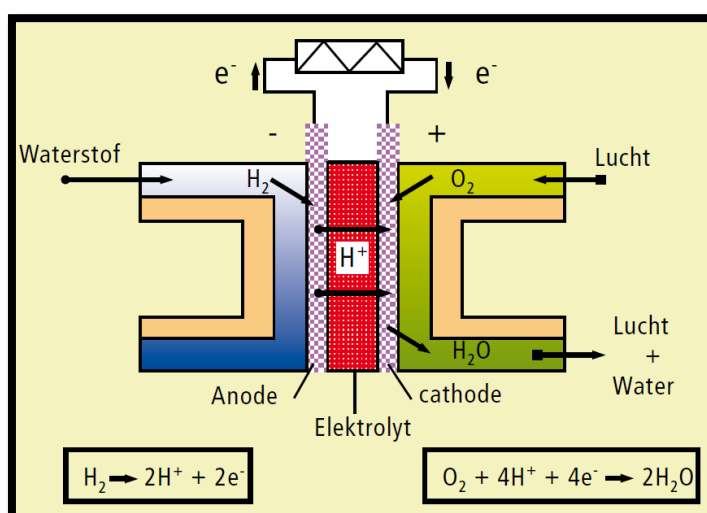
Deze bijlage gaat dieper in op de technologie rond hernieuwbare waterstofproductie.

De toepassingen van waterstof kunnen worden onderverdeeld in drie categorieën. Deze worden in onderstaande tabel weergegeven. (Vlaams Instituut voor Wetenschappelijk en Technologisch Aspectenonderzoek (viWTA), 2008)

Tabel 42: Toepassingen van waterstof (Vlaams Instituut voor Wetenschappelijk en Technologisch Aspectenonderzoek (viWTA), 2008)

Toepassingen	Voorbeeld
Draagbare toepassingen	Draagbare brandstofcelssystemen (1 – 20 W) voor elektronische toestellen
	Draagbare generatoren (tot 20 kW) voor back-up vermogen
Stationaire toepassingen	Brandstofcelssystemen met WKK voor energiesystemen (wijk, industrie)
Transporttoepassingen	Verbrandingsmotor of brandstofcel

Brandstofcellen leveren elektrische energie via een elektrochemische reactie. Binnen de brandstofcel wordt waterstof via een elektrolyt gecombineerd met zuurstof uit de lucht. Wanneer deze twee met elkaar reageren, ontstaat waterdamp, elektriciteit en warmte. Brandstofcellen hebben een hoog rendement en bevatten geen bewegende onderdelen. Het rendement van een brandstofcel ligt twee tot drie maal hoger dan dat van een conventionele motor. Er bestaan verschillende types brandstofcellen, met elk specifieke toepassingen en werkingstemperaturen. Deze informatie valt echter buiten de grenzen van deze masterproef. (Vlaams Instituut voor Wetenschappelijk en Technologisch Aspectenonderzoek (viWTA), 2008) (Energie- & milieu-informatiesysteem voor het Vlaams Gewest, 2009)



Figuur 53: Werking van een brandstofcel (Vlaams Instituut voor Wetenschappelijk en Technologisch Aspectenonderzoek (viWTA), 2008)

Opslag en distributie zijn belangrijke voorwaarden voor het gebruik van waterstof als energiedrager. Waterstof heeft dan wel een hoge energiedichtheid (drie maal hoger als benzine of aardgas), maar op basis van volume heeft waterstof slecht 1/3 van de energie-inhoud van aardgas en 1/4 van de energie-inhoud van benzine. Daardoor is het moeilijk om waterstof op een kostenefficiënte manier op te slaan. Gasvormige en vloeibare opslag van waterstof vergen veel energie (tot 40% van de energie-inhoud) en opslag in vaste vorm heeft een hoog gewicht als nadeel. De distributie van waterstof is wel positief. Aangezien België een uitgebreide chemische industrie heeft, loopt een groot deel van het gasdistributienetwerk door België. In totaal heeft Europa 1.500 km leidingennetwerk, wat de distributie van waterstof over grote afstanden mogelijk maakt. (Vlaams Instituut voor Wetenschappelijk en Technologisch Aspectenonderzoek (viWTA), 2008)

Waterstofproductie kan een belangrijke onderdeel zijn van een bioplex. Als hernieuwbare energiebron en omgevingsvriendelijke stof kan waterstof via bijvoorbeeld een pijpleidinginstallatie gemakkelijk en tegen een lage kost geleverd worden aan naburige ondernemingen die het via brandstofcellen kunnen gebruiken voor de opwekking van elektrische energie. (Zhang, Li, Zhang, Xu, & Yan, 2012)

Verwacht wordt dat de wereldvraag naar waterstof sterkt zal toenemen. Niet alleen zal de vraag naar waterstof in bestaande industrieën toenemen, ook nieuwe technologieën zullen steeds vaker gebruik maken van waterstof (bijvoorbeeld brandstofcellen). Tot op heden wordt waterstof hoofdzakelijk afgeleid uit fossiele brandstoffen. Het wereldverbruik bedroeg in 2008 circa 500 miljard m³, met als belangrijkste toepassingen als grondstof voor de productie van ammoniak, in de petrochemie en in de voedingsindustrie. (Bleeker, Gorter, Kersten, van der Ham, van den Berg, & Veringa, 2010) (Vlaams Instituut voor Wetenschappelijk en Technologisch Aspectenonderzoek (viWTA), 2008)

Er bestaan verschillende methoden om waterstof te produceren. Onderstaande tabel bevat een lijst met de verschillende grondstoffen (uitgezonderd fossiele brandstoffen), de verschillende conversietechnieken en eventuele co-producten die naast waterstof de output vormen.

Tabel 43: Grondstoffen, conversietechnieken en co-producten van de productie van waterstof (Evans, Czernik, Chornet, Feik, French Richard, & Philips, 2002)

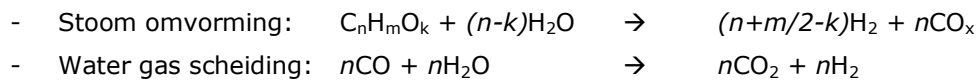


BIJLAGE 13: TECHNOLOGIËN WATERSTOFPRODUCTIE

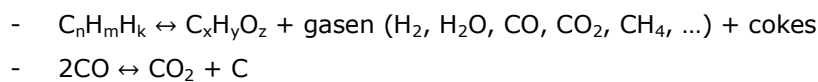
In deze bijlage wordt dieper ingegaan op de twee mogelijke technieken om uit pyrolyseolie waterstof te produceren. De twee technieken die besproken zullen worden, zijn catalytic steam reforming en het steam-iron proces.

Catalytic steam reforming

Catalytic steam reforming is het proces dat binnen dit onderzoek het meeste aandacht heeft gekregen. De omvormingsvergelijking waarvan deze methode gebruik maakt zijn: (Lan, Xu, Zhou, Lan, Zhang, & Yan, 2010)



Naast deze reacties ontstaan door de hoge temperatuur decompositie reacties: (Lan, Xu, Zhou, Lan, Zhang, & Yan, 2010)



Op basis van de laatste vergelijking, waar het element koolstof vrijkomt, kan door de toevoeging van water de vergassing van cokes plaatsvinden: (Evans, et al., 2004)



Binnen het proces gaat de meeste aandacht uit naar de:

- Temperatuur;
- Katalysator;
- Stoom-tot-koolstof ratio (S/C ratio); en
- Vloeistofdoorloopsnelheid per uur (LHSV).

Waarbij:

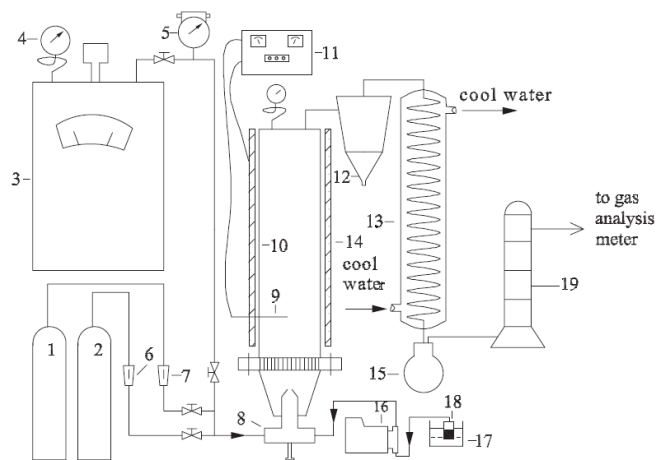
$$S/C \text{ ratio} = \frac{\text{mol water in input}}{\text{mol koolstof in input}}$$

$$LHSV = \frac{\text{volumetrische doorloop van pyrolyseolie}}{\text{volume van katalysator}}$$

$$\text{opbrengst waterstof} = \frac{\text{mol H}_2 \text{ als output}}{\frac{(2n + \frac{m}{2} - k) * \text{mol koolstof in input}}{n}} * 100\%$$

Bijvoorbeeld een proces dat opereert op een temperatuur tussen 700 en 800 °C, een S/C ratio heeft tussen 15 en 20, een LHSV heeft tussen 0,5 en 1 per uur levert een opbrengst van 75,88% waterstof van het stoichiometrisch potentieel. (Lan, Xu, Zhou, Lan, Zhang, & Yan, 2010)

Catalytic steam reforming wordt in onderstaande afbeelding vereenvoudigd weergegeven. Hoewel het mogelijk is om catalytic steam reforming van pyrolyseolie uit te voeren in een fixed bed reactor en een fluidized bed reactor, wordt hier enkel de fluidized bed reactor weergegeven. De reden voor deze keuze is dat bij deze reactor de vorming van cokes minder is. De vorming van cokes schaadt de katalysator en dat blijft tot op heden een belangrijke bottleneck van het proces. (Lan, Xu, Zhou, Lan, Zhang, & Yan, 2010)



Figuur 54: Schematisch diagram van catalytic steam reforming van pyrolyseolie in een fluidized bed reactor (Lan, Xu, Zhou, Lan, Zhang, & Yan, 2010)

Op de figuur duiden de nummers volgende onderdelen aan.

- | | | |
|--------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| 1: stikstof cilinder | 8: injectiespuit | 14: oven |
| 2: waterstof cilinder | 9: thermokoppel | 15: vloeistof ontvanger |
| 3: stoom generator | 10: fluidized bed reactor | 16: doseerpomp |
| 4: manometer | 11: controle-instrument temperatuur | 17: const. temperatuur bad |
| 5: stoom stroommeter | 12: cycloonscheider | 18: pyrolyseolie container |
| 6: waterstof stroommeter | 13: condensator | 19: droogtoren |
| 7: stikstof stroommeter | | |

Algemeen kunnen volgende resultaten aan catalytic steam reforming worden toegewezen. Het proces heeft een opbrengst aan waterstof tussen 62,47 en 92,5 % van het stoichiometrisch

potentieel. De opbrengst wordt berekend op basis van onderstaande formule. Hierbij worden verliezen van de katalysator opgetekend van 0,15 tot 1,1 %/uur. (Czernik, Evans, & French, 2007) (Zhang, Li, Zhang, Xu, & Yan, 2012)

$$\text{opbrengst} = \frac{\text{werkelijke opbrengst}}{\text{stoichiometrisch potentieel}}^{53}$$

De kosten van dit proces zijn nog niet gedetailleerd bepaald. Een beknopte berekening van Evans et al. (2002) leverde een mogelijke verkoopprijs van 7,52 EUR/GJ tot 9,20 EUR/GJ op voor hernieuwbare waterstof. Deze prijsrange is gebaseerd op een kleinschalige productie-eenheid. (Evans, Czernik, Chornet, Feik, French Richard, & Philips, 2002)

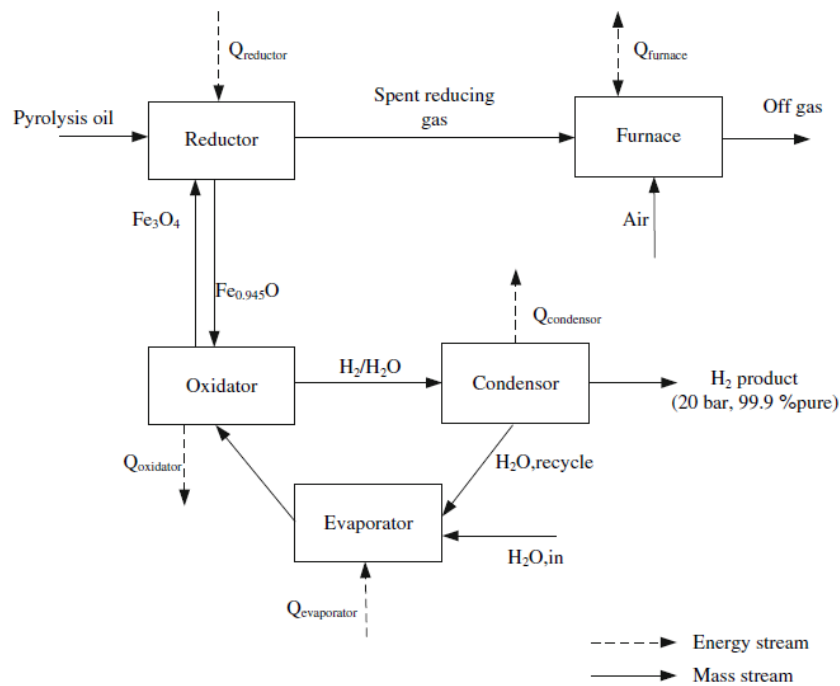
Wel is bekend dat de kost hoofdzakelijk wordt bepaald door katalysatoren en de energiekost. Door de hoge temperatuur (tot 900°C) is er vrij veel energie nodig om waterstof te produceren. Het energieverbruik is wel vergelijkbaar met het energieverbruik van het proces dat aardgas omzet in waterstof. Belangrijke meerkosten zijn afkomstig van de katalysatoren en het feit dat de techniek zich nog in het beginstadium bevindt en dus in het begin van de leercurve zit. Deze kosten kunnen op termijn wel grotendeels weggewerkt worden. De katalysator die gebruikt wordt in het proces, ondervindt hevige wrijving met vaste delen (cokes) die gevormd worden. De beschadiging vereist een voortdurende input aan nieuwe katalysator en dit is kostelijk. (Vagia & Lemonidou, 2007) (Lan, Xu, Zhou, Lan, Zhang, & Yan, 2010)

Steam-iron proces

Nadat het catalytic steam reforming proces besproken is, wordt hier een alternatief toegelicht. Het gaat om een relatief nieuw alternatief dat claimt betere resultaten op te leveren.

Het steam-iron proces bestaat uit twee stappen: een reductie van pyrolyseolie en het oxideren van stoom. Het voordeel is dat er puur waterstof gecreëerd wordt, zonder dat hiervoor extra zuiveringsprocessen nodig zijn. Het proces heeft een vrij simpel ontwerp (zie onderstaande afbeelding). De vergassing van pyrolyseolie en de reductie vinden simultaan plaats. Ook zijn er geen scheidingsstappen noodzakelijk in het proces. (Bleeker, Gorter, Kersten, van der Ham, van den Berg, & Veringa, 2010)

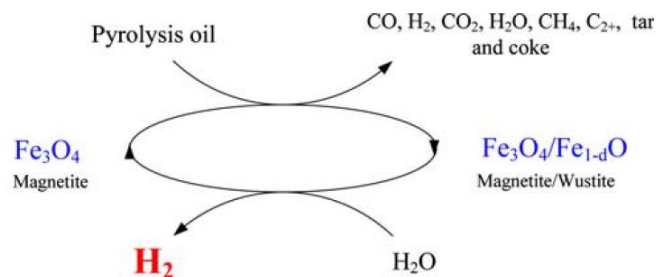
⁵³ 11,2% voor pyrolyseolie afkomstig van houtachtige biomassa of 17,2 g waterstof /100 g pyrolyseolie (Evans, Czernik, Chornet, Feik, French Richard, & Philips, 2002)



Figuur 55: Schematisch diagram van een steam-iron proces (Bleeker, Gorter, Kersten, van der Ham, van den Berg, & Veringa, 2010)

Het proces bestaat uit een redox cyclus waarin ijzeroxide gebruikt wordt om pure waterstof te creëren. Waterstof komt voort uit de oxidatie van wustiet ($\text{Fe}_{0,945}\text{O}$). Wustiet op zijn beurt komt voort uit de reductie van magnetiet (Fe_3O_4) met pyrolyseolie. De output van het proces is CO vrij wat belangrijk is, omdat het ongewenst is in een brandstofcel. (Bleeker, Gorter, Kersten, van der Ham, van den Berg, & Veringa, 2010)

De steam-iron cyclus is een looping-proces, waarbij ijzeroxide gereduceerd en geoxideerd wordt in twee aparte stappen. Pyrolyseolie wordt gebruikt als reducerende grondstof, hiervoor zorgen CO , H_2 en vaste koolstoffen die in pyrolyseolie aanwezig zijn. Het oxideren vindt plaats met behulp van stoom. Het resulteert in een mengeling van H_2 en H_2O . Uit deze mengeling kan waterstof gemakkelijk gescheiden worden door de stoom te condenseren.



Figuur 56: Reacties in het steam-iron proces (Bleeker, Gorter, Kersten, van der Ham, van den Berg, & Veringa, 2010)

Hieronder worden de reactievergelijkingen van het proces weergegeven. Alle reacties zijn omkeerbaar en de evenwichten zijn sterk temperatuur afhankelijk, vooral deze van gasvormige producten. De reactievergelijkingen zijn: (Bleeker, Gorter, Kersten, van der Ham, van den Berg, & Veringa, 2010)

- $1,2 \text{ Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} \leftrightarrow 3,8 \text{ Fe}_{0,945}\text{O} + \text{CO}_2$
- $1,2 \text{ Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2 \leftrightarrow 3,8 \text{ Fe}_{0,945}\text{O} + \text{H}_2\text{O}$
- $1,2 \text{ Fe}_3\text{O}_4 + \text{C} \leftrightarrow 3,8 \text{ Fe}_{0,945}\text{O} + \text{CO}$
- $\text{Fe}_{0,945}\text{O} + \text{CO} \leftrightarrow 0,945\text{Fe} + \text{CO}_2$
- $\text{Fe}_{0,945}\text{O} + \text{H}_2 \leftrightarrow 0,945\text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$
- $\text{Fe}_{0,945}\text{O} + \text{C} \leftrightarrow 0,945\text{Fe} + \text{CO}$

Het proces is even energie-efficiënt als andere thermochemische routes om biomassa om te zetten naar waterstof. De energie-efficiëntie voor dit proces schommelt rond 53%, terwijl andere routes een gemiddelde efficiëntie hebben tussen 50 en 58%. Het proces heeft een opbrengst tot 1,35 Nm³/kg pyrolyseolie op droge basis of 0,121 kg/kg pyrolyseolie op droge basis⁵⁴. Dit is ongeveer een opbrengst van 70% ten opzicht van het stoichiometrisch potentieel. (Bleeker, Gorter, Kersten, van der Ham, van den Berg, & Veringa, 2010)

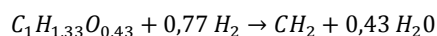
⁵⁴ 0,089 88 kg/Nm³ (waterstof)

BIJLAGE 14: TECHNISCHE ACHTERGROND TRANSPORTBRANDSTOFFEN

Deze bijlage bevat de technologische achtergrond van hoofdstuk IV: Toepassing als transportbrandstoffen.

Hydroprocessing

In dit onderdeel wordt enkel ingegaan op de beschrijving van het proces om tot een geüpgraded stabiele olie te komen. Hiervoor zijn enkele voorbereidingsstappen nodig en vervolgens hydrotreating. Deze stappen hebben als resultaat een stabiele en geüpgraded olie. De belangrijkste verandering die pyrolyseolie ondergaat is dat door middel van een katalytische reactie en een overvloed aan waterstof het zuurstofgehalte drastisch wordt verlaagd. De zuurstof wordt uit de ruwe pyrolyseolie verwijderd in de vorm van water. De conceptuele reactievergelijking van dit proces is: (Bridgwater A. , 2011)



Hydrotreatment (of hydrodeoxygenation (HDO)) verwijdert zuurstof in de vorm van water. De maximale mogelijke opbrengst (stoichiometrisch potentiaal) bedraagt 56 tot 58% van de totale input aan pyrolyseolie en is afhankelijk van de samenstelling ervan. De belangrijkste nadelen van het proces zijn de grote input aan waterstof dat een relatief duur gas is, dat het proces onder hoge druk (70 – 200 bar) plaatsvindt, dat 20 tot 30% van de inhoud aan koolstof verloren gaat in een gasfase en tenslotte dat de gebruikte katalysatoren deactivatie ondervinden door de aanwezigheid van onzuiverheden. (Bulushev & Ross, 2011)

Om deze nadelen aan te pakken wordt door verschillende auteurs (aangehaald door Bulushev en Ross (2001)) voorgesteld om hydrotreating uit te voeren in twee stappen. In de eerste stap worden instabiele componenten thermisch omgevormd tot een mengeling van cokes en meer stabiele componenten. Deze worden verder omgevormd in de tweede stap met behulp van de katalysatoren. Hierdoor daalt de input aan waterstof en neemt de deactivatie van katalysatoren af. (Bulushev & Ross, 2011)

Veel onderzoek is reeds verricht naar hydrotreating. Hoofdzakelijk gaat de aandacht naar het begrijpen van de complexe processen die tijdens hydrotreating plaatsvinden. Verschillende testen zijn ook uitgevoerd om een optimale katalysator te vinden. Het voordeel van pyrolyseolie is dat het zelf al enkele katalysatoren in zich heeft die helpen bij het upgraden van pyrolyseolie. (Bulushev & Ross, 2011)

Als input voor hydrotreating kan zowel pyrolyseolie als geheel gebruikt worden of enkel het WSBO gedeelte. (Zhang, Yan, Tingchen, & Ren, 2005)

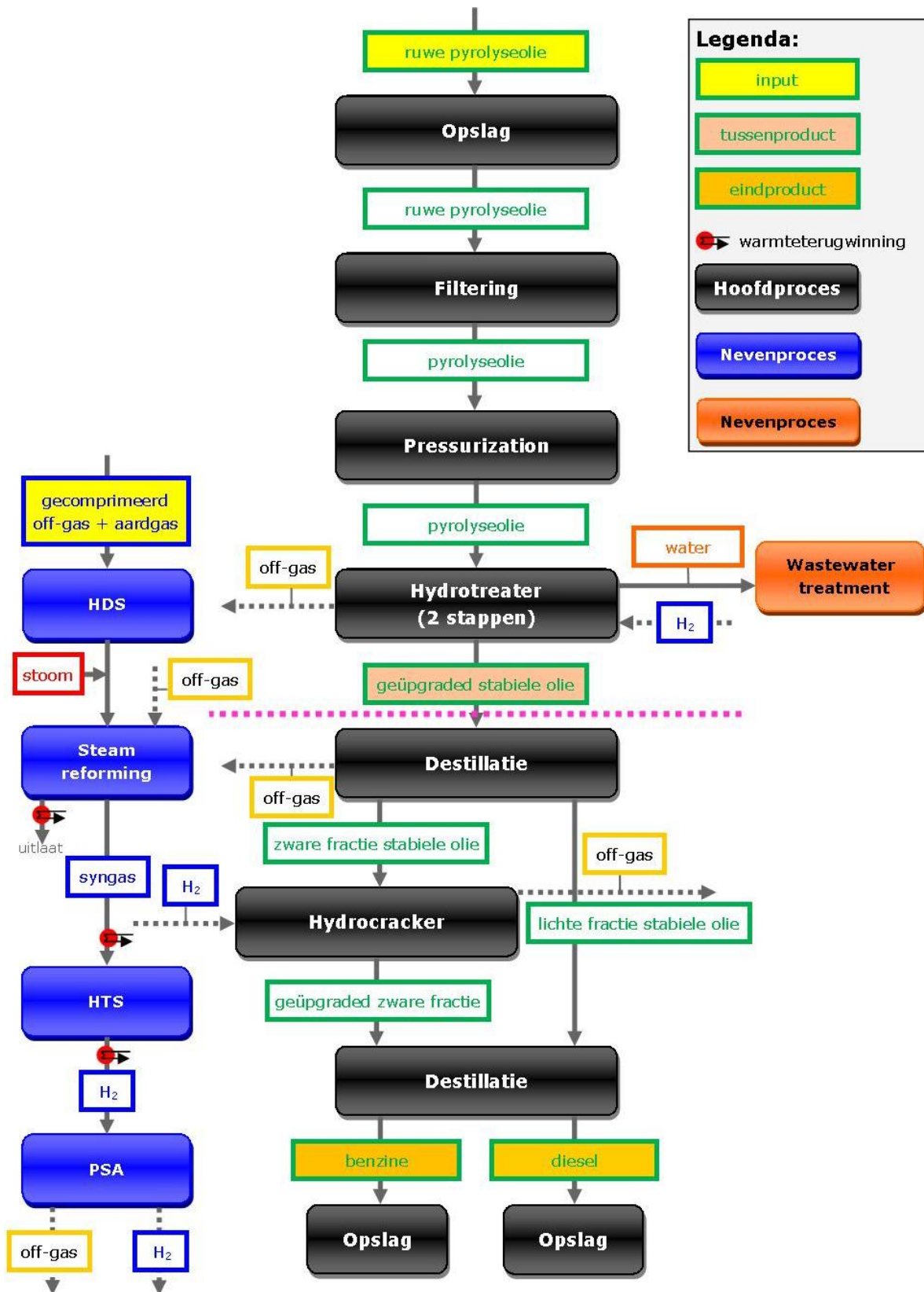
Het volledige proces dat vertrekt bij het ontvangen van ruwe pyrolyseolie en eindigt bij het verkrijgen van transportbrandstoffen wordt hier toegelicht. De beschrijving van het proces begint bij het ontvangen en opslaan van ruwe pyrolyseolie. Afhankelijk van de kwaliteit wordt de pyrolyseolie eerst gefilterd om vaste delen te verwijderen. Vervolgens wordt de pyrolyseolie door middel van pompen onder hoge druk gebracht en wordt er waterstof aan toegevoegd. Hierna brengt een voorverwarmer de pyrolyseolie op de gewenste temperatuur. De hydrotreater werkt in twee stappen. De eerste katalytische reactor levert een stabiele olie op door middel van milde hydrotreatment. De tweede katalytische reactor opereert op een hogere temperatuur en een lagere snelheid. Deze stap levert drie producten op: afvalwater, gas en olie (mengeling van waterkoolstoffen met een laag zuurstofgehalte). De hydrotreated olie wordt gestabiliseerd door butaan en andere lichte componenten te verwijderen. De stabiele olie wordt vervolgens gescheiden in een lichte en een zware fractie. De zware fractie wordt via een hydrocracker omgezet in benzine en diesel. Alles samen wordt door middel van destillatie gescheiden in benzine en diesel. (Jones, et al., 2009) (Huber & Corma, 2007)

Naast het hoofdproces (productie van benzine en diesel) zijn er nevenprocessen die het proces ondersteunen (Jones, et al., 2009). Hieronder vallen:

- De verwerking van het afvalwater door anaerobe vergisting;
- De recuperatie van warmte door gebruik te maken van stoom;
- De productie van waterstof (zie hoofdstuk III - 3.2.3.1); en
- De recuperatie van off-gas voor verbranding in steam reformer.

Zoals vermeld in hoofdstuk IV is het uitvoeren van het volledige proces in de Noorderkempen economisch niet haalbaar. Een economisch interessantere oplossing is om enkel het proces uit te voeren tot en met hydrotreating. Hierna wordt een geüpgraded stabiele olie verkregen die verder verwerkt kan worden in conventionele installaties. Op onderstaande afbeelding wordt dit aangegeven door de roze stippenlijn. Alle processen boven deze lijn dienen uitgevoerd te worden samen met de nevenprocessen (met uitzondering van de recuperatie van off-gas).

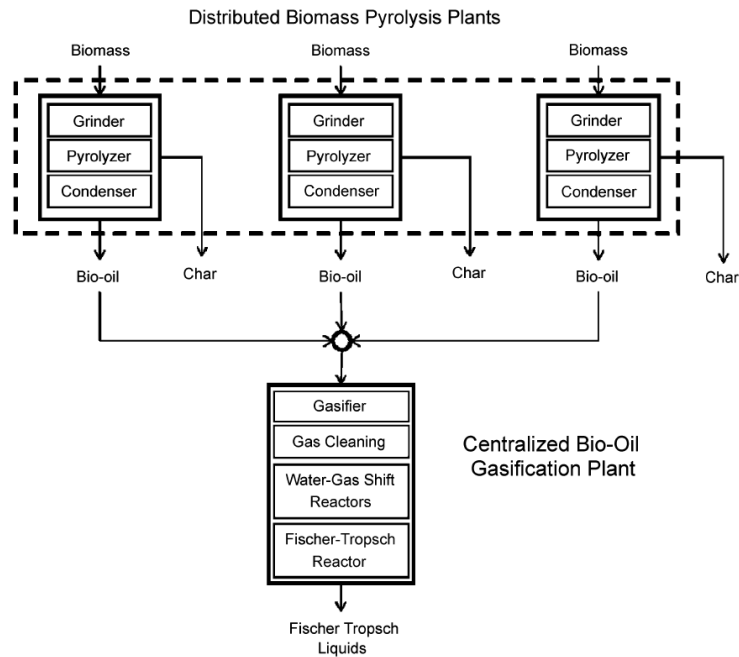
In onderstaande figuur wordt het productieproces schematisch voorgesteld.



Figuur 57: Productieproces transportbrandstoffen (Jones, et al., 2009)

Vergassing

De idee van het proces waarbij biomassa via fast pyrolyse wordt omgezet in pyrolyseolie en verder wordt geüpgraded kan worden samengevat in onderstaande figuur.



Figuur 58: Vergassing van pyrolyseolie tot transportbrandstoffen (Wright, Brown, & Boateng, 2008)

Het vergassen van fossiele brandstoffen is een welgekende techniek die reeds een lange tijd wordt toegepast. Het voordeel hiervan is dat de techniek reeds ver gevorderd is op de leercurve (hoge cumulatieve productie). Het vergassen van pyrolyseolie is een uitbreiding van deze techniek, waardoor de beschikbare kennis gebruikt kan worden. De belangrijkste parameters bij het vergassen van pyrolyseolie zijn de temperatuur, stoom-tot-koolstof ratio en de katalysator-tot-input ratio. (Huber, Iborra, & Corma, 2006)

Het vergassen van pyrolyseolie brengt ook moeilijkheden met zich mee. Deze moeilijkheden komen voort uit de complexe samenstelling van pyrolyseolie die een invloed heeft op de samenstelling van synthetisch gas. Vooral de gasreiniging zou problemen kunnen opleveren. Testen dienen uitgevoerd te worden om zekerheid te krijgen of de gasreiniging in staat is om gassen te leveren die voldoende gereinigd zijn om te voldoen aan de vereisten van de FT synthese reactor. (Huber, Iborra, & Corma, 2006) (Tijmensens, Faaij, Hamelinck, & van Hardeveld, 2002)

BIJLAGE 15: SCHAALVERGROTING TRANSPORTBRANDSTOFFEN

In onderstaande tabel vindt u alle berekende schaalvergrotingen terug samen met de belangrijkste bijhorende data. De berekeningswijze is reeds uitgelegd in deel 5.4.5 van deze masterproef.

Tabel 44: Schaalvergrotingen vergassingsinstallatie (toepassing als transportbrandstoffen)

Productiecapaciteit	Investering (in miljoen EUR)	Minimale verkoopprijs per liter (bij NCW=0)	Kosten (in miljoen EUR)	Opbrengen (in miljoen EUR)	Jaarlijkse CF (in miljoen EUR)
100% (IW)	26,92	3,06	8,02	12,42	3,54
150% (IW*1,5)	34,33	2,73	11,04	16,65	4,51
200% (IW*2)	40,80	2,53	13,91	20,58	5,36
300% (IW*3)	52,04	2,29	19,38	27,88	6,84
400% (IW*4)	61,85	2,14	24,60	34,71	8,13
500% (IW*5)	70,71	2,03	29,68	41,24	9,30
600% (IW*6)	78,88	1,95	34,65	47,54	10,37
700% (IW*7)	86,52	1,89	39,53	53,67	11,38
800% (IW*8)	93,74	1,84	44,34	59,66	12,32
900% (IW*9)	100,61	1,79	49,10	65,54	13,23
1.000% (IW*10)	107,17	1,76	53,81	71,32	14,09
5.000% (IW*50)	281,49	1,35	227,82	273,81	37,01
10.000% (IW*100)	426,65	1,24	433,57	503,28	56,09
20.000% (IW*200)	646,69	1,16	833,72	939,38	85,02
30.000% (IW*300)	824,80	1,12	1.227,08	1.361,85	108,44
40.000% (IW*400)	980,19	1,09	1.616,78	1.776,93	128,87
50.000% (IW*500)	1.120,62	1,08	2.004,05	2.187,15	147,33
60.000% (IW*600)	1.250,16	1,06	2.389,57	2.593,83	164,36
70.000% (IW*700)	1.317,30	1,05	2.773,72	2.997,78	180,29
80.000% (IW*800)	1.485,69	1,05	3.156,79	3.399,54	195,33
90.000% (IW*900)	1.594,49	1,04	3.538,35	3.799,48	209,63
100.000% (IW*1000)	1.698,54	1,03	3.920,34	4.197,87	223,31

Auteursrechtelijke overeenkomst

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

Een verkennend onderzoek naar de economische waarde van pyrolyseolie uit kortoomloophout

Richting: **master in de toegepaste economische wetenschappen: handelsingenieur-technologie-, innovatie- en milieumanagement**

Jaar: **2012**

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,

Christis, Maarten

Datum: **29/05/2012**