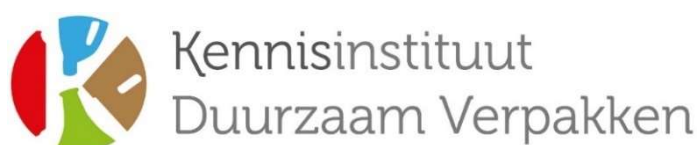


**PRODUCTIEKOSTEN- EN
BRUTOWINST ANALYSE VAN
VIER CHEMISCHE RECYCLING
PROCESSEN
TNO RAPPORT**



SARA WIECLAWSKA, TOON ANSEMS, RAJAT BHARDWAJ, TON BASTEIN

Deze rapportage is opgesteld in opdracht van



TNO PUBLIEK

Anna van Buerenplein 1
2595 DA Den Haag
Postbus 96800
2509 JE Den Haag

TNO-rapport

www.tno.nl

T +31 88 866 00 00

Productiekosten- en brutowinst analyse van vier chemische recycling processen

Datum	12 oktober 2018
Auteur(s)	Sara Wieclawska, Toon Ansems, Rajat Bhardwaj, Ton Bastein
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	33 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	KIDV
Projectnaam	Chemische recycling van kunststof verpakkingen: analyse en mogelijkheden voor opschaling
Projectnummer	060.31807

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2018 TNO

Deze rapportage is opgesteld in opdracht van



TNO PUBLIEK

Managementuittreksel

concept

Titel: Productiekosten- en brutowinst analyse van vier chemische recycling processen

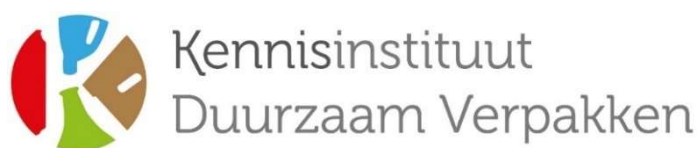
Auteur(s): Sara Wieclawska, Toon Ansems, Rajat Bhardwaj, Ton Bastein

Datum: 12 oktober 2018

Opdrachtnr.: 060.31807

Rapportnr.: TNO 2018 R11198

Deze rapportage is opgesteld in opdracht van



Samenvatting

concept

In deze studie in opdracht van het KIDV, zijn voor elk van de vier categorie chemische recyclingprocessen (solvolyse, chemolyse, pyrolyse, vergassing), aan de hand van een 'proxyproces', de productiekosten en brutowinsten (EBITDA) van elk proces berekend.

De productiekosten geven weer hoeveel het kost om één ton feedstock te verwerken. De brutowinst geeft aan wat de technische rendabiliteit van het proces zou kunnen zijn vóór belastingen, depreciatie, appreciatie etc.. De productiekosten en brutowinst berekeningen zijn gebaseerd op onafhankelijke, technische kennis van de opbouw van de proxyprocessen en op toetsing bij stakeholders in het recyclingveld.

Voor solvolyse is het Creasolv proces voor de verwerking van monostroom EPS uit de bouw genomen. Voor chemolyse is Glycolyse van monostroom PET en PET trays genomen. Voor pyrolyse is snelle, lage temperatuur vergassing van de gemixte DKR 350 stroom genomen en voor vergassing is de hoge temperatuur vergassing van de gemixte sorteer residu stroom genomen.

Naast de conclusies per techniek, zijn er vier algemene conclusies te trekken:

- De vier beschouwde processen zijn onderling niet te vergelijken; ze behandelen verschillende feedstockstromen, zijn gericht op de productie van verschillende producten voor verschillende toepassingen, via verschillende procesroutes. Men zou wel twee groepen kunnen onderscheiden; de groep solvolyse/chemolyse van specifieke kunststofstromen, waarbij afscheiding van polymeren en monomeren het doel is, en de groep pyrolyse/vergasning van mengsels kunststoffen, waarbij de productie van chemicaliën en brandstoffen aan de orde is.
- Kosten en brutowinst van de processen zijn sterk afhankelijk van de schaalgrootte van het proces, kosten van de feedstock en prijs van de producten (in relatie met de olieprijs). Deze variabelen bepalen het uiteindelijke beeld van kosten en winst gaan bepalen.
- De aanvoer van een stabiele hoeveelheid feedstock met een gegarandeerde kwaliteit is van wezenlijk belang voor de introductie van chemische recycling faciliteiten. Additionele voorzieningen (pre-processing) zijn eventueel nodig om continu aan die gevraagde kwaliteit te kunnen voldoen; de kosten hiervoor zijn niet meegenomen in de analyses omdat het gaat om een systemische verandering in het inzamel- & sorteersysteem.
- In Nederland zijn de randvoorwaarden voor de implementatie van de beoogde processen aanwezig; zo bezit Nederland al een infrastructuur voor afvalmanagement, sorteer- en scheidingsfaciliteiten, kunststof-producerende en chemische industrie bestaat en een aanbod van benodigde industriële grondstoffen (energie, gassen en warmte) en basischemicaliën. Deze inpassingsmogelijkheden kunnen benut worden en hebben een gunstig effect op de kosten van de processen.

Inhoudsopgave

	Managementuittreksel	3
	Samenvatting.....	4
1	Context en scope van deze studie.....	6
1.1	Aanleiding en doel studie.....	6
1.2	Urgentie en noodzaak.....	6
1.3	Chemische recycling als oplossing	7
1.4	De scope van deze studie.....	7
1.5	Aanpak op hoofdlijnen.....	12
2	Methode en basisaannames	13
2.1	Methode	13
2.2	Algemene aannames.....	14
2.3	Aannames van de proxyprocessen	16
2.4	Aannames voor de gevoeligheidsanalyses.....	19
3	Resultaten: Productiekosten en bruto winst analyse	20
3.1	Productiekosten en brutowinst van het proxyproces voor solvolyse: EPS Creasolv	21
3.2	Productiekosten en brutowinst van het proxyproces voor chemolyse: PET Glycolyse	22
3.3	Productiekosten en brutowinst van het proxyproces voor pyolyse: snelle, lage temperatuur pyrolyse.....	24
3.4	Productiekosten en brutowinst van het proxyproces voor vergassing: hoge temperatuur vergassing	25
4	Conclusies en mogelijkheden voor verder onderzoek	27
4.1	Algemene conclusies.....	28
4.2	Mogelijkheden voor verder onderzoek	28
	Appendix: Pyrolyse van sorteer residu en vergassing van DKR 350	31

1 Context en scope van deze studie

1.1 Aanleiding en doel studie

In 2017 heeft het KIDV het Kunststofketenonderzoek¹ uitgevoerd, waarin optimalisaties en interventies zijn beschreven om de kunststofverpakkingsketen, zowel qua grondstoffen als economisch verder te sluiten. Het KIDV concludeerde dat ten behoeve van die ketensluiting, naast optimalisatie van mechanische recycling, ook innovaties nodig in verwerkingstechnieken, zoals mogelijk chemische recycling van kunststof verpakkingen.

Het KIDV (ondersteund door Stichting Afvalfonds) is een project gestart om de mogelijkheden voor chemische recycling van kunststof verpakkingen in Nederland in kaart te brengen. De rapportage van dit overkoepelende KIDV project leidt tot aanbevelingen voor relevante (markt)partijen (producenten en importeurs van verpakte producten, recyclers, chemische industrie en overheden) voor acties die nodig zijn om chemische recycling een plaats te geven in het Nederlandse recyclingsysteem. De basis voor deze aanbevelingen, wordt gevormd door twee type analyses:

- Analyse van de klimaatimpact van chemisch recycling
- Analyse van de Productiekosten en brutowinst van chemisch recyclen

Dit rapport betreft een beschrijving van die laatste analyse en het is daarmee onderdeel van het KIDV-project 'Chemische recycling van kunststof verpakkingen: analyse en mogelijkheden voor opschaling'.

De kostenanalyse is kwantitatief en opgebouwd vanuit technische kennis van vier 'voorbeeldprocessen' (of 'proxyprocessen') voor de volgende vier groepen chemische recycling processen: solvolyse, chemolyse, pyrolyse, vergassing.

Het doel van deze kostenanalyses is het geven van inzichten in de productiekosten en brutowinst van deze processen, inclusief de gevoeligheid voor belangrijke parameters.

1.2 Urgentie en noodzaak

In Nederland wordt per jaar 849 kton kunststof afval geproduceerd, zowel kunststof producten als verpakkingen. De EU produceert per jaar 15800 kton kunststof verpakkingsafval. Daarbij groeit de hoeveelheid kunststof verpakkingsafval in de EU elk jaar.² Wereldwijd ziet men daarnaast een continue groei van de kunststofproductie: de hoeveelheid geproduceerd kunststof is vertwintigvoudigd over de afgelopen 60 jaar (van 1.5 Mton/jr naar 322 Mton/jr). Daarnaast wordt er nog een verdubbeling verwacht in de komende 20 jaar.³

De recyclingpercentages van deze kunststoffen is, ten opzichte van glas, metaal en papier, minder ver ontwikkeld. In Nederland wordt 84% van het glas, 94% van het metaal en 85% van het papier en karton gerecycled tegenover 51% van de kunststof verpakkingsafval.⁴ Hierdoor gaat potentiële waarde verloren.

De grote hoeveelheid kunststof producten en verpakkingen die wordt geproduceerd en afgedankt, wordt in toenemende mate als een probleem gezien. Dit blijkt onder andere uit het feit dat de Europese Unie een revisie uitvoert van de Circular Economy Package maatregelen, waarbij een recycling target zal worden aangescherpt tot 55% te bereiken in 2025 (de huidige Packaging Directive 94/62/EC stelt een target van 22.5%). Daarnaast zijn de Europese Circulaire Economie doelstellingen met een speciale 'European

¹ <https://www.kidv.nl/6072/onderzoek-kunststofketen.html>

² <http://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/EDN-20180422-1?inheritRedirect=true>

³ <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics>

⁴ https://www.vmt.nl/Nieuws/Afvalfonds_Verpakkingen_Nederland_een_van_de_koplopers_in_circulaire_economie-171123162238

Strategy for Plastics' aangenomen in januari 2018 en is er in mei 2018 een wetsvoorstel ingediend voor een verbod op 'Single Use Plastics' voor specifieke kunststof producten.

In Nederland is de laatste jaren de aandacht voor klimaat, duurzaam produceren en circulaire economie stevig gegroeid, met een rol voor het reduceren van kunststof afval.

Hiervan getuigen onder andere het programma 'Nederland Circulair in 2050' (2016), de Klimaatagenda (2016), het opstellen van de Sustainable Development Goals (2017), het aannemen van het Klimaatakkoord van Parijs (2017), het samenwerken van 200 Nederlandse bedrijven in de Klimaatcoalitie (2017) en het publiceren van de vijf Transitieagenda's in het kader van het Rijksbreed Programma Circulaire Economie (2018). Één van die transitie-agenda's betreft Kunststoffen. Deze agenda beschrijft onder andere de ambitie om in 2030 in Nederland 250 kton kunststof afval via chemische recycling-routes te verwerken. (2017). Naast deze politieke urgentie, is er ook in de industrie meer belangstelling ontstaan voor het chemisch recyclen van kunststoffen. Dit uit zich vooral in de investeringen in onderzoek en de opzet van pilot fabrieken voor de chemische recycling van kunststof afvalstromen.

Als laatste is er in de publieke opinie een vergroot bewustzijn voor wat 'Het Plastic Afvalprobleem' wordt genoemd. Dit leidt de laatste jaren steeds meer tot burgerinitiatieven en acties.

1.3 Chemische recycling als oplossing

Zoals hiervoor beschreven wordt er per jaar in Nederland 849 kton kunststof afval geproduceerd, waarvan een aanzienlijk deel uit kunststof verpakkingen bestaat en wordt dit afval op het moment niet optimaal verwerkt.

Voor het verwerken van plastic afval zijn momenteel drie mogelijkheden beschikbaar: mechanische recycling, chemische recycling en energie-terugwinning. In andere Europese landen wordt kunststof ook nog veelvuldig gestort; dit is in Nederland verboden / alleen mogelijk met bijzondere ontheffingen.

Op dit moment wordt in Nederland 34% (285 kton/jr) mechanisch gerecycled en het grootste gedeelte (60%, 511 kton/jr) verbrand. De producten van deze verwerkingsmethoden zijn kunststof producten en energie.

Mechanische recycling is een energiezuinige en directe manier om afgedankte kunststoffen weer in te zetten in producten. Er zijn echter twee belangrijke limiteringen aan mechanisch recycling: de fysisch/chemische eigenschappen van secundaire kunststoffen worden minder en de mate van verontreiniging is in veel gevallen zo hoog dat mechanische recycling niet mogelijk is. Daarnaast is het niet mogelijk om alle kunststoffensoorten mechanisch te recyclen. Daarnaast levert mechanische recycling ook enkele problemen op in de praktijk bij bijvoorbeeld de verwerking van plastic folies.

Er is dus behoefte aan methodes, kunststof afvalstromen aankunnen die niet via mechanische recycling verwerkt kunnen worden. De voorkeur hiervoor heeft een methode die zo min mogelijk waarde verloren laat gaan.

Chemische recycling kan hier een uitkomst bieden; er ligt hier een potentieel voor het verwerken van kunststof afval op een hoogwaardig niveau en het verwerken van heterogeen samengestelde afvalstromen, die niet via mechanische recycling kunnen worden verwerkt.

1.4 De scope van deze studie

De studie richt zich op vier verschillende proxyprocessen van de volgende vier groepen chemische recycling:

- Solvolyse: Deze technologie richt zich op relatief zuivere monostromen (maximaal 10% verontreinigingen, of niet-polymeren, zoals additieven) van bijvoorbeeld PP, PVC, PS. Via selectieve oplossing worden de polymeren gescheiden van de niet-polymeren bestanddelen (en dus ook van bijvoorbeeld additieven, geur- & kleurstoffen).

- Chemolyse: Deze technologie richt zich op depolymerisatie (afbreken van de polymeerketens in kleinere stukken, zogenaamde monomeren) van onder andere polyesters, zoals PET, in een oplossing. Het resultaat zijn monomeren of soortgelijke (korte keten) bouwstenen van plastic.
- Pyrolyse: Deze technologie richt zich op het kraken van kunststof fracties in een zuurstofloze omgeving. Veelal worden gemengde fracties van polyolefinen (PE, PP, PS) verwerkt; sommige processen kunnen eveneens PVC verwerken. De producten zijn bestaan grotendeels uit nafta (gelijkend op dat wat uit petrochemische krakers komt), en voor een kleiner deel uit chemische producten als gassen, waarvan sommige gebruikt kunnen worden als bouwsteen voor chemicaliën.
- Vergassing: Deze technologie richt zich op het kraken van gemixte, nu vooral organische stromen, met onder andere kunststoffen in een omgeving met een ondermaat zuurstof. Soms kunnen deze fracties ook PVC bevatten. Het product van deze verwerking is 'synthese gas': een moleculaire bouwsteen voor chemicaliën als bijvoorbeeld methanol.

Deze vier processen zijn procestechnologisch zeer verschillend, leveren verschillende producten met verschillende kwaliteit en marktprijs, hebben verschillende eisen met betrekking tot de samenstelling en kwaliteit van de feedstock, en hebben verschillende inputs van proceschemicaliën en energie.

Men kan de vier recyclingprocessen grofweg opdelen in twee typen:

1. relatief laag-energetische processen, die geschikt zijn voor relatief zuivere feedstock stromen; **solvolyse en chemolyse**
2. relatief hoog-energetische, meer robuustere processen die in staat zijn feedstock stromen met een meer gevarieerde samenstelling te verwerken; **pyrolyse en vergassing**

De hierboven genoemde categorieën van de chemische recyclingprocessen zijn in de literatuur beschreven en enkele processen zijn al in de praktijk toegepast. De beschrijvingen in de literatuur laten een range aan reactiecondities zien: temperatuur en druk en ook precieze feedstock en output vertonen die range. Om de proceskoten in deze studie te kunnen berekenen zijn aannames gedaan en zijn er vier 'proxy-processen' opgesteld: dit zijn processen waarvan op technische grond besloten is dat deze een goede vertegenwoordiging zijn van hun 'categorie'. Als proxyprocessen zijn de hieronderstaande processen genomen; zie verder hoofdstuk 2 voor gedetailleerde omschrijving:

- EPS Creasolv voor solvolyse
- PET Glycolyse voor chemolyse
- Snelle lage temperatuur pyrolyse voor pyrolyse
- Hoge temperatuur vergassing voor vergassing

In deze studie zal naast bovenstaande technieken, verder gebruik worden gemaakt van de feedstock stromen die in het Kunststofketenproject van het KIDV eerder zijn geïdentificeerd als de stromen die moeilijk af te zetten zijn, of te verwerken zijn (met een economische meerwaarde) via, mechanische recycling.

De drie stromen kunststof verpakkingen die in bovengenoemde studie zijn geïdentificeerd zijn DKR-350 (mixfractie), uitval tijdens sorteren en recyclen (sorteer residue) en PET -trays. Deze worden in verder Tabel 1 beschreven.

Tabel 1 Stromen kunststof verpakkingen, onderzocht als feedstock voor de proxyprocessen

<i>DKR-350 (mixfractie)</i>	Dit is de mixfractie die overblijft na het afscheiden van de andere (mono-) kunststofstromen. ⁵ 55% van het recyclen van inzamelde kunststoffen in Nederland vindt plaats in de vorm van het recyclen naar een gemixte kunststofstroom als deze. Voor dit recyclaat gelden lage of soms zelfs negatieve prijzen. ⁶
<i>Sorteer residue</i>	In het huidige systeem valt op verschillende plekken in de recyclingketen materiaal uit. De belangrijkste stromen zijn uitvallen bij sortering van zowel brongescheiden materiaal als materiaal uit nascheiding, en uitvallen bij de uiteindelijke recycling.
<i>PET trays</i>	PET trays zijn een lastig te recyclen PET-monostroom met een relatief hoog gehalte aan vervuilingen (onder andere) in de vorm van vreemde kunststoffen.

De drie gegeven verpakingsstromen zijn ‘gematched’ aan de chemische recyclingprocessen zoals weergegeven in Tabel 1.2.

Voor het beschrijven van een proxyproces voor solvolyse gaan we uit van het Creasolv-proces waarmee de feedstock EPS uit de bouw wordt genomen, aangezien dit een proces is wat in bedrijf is voor deze stroom en op dit moment nog niet wordt toegepast voor verpakingsstromen.

Tabel 1.2 Verwerking van de 3 verpakingsstromen in de aangegeven processen

		Solvolyse	Chemolyse	Pyrolyse	Gasificatie
PET trays	Monostroom	-	X	-	-
DKR-350	Mixstroom	-	-	X	X
Sorteer residue	Mixstroom	-	-	X	X

De samenstelling van de geïdentificeerde stromen bepaalt in grote mate welke eindproducten er uit de processen komen en van welke kwaliteit deze zijn. Hieronder volgt een beschrijving van de samenstelling van de verschillende geïdentificeerde feedstockstromen, zoals is aangenomen in deze studie.

Samenstelling DKR-350

Na sortering van het kunststof verpakingsafval ontstaat onder andere de stroom DKR-350. Deze stroom moet voldoen aan de DKR sorteerspecificaties op basis waarvan de uitvoeringsorganisatie Nedvang monitort en het Afvalfonds Verpakkingen uiteindelijk een vergoeding voor inzamelen en sorteren uitkeert aan gemeenten. In Tabel 1.3 staan de specificaties waaraan de DKR-350 stroom moet voldoen om de inzamelende gemeente voor een vergoeding in aanmerking te laten komen. Voor de calorische waarde van de DKR-350 stroom is 32 000 MJ/ton aangenomen.

⁵ Rapport van CE Delft en KIDV 2016

⁶ “Verkenning chemische recycling - Kansen voor klimaatbeleid en economie” van CE Delft (september 2018)

Tabel 1.3 Samenstelling van de DKR-350 feedstock stroom

Inhoud	Alle kunststoffen die gebruikelijk zijn voor verpakkingsmateriaal (PE, PP, PS, PET)
Vorm	Gehele verpakkingen, geperst in balen, droog
Zuiverheid	>90 wt% in bovengenoemde verpakkingen
Maximale toegestane onzuiverheden	< 10 wt%
Papier, karton	<5 wt%
PET flessen, transparant	<4 wt%
PVC anders dan verpakkingen	<0,5 wt%
Metalen	<2 wt%
Overige materialen	<3 wt%
Vrij van metaal en mineralen objecten >100g	

In de praktijk blijkt de DKR-350 stroom vaak een bredere spreiding van samenstellingen te hebben dan hierboven wordt aangegeven; vooral het vochtgehalte kan hoger zijn dan opgegeven.

Samenstelling uitval tijdens sorteren en recyclen

De stroom sorteert uitval ontstaat door het uitvallen van kunststof verpakkingen bij zowel sorteerdere en verwerkers en zowel bij brongescheiden inzameling (via bijvoorbeeld PMD-inzameling) als bij nascheiding (door bijvoorbeeld OMRIN en Attero uitgevoerd). CE Delft heeft aangenomen dat deze stroom bestaat uit een mix die een afspiegeling vormt van de samenstelling van kunststof afval in Nederland en dus overeenkomt met de percentages, genoemd in Tabel 1.4.

Deze samenstelling is gebaseerd op de rapportage 'Onderzoek Kunststof Afvalstromen in Nederland' uit 2011.^{7 8} Er wordt aangenomen dat de gemiddelde calorische waarde (LHV) van het sorteeresidu 35 000 MJ/ton is

Tabel 1.4 Samenstelling van de sorteert residu feedstock stroom

Kunststofsoort	Percentage	Calorische waarde (LHV) (MJ/ton fractie)	Calorische waarde (LHV) totaal (MJ/ton plastic rejects)
PET	13%	21 850	2841
HDPE	12%	40 000	4800
LDPE	26%	44 000	640
PVC	8%	8 000	11440
PP	18%	40 340	7261
PS	7%	42 750	2992
Other	16%	~30 000	4800
Totaal	100%	-	35000

Het is de vraag of in de praktijk deze aannames kloppen voor de sorteert uitval stroom:

- De stroom kan minder kunststoffen bevatten dan hierboven wordt aangenomen
- De stroom kan meer vervuiling bevatten die verwerking bemoeilijkt

⁷ Berenschot; DPI Value Centre, Agentschap NL, NRK 2011

⁸ <https://www.kidv.nl/6808/verkenning-pet-trays-op-weg-naar-structurele-oplossingen.html?ch=DEF>

Aangezien deze stroom momenteel niet wordt gerecycled of anderszins is onderzocht, is er weinig informatie beschikbaar over de precieze samenstelling. Het is dan ook van belang om de haalbaarheid van de verwerking van deze stroom te checken met partijen die in de praktijk met deze stroom te maken hebben om zo achter de praktische problemen te komen, die recycling zouden kunnen belemmeren.

Samenstelling PET trays

De PET trays stroom is een monostroom bestaande uit verpakkingen van PET *anders dan* flessen en flacons. Voorbeelden zijn schalen, bekers en 'clamshells' (Figuur 1.1).⁹



Figuur 1.1 Non-food clamshell verpakkingen van PET

Deze zijn lastig mechanisch te recycleren vanwege verschillende praktische redenen: De PET trays bestaan niet exclusief uit PET en bevatten meerdere soorten kunststoffen. Daarnaast ontstaan er bij het verkleinen kleine deeltjes, die de apparatuur verstoren.

Voor de stroom PET-trays is aangenomen dat deze gesorteerd is volgens de specificaties opgesteld door het KIDV (zie de KIDV specificatiesheet)¹⁰. Voor het de rest van de PET stroom is aangenomen dat deze bestaat uit PET met een samenstelling als gegeven in de specificaties van de DKR 328-1 norm (Tabel 1.5).

Tabel 1.5 Samenstelling van de PET trays stroom en vergeleken met de DKR 328-1 norm voor flessen

	PET trays ¹¹	PET (DKR 328-1) ¹²
Soort kunststof	PET verpakkingen, (gekleurde of transparante trays incl. labels, folies etc. en transparante PET flessen)	PET verpakkingen, transparant (flessen, vormstabile verpakkingen (geen folies), bekers en schalen)
Vorm	Gehele verpakkingen, geperst in balen, droog	Gehele verpakkingen, geperst in balen, droog
Zuiverheid	>80 wt% PET trays en andere formstabiele PET verpakkingen <20 wt% PET flessen	>90 wt% PET flessen <10 wt% andersoortige PET verpakkingen
Maximale toegestane onzuiverheden	6 wt%	<2 wt%
Andere kunststoffen	*	<2 wt%

⁹ CE Delft rapport, <https://www.ce.nl/publicaties/2052/innovatie-afvalverwerkingstechnieken-doorgelicht>

¹⁰ <https://www.kidv.nl/6405/pet-tray-kunststof-specificaties.pdf?ch=DEF>

¹¹ <https://www.kidv.nl/6405/pet-tray-kunststof-specificaties.pdf?ch=DEF>

¹² <https://www.nedvang.nl/kunststof-verpakkingsafval>

PVC anders dan verpakkingen	<0,1 wt%	<0,1 wt%
Metalen	<0,5 wt%	<0,5 wt%
Overige niet-plastic materialen	<4 wt%	<2 wt%

In de praktijk zal de PET-trays stroom wellicht meer vervuiling bevatten dan in Tabel 1.5 wordt aangenomen.

1.5 Aanpak op hoofdlijnen

In deze studie zijn vier proxyprocessen van elk van de vier groepen chemische recycling, (te weten: solvolyse (proxy: EPS Creasolv), chemolyse (proxy: PET Glycolyse), pyrolyse (proxy: snelle, lage temperatuur pyrolyse) en vergassing (proxy: hoge temperatuur vergassing)), geanalyseerd en gepresenteerd aan de hand van de volgende stappen:

- Het opstellen van een proxyproces voor elk van de vier technieken.
- Het bottom-up berekenen van de kosten (Capital Expenditures oftewel CAPEX en Operational Expenditures oftewel OPEX) en opbrengsten (brutowinst (EBITDA) in €/ton) van de vier proxyprocessen door middel van aannames op basis van literatuur en technische expertise.
- Het top-down testen van de aannames, berekende kosten en gevoeligheidsanalyses door middel van gesprekken met stakeholders in de chemische recycling wereld en met vertegenwoordigers van de klankbordgroep.
- Het inzichtelijk maken van de kaders waarin de processen kunnen opereren door middel van het weergeven van de resultaten van gevoeligheidsanalyses voor de feedstockprijs, de olieprijs, de schaalgrootte van het proces en de proces efficiëntie.

2 Methode en basisaannames

2.1 Methode

Om de Productiekosten analyses te kunnen modelleren van de vier recyclingprocessen, zijn aannames over de processen en feedstockstromen gemaakt, dit omdat beschikbare literatuur voor de individuele processen vaak incompleet of niet-toepasbaar is om tot een goede kostenanalyse binnen de gewenste onzekerheid te komen ($\pm 50\%$).

Daarnaast hebben sommige processen een laag Technology Readiness Level (TRL niveau) en moeten nog steeds aangetoond worden op een operationele schaal, wat de beschikbare gevalideerde informatie zeldzaam maakt.

Een aantal literaire bronnen¹³ en publieke bronnen zijn gebruikt om tot de kosten analyses te komen, welke vervolgens is getest in stakeholder interviews.

Om tot de proceskosten te komen zijn allereerst de Capital Expenditure (de investeringskosten, oftewel CAPEX) en Operational Expenditure (de operationele kosten, oftewel OPEX) berekend.

De kwantitatieve CAPEX en OPEX analyses zijn als volgt uitgevoerd:

- De CAPEX is berekend door een kostenschatting voor elke processtap te maken, gebaseerd op de warmte- en massabalansen en de installatiefactor (welke afhangt van de geschatte complexiteit) van de plant.
- De OPEX is berekend door de warmte- en massabalansen en literatuurfactoren die worden gebruikt in de (petrochemische) industrie. Een klassieke, conservatieve 'textbook' methode is hiervoor gebruikt, waarbij er 4 variabele en 8 vaste OPEX factoren zijn meegenomen. In deze studie wordt hiernaar verwezen als de 'theoretische OPEX'. In stakeholdergesprekken kwam naar voren dat er in de praktijk wordt gewerkt met 2 variabele en 2 vaste OPEX factoren. Ter vergelijking is deze waarde ook berekend en hiernaar wordt verwezen als de 'praktische OPEX'. De factoren zijn weergegeven in de Tabel 2.1. Aangezien de OPEX voor veel processen van grote invloed is gebleken, kan deze praktische analyse worden gezien als een gevoeligheidsanalyse.
- De proces flow schema's (zie 2.2) en de CAPEX en OPEX resultaten zijn weer gecommuniceerd met stakeholders met ervaring met de betreffende processen.
- De gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd door technische variabelen (processchaal, efficiëntie) en economische variabelen (feedstock, prijs, olieprijs) te variëren en te kijken naar de invloed op de CAPEX, OPEX en Productiekosten.

¹³ Voor het opstellen van de proces flow diagrammen en het maken van de proceskostenanalyse zijn de volgende bronnen gebruikt:

Gavin Towler and Ray Sinnott, Chemical Engineering Design (Second Edition), Butterworth-Heinemann, Boston, 2013

Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., West, R. E., Timmerhaus, K., & West, R. (1968). Plant design and economics for chemical engineers (Vol. 4). New York: McGraw-Hill

Turton, Richard, et al. Analysis, synthesis and design of chemical processes. Pearson Education, 2008

Perry, R. H., and D. W. Green. "Perry's Chemical Engineer's Handbook, Seventh Edition (1997)

Tabel 2.1 Overzicht OPEX factoren: de vetgedrukte factoren maken deel uit van de ‘praktische’ OPEX

	Variabele OPEX	Vaste OPEX
<i>Klassieke OPEX</i>	Ruwe materialen, Overige materialen, Onderhoud & reparaties, Operationele benodigdheden	Arbeid & supervisie, Algemene overhead, Eigendomsbelasting, Rente, Landhuur, Laboratoriumkosten, Distributie & verkoop, Onderzoek & ontwikkeling
<i>Praktische OPEX</i>	Alle dik gedrukte factoren zijn genoemd door stakeholders als een deel van hun OPEX berekeningen en omvatten de praktische methode.	

2.2 Algemene aannames

Voor de analyses van de productiekosten zijn de volgende aannames gemaakt en parameters in acht genomen:

- De producten, die worden vervaardigd door de chemische recycling processen zijn van dezelfde kwaliteit als hun ‘virgin’ equivalenten en kunnen dan ook verkocht worden voor dezelfde prijs
- De grootte-inschattingen van de apparatuur is gebaseerd op de calorische waarde van de kunststof feedstock stromen
- Pre-processing; er is geen pre-processing van de geïdentificeerde stromen vóór de verwerking, tenzij anders vermeld
- Post-processing; enkele processen hebben een post-processing stap om de producten ‘on-spec’ te krijgen. Voor vergassing is er een gasopwerking na de recycling.
- De plants hebben een procestijd van 8000 uur per jaar. De overgebleven uren worden besteed aan onderhoud
- De dagelijkse procesperiode is verdeeld in 3 shifts van 8 uur
- De economische levensduur van de plants wordt aangenomen op 20 jaar

Overige aannames zijn samengevat in Tabel 2.2

Tabel 2.2 Overzicht aannames voor de 4 proxyprocessen

	Feedstock samenstelling	Feedstock prijs (€/ton feedstock)	Proces efficiëntie (massa %)	Proces-schaal (kton/jr)	Output samenstelling	Gemiddelde output prijs (€/ton of output)
<i>Solvolyse</i>	EPS	50	95	20	Gerecycled PS	1720
<i>Chemolyse</i>	PET-trays	100	95	20	Gerecycled PET	960
<i>Pyrolyse</i>	DKR-350	-50	90	30	Nafta	500
					Diesel	400
					LPG	800
<i>Pyrolyse</i>	Sorteer residu	-50	90	30	Nafta	500
					Diesel	400
					LPG	800
<i>Vergassing</i>	DKR-350	-50	131	100	Methanol	250
<i>Vergassing</i>	Sorteer residu	-50	143	100	Methanol	250

De 'theoretische' OPEX berekening is als basis genomen en Tabel 2.3 geeft een overzicht van alle tekstboek factoren, die zijn meegenomen. Verder is aangegeven hoe kwantificering geschiedt en welke aannames hierbij gedaan worden.

Tabel 2.3 Kwantificering van de OPEX factoren

	Beschrijving	Kwantificering
Variabele OPEX		
<i>Ruwe materialen</i>	Kosten van de feedstock	De kosten van de feedstock, zoals aangenomen (zie Tabel 2.2)
<i>Productiekosten</i>	Alle materiaalkosten die niet feedstockkosten zijn (oplosmiddelen, katalysatoren, gassen)	Apart berekend op basis van de massa & energie balansen
	Utilities (electriciteit, warmte)	Apart berekend op basis van de massa & energie balansen
<i>Andere variabele kosten</i>	Reparatie en onderhoud	6% van de totale investeringskosten (FCI)*
	Operationele benodigdheden	15% van reparatie en onderhoud
Vaste OPEX		
<i>Financiering</i>	Eigendombelasting	2% van de totale investeringskosten (FCI)*
	Rente	6% van de totale investeringskosten (FCI)*
	Landhuur	2% van de totale investeringskosten (FCI)*
<i>Arbeid</i>	Operationele arbeid	Berekend als 5 operators per shift, 3 shifts per dag met een operator rate van €30/uur
	Supervisie	15% van operationele arbeid
<i>Algemene overhead</i>	Laboratorium kosten	15% van operationele arbeid
	Algemene overhead	5% van operationele arbeid, supervisie en reparatie en onderhoud
	Distributie, marketing & sales	5% van de totale productkosten zonder afschrijving
	Onderzoek & Ontwikkeling	4% van de totale productkosten zonder afschrijving

* FCI = de CAPEX + de initiële middelen, die nodig zijn om de productie te starten (o.a. middelen om feedstock te kopen en personeel aan te nemen voordat de operatie start)

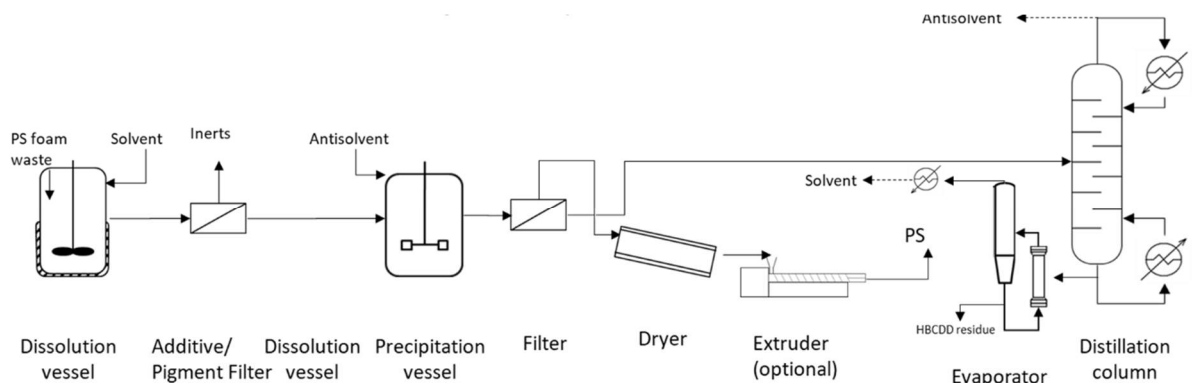
2.3 Aannames van de proxyprocessen

2.3.1 EPS Creasolv

Aannames

- De input is EPS
- De output is gerecycled PS
- Het proces is gemodelleerd op een schaal van 20 kton/jr
- De proces efficiëntie is 95 massa%
- Energie kosten voor elektriciteit: 0.04 EUR/kWh
- Energie kosten voor warmte: 0.02 EUR/kWh
- Filtratie doorzet: 0.25 m3 flow/hr/m2 filter oppervlak
- Droog ratio / droog oppervlak is optimistisch gekozen: 20 kg/hr/m2
- Voor de drogers, zijn blowers en gas heaters opgenomen in de kosten
- Extruders met een 1250 kg/hr doorzet kosten 650 kEUR en hebben 250 kW aan elektriciteit nodig
- De kosten van de reactor omvatten de kosten van: jacketed vessel, agitator en motoraandrijving
- De kosten van oplosmiddelverliezen zijn verwaarloosbaar, aangezien wordt aangenomen dat er 100 ppm oplosmiddelverlies met het product wordt afgevoerd

Proces flow diagram



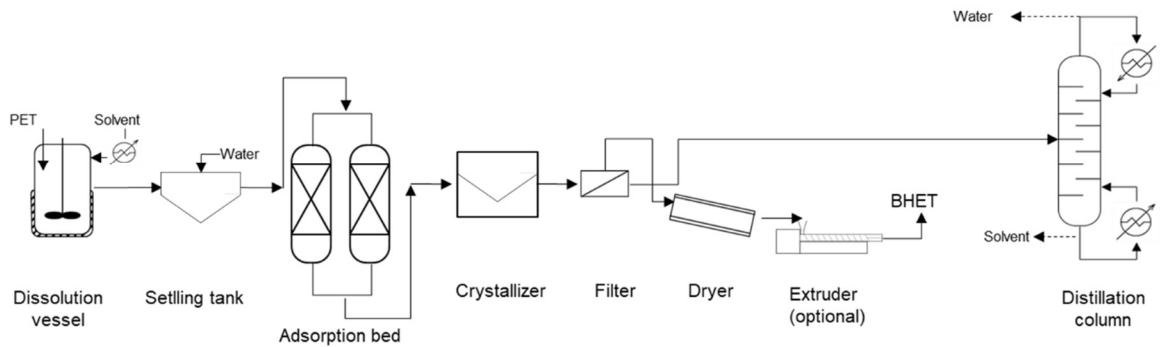
2.3.2 PET Glycolyse

Aannames

- De input is PET-trays
- De output is BHET
- Het proces is gemodelleerd op een schaal van 20 kton/jr
- De proces efficiëntie is 95 massa%
- PET heeft een calorische waarde van 28 MJ/kg
- Energie kosten voor elektriciteit: 0.04 EUR/kWh
- Energie kosten voor warmte: 0.02 EUR/kWh
- Filtratie doorzet: 0.25 m3 flow/hr/m2 filter oppervlak
- Droog ratio / droog oppervlak is optimistisch gekozen: 20 kg/hr/m2
- Voor de drogers, zijn blowers en gas heaters opgenomen in de kosten
- Extruders met een 1250 kg/hr doorzet kosten 650 kEUR en hebben 250 kW aan elektriciteit nodig

- De kosten van de reactor omvatten de kosten van: de reactor, jacketed vessel, agitator en motoraandrijving
- De kosten van oplosmiddelverliezen zijn verwaarloosbaar, aangezien wordt aangenomen dat er 100 ppm solventverlies met het product wordt afgevoerd

Proces flow diagram

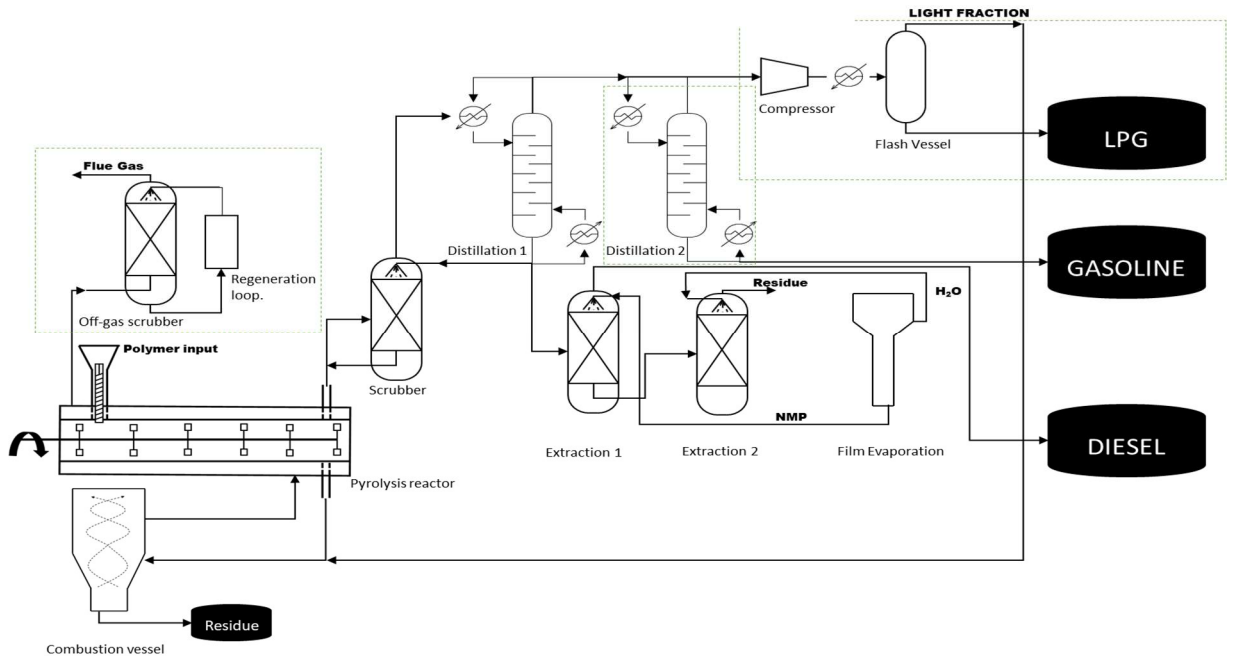


2.3.3 Snelle, lage temperatuur pyrolyse

Aannames

- De input is DKR-350 of sorteer residu (SR)
- De output is diesel, gasoline, off gas en residu
- Het proces is gemodelleerd op een schaal van 30 kton/jrl
- De proces efficiëntie is 90 massa%
- Het input materiaal heeft een calorische waarde van ~ 32 MJ/kg (DKR-350) of ~35 MJ/kg (SR)
- Onzuiverheden (vaste stoffen) zijn ongeveer 1 massa%
- De product verdeling (in massa %) is – diesel grade (70%), gasoline grade (15%), off-gas (10%), residu (5%)
- Het off-gas wordt ingezet voor verwarming (50%); er is geen externe warmte nodig
- De overige 50% van het off-gas wordt gebruikt om LPG te produceren
- Er is geen verlies aan, oplosmiddelen
- Het diesel product zal worden opgewaardeerd naar EN590 door fuel grade crackers
- Gasoline is een schone fractie, geschikt voor ethyleen krakers; zowel voor productie als voor de branders
- 2 MW aan elektriciteit is nodig voor de pre-sortering van de feedstock (NIR-sortering/magneet/non-ferro afscheider, etc.)
- 10% CAPEX (totale CAPEX 28 MEUR) wordt gebruikt voor pre-sortering van de feedstock
- 30 FTE wordt verwacht voor een 100 tpd plant
- 1.05 MJ/kg warmte is benodigd voor de pyrolyse van kunststoffen

Proces flow diagram

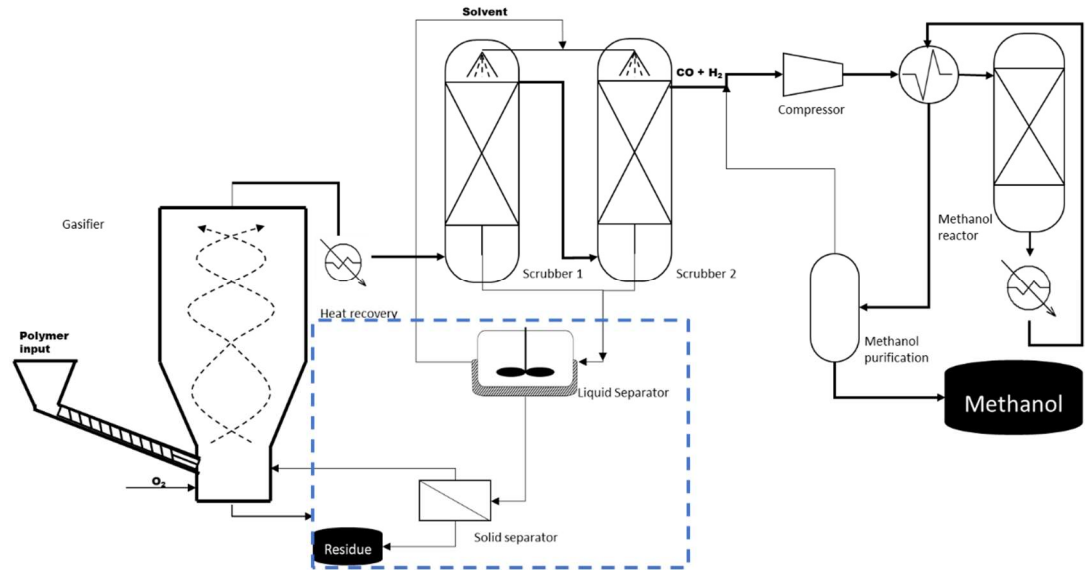


2.3.4 Hoge temperatuur vergassing

Aannames

- De input is DKR-350 of sorteer residu (SR)
- De output is methanol
- Het proces is gemodelleerd op een schaal van 100 kton/jr
- De proces efficiëntie is 131% (DKR-350) of 143% (SR) in massa%
- Het input materiaal heeft een calorische waarde van ~ 32 MJ/kg (DKR-350) of ~35 MJ/kg (SR)
- De hoeveelheid residu/onzuiverheden van de unit is verwaarloosbaar: ~1% van de feedstock
- De op biomassa-gebaseerde vergassingsreactor wordt geschaald op basis van de energie-inhoud van de feedstock
- De stoom input kan worden gegenereerd door warmteterugwinning (en er is een 50% overschot)
- Er is 50 massa% aan waterstofgas nodig van een externe bron
- De verkregen gassen CO₂, NO_x, SO_x worden verwijderd met een zure gas-was unit
- De zuurstofgas input wordt ingevoerd op 30 bar met 0.7 ton/ton kunststof input

Proces flow diagram



2.4 Aannames voor de gevoeligheidsanalyses

De volgende aannames zijn gebruikt voor de gevoeligheidsanalyses:

Gevoeligheid voor de feedstockprijs

- Er is geen relatie tussen de prijs van de feedstock en de energie gebruikt in het proces of andere utilities (benodigde materialen in het proces anders dan feedstock)

Gevoeligheid voor de schaalgrootte

- De CAPEX schaalt met een factor van 0.6 (niet-linear); bijvoorbeeld: als de CAPEX bekend is voor een plant met een schaal van 100 kton/jr wordt de CAPEX-schatting voor een 300 kton/jr-plant gegeven door de berekening: $(200\ 000/100\ 000)^{0.6}$. Dit is een veelgebruikte en geaccepteerde methode in de procestechnologie
- Het variabele deel van de OPEX schaalt lineair met de plantgrootte
- Het vaste deel van de OPEX schaalt niet

Gevoeligheid voor de olieprijs

- Fluctuaties in de olieprijs hebben een recht evenredige invloed op de verkoopprijs van het recyclingproduct
- Het variabele deel van de OPEX verandert met 10% van de olieprijsverandering, aangezien de benodigde utilities ook in prijs zullen stijgen, maar niet in dezelfde grootteorde.
- De energieprijs fluctueert normaliter evenredig met de olieprijs, echter dit is niet meegenomen in deze analyse, aangezien energiecontracten in de chemische industrie vaak voor langere tijd worden afgesloten; er zal dus bij stijging van de olieprijs pas op langere termijn een effect zijn.

Gevoeligheid voor de proces efficiëntie

- De productverdeling blijft gelijk bij verandering in efficiëntie

3 Resultaten: Productiekosten en bruto winst analyse

In lijn met de in hoofdstuk 2 beschreven methode en basisaannames zijn de CAPEX en OPEX waarden voor de vier proxyprocessen met de bijbehorende feedstocks berekend. Daarbij is een economische levensduur van de procesinstallaties van 20 jaar aangenomen. In Tabel 2 zijn de resultaten samengevat.

Tabel 2 Resultaten van de CAPEX en OPEX berekening

Proces	Feedstock samenstelling	Proces schaal (kton/jr)	Totale kosten (M€)	Jaarlijkse kosten (M€/jr)	OPEX (M€/jr)	CAPEX + OPEX (M€/jr)
Solvolyse	EPS	20	26,1	1,3	12,1	13,5
Chemolyse	PET + PET-trays	20	18,7	0,9	11,2	12,2
Pyrolyse	DKR-350	30	25,4	1,3	8,1	9,4
Pyrolyse	Sorteer residue	30	26,7	3,9	8,9	41,2
Gasificatie	DKR-350	100	77,6	1,3	37,3	10,2
Gasificatie	Sorteer residue	100	81,9	4,1	40,8	44,9

In de hierna volgende figuren worden de productiekosten en de EBIDTA¹⁴ weergegeven. De productiekosten en EBIDTA zijn tot stand gekomen volgens de formules in Tabel 3. Een legenda van de hierop volgende grafieken is weergegeven in Tabel 4.

Tabel 3 Formules voor het berekenen van de productiekosten en EBIDTA

Productiekosten	CAPEX (€/ton) + OPEX (€/ton)
EBIDTA	Productiekosten – opbrengst eindproduct (€/ton)

Tabel 4 Legenda bij de hierop volgende grafieken van productiekosten en brutowinst

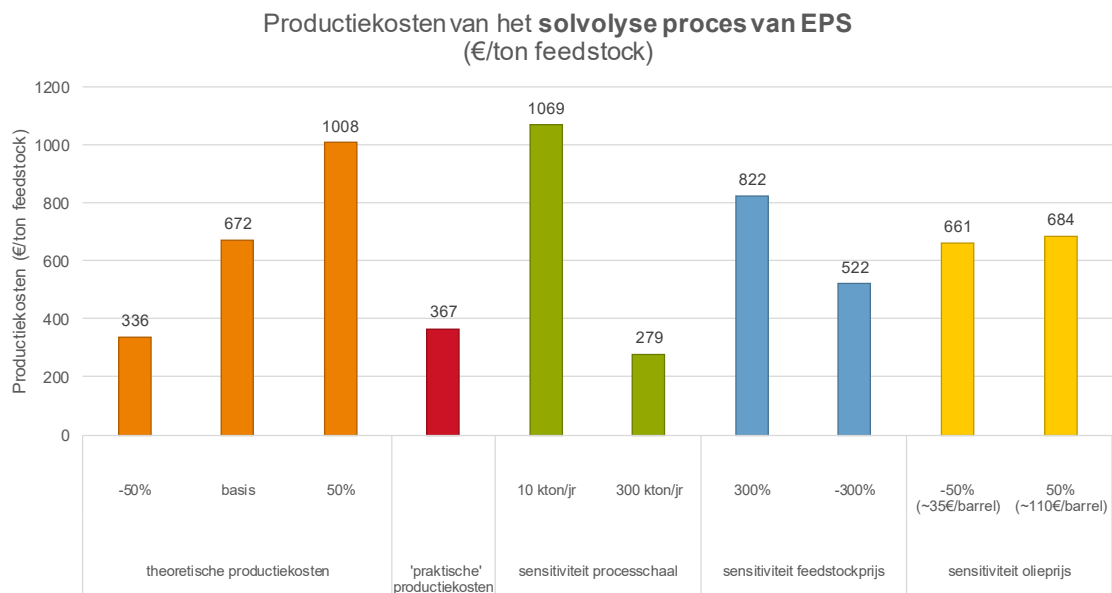
Oranje kolommen	De berekende productiekosten en brutowinst volgend uit de hierboven beschreven basisaannames op basis van de <i>theoretische OPEX</i> (de methode waarin alle OPEX factoren worden meegenomen). (Waarde waarop de andere berekeningen gebaseerd zijn.) Daarnaast twee kolommen voor de -50% en +50% onzekerheidsmarge.
Rode kolommen	De berekende productiekosten en brutowinst volgend uit de hierboven beschreven basisaannames op basis van de <i>praktische OPEX</i> (de methode waarin enkele OPEX factoren worden meegenomen).

¹⁴ EBIDTA staat voor earnings before interest, taxes, depreciation and amortization. EBIDTA is een maatstaf die de operationele brutowinsten van een onderneming weergeeft

Groene kolommen	De gevoeligheid van de berekende productiekosten en brutowinst op basis van de gegevens van de basisberekening (middelste oranje kolom) voor de schaalgrootte van het proces. De weergegeven waarden zijn voor schaalgroottes van 10 kton/jr en 300 kton/jr (de analyse is gedaan over meerdere waarden). ¹⁵
Blauwe kolommen	De gevoeligheid van de berekende productiekosten en brutowinst op basis van de gegevens van de basisberekening (middelste oranje kolom) voor de feedstockprijzen. De weergegeven waarden zijn voor een variatie in feedstockprijzen van -300% tot 300% (de analyse is gedaan over meerdere waarden).
Gele kolommen	De gevoeligheid van de berekende productiekosten en brutowinst op basis van de gegevens van de basisberekening (middelste oranje kolom) voor een verandering in olieprijs. De weergegeven waarden zijn voor een variatie in olieprijs van -50% tot 50% (de analyse is gedaan over meerdere waarden).

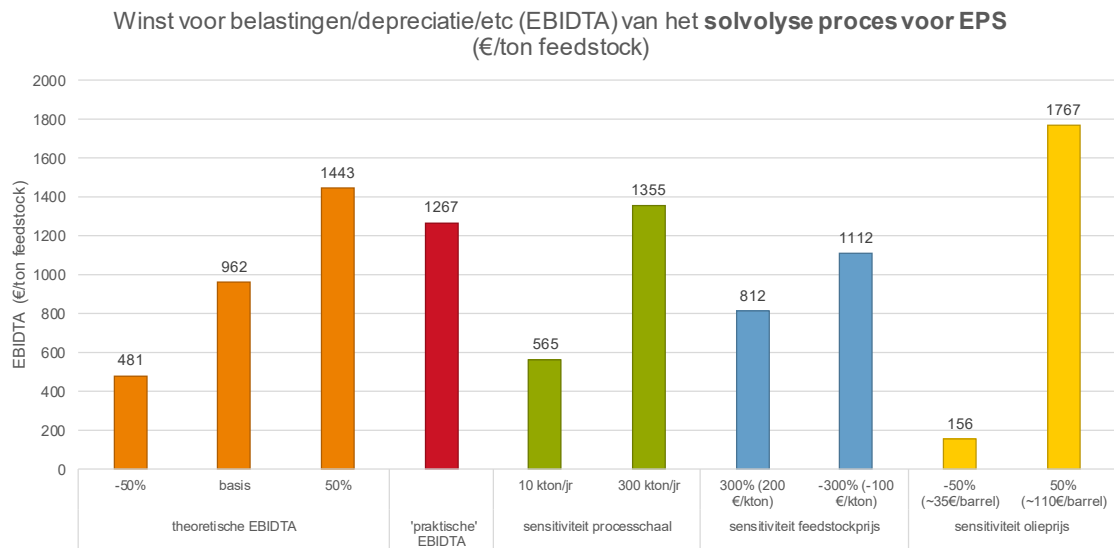
3.1 Productiekosten en brutowinst van het proxyproces voor solvolyse: EPS Creasolv

In de Figuren 3.1 en 3.2 worden de productiekosten c.q. de bruto winst van Creasolv, voor de verwerking van EPS met broomhoudende vlamvertragers uit de bouw, als proxyproces voor solvolyse getoond.



Figuur 3.1 Productiekosten van het proxyproces voor solvolyse: EPS Creasolv

¹⁵ Voor solvolyse en chemolyse is een schaalgrootte voor het proces van 300 kton/jr, onwaarschijnlijk. Voor pyrolyse



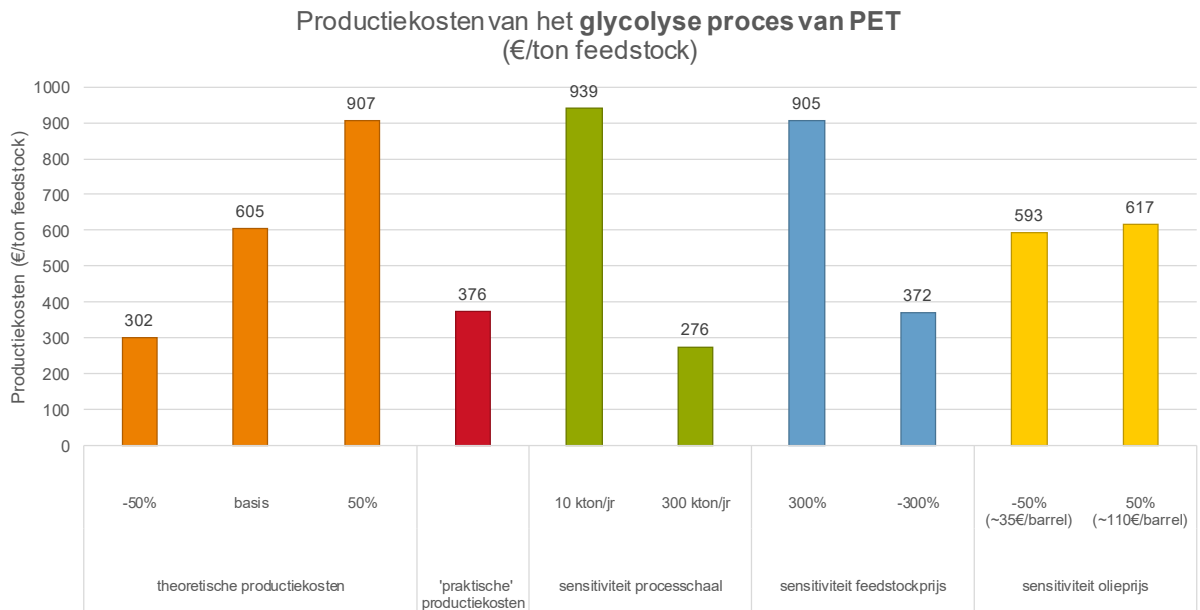
Figuur 3.2 Brutowinst van het proxyproces voor solvolyse: EPS Creasolv

Hierna volgen de meest opmerkelijke resultaten, gerelateerd aan de waarden getoond in de Figuren 3.1 en 3.2:

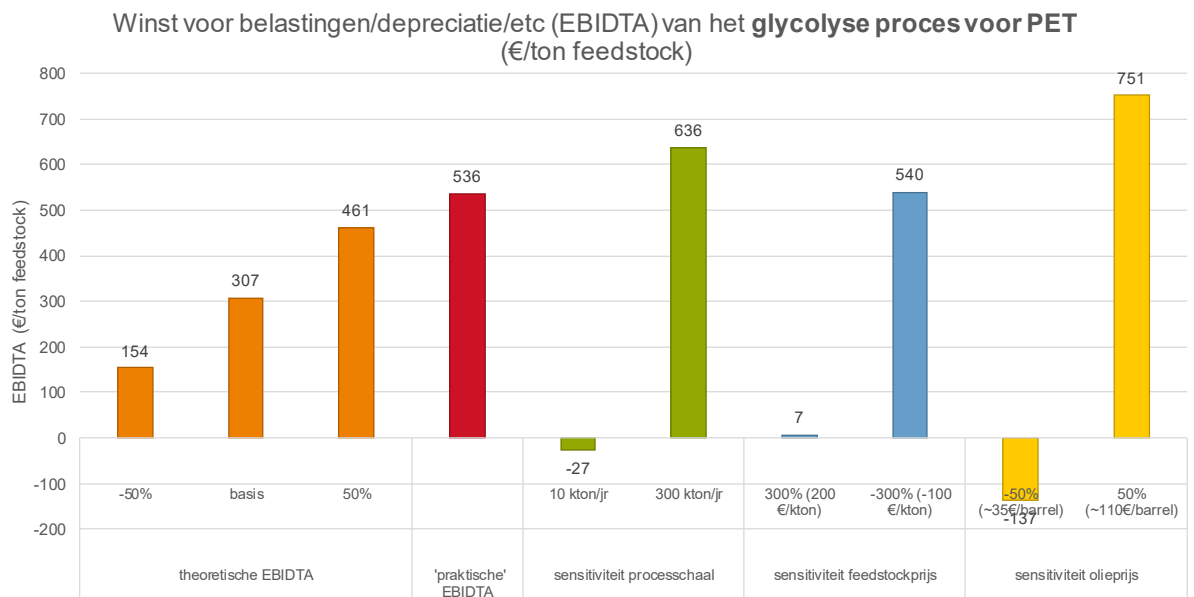
- De OPEX heeft grootste bijdrage in de overall productiekosten (zie Tabel 2).
- De OPEX wordt gedomineerd door het energieverbruik van destillatie en droging en dus indirect door de feedstock/solvent verhouding.
- De deelprocessen droger, reactoren en extruder (optioneel) bepalen in belangrijke mate de grootte van de CAPEX.
- De relatief hoge waarde van PS geeft ruimte voor de toepassing van dit proces met relatief hogere productiekosten.
- Een schone EPS feedstock geeft verlaging van de productiekosten.
- Een lage feedstockprijs geeft verlaging van de productiekosten
- Schaalvergroting heeft eveneens een duidelijke kostenverlagende invloed.
- Een lage olieprijs heeft een kostenverhogende invloed.
- Een lage feedstockprijs, schaalvergroting en een hoge olieprijs (met daarbij een hoge prijs voor polystyreen) geven een duidelijke opwaartse beweging naar een hogere winst.
- Daarentegen kunnen een hoge feedstockprijs, operatie op een kleine schaal en een lage olieprijs leiden tot een operationeel verlies

3.2 Productiekosten en brutowinst van het proxyproces voor chemolyse: PET Glycolyse

In de Figuren 3.3 en 3.4 worden de productiekosten c.q. de bruto winst van PET glycolyse, voor de verwerking van PET trays, als proxyproces voor chemolyse getoond.



Figuur 3.3 Productiekosten van het proxyproces voor chemolyse: PET Glycolyse



Figuur 3.4 Brutowinst van het proxyproces voor chemolyse: PET Glycolyse

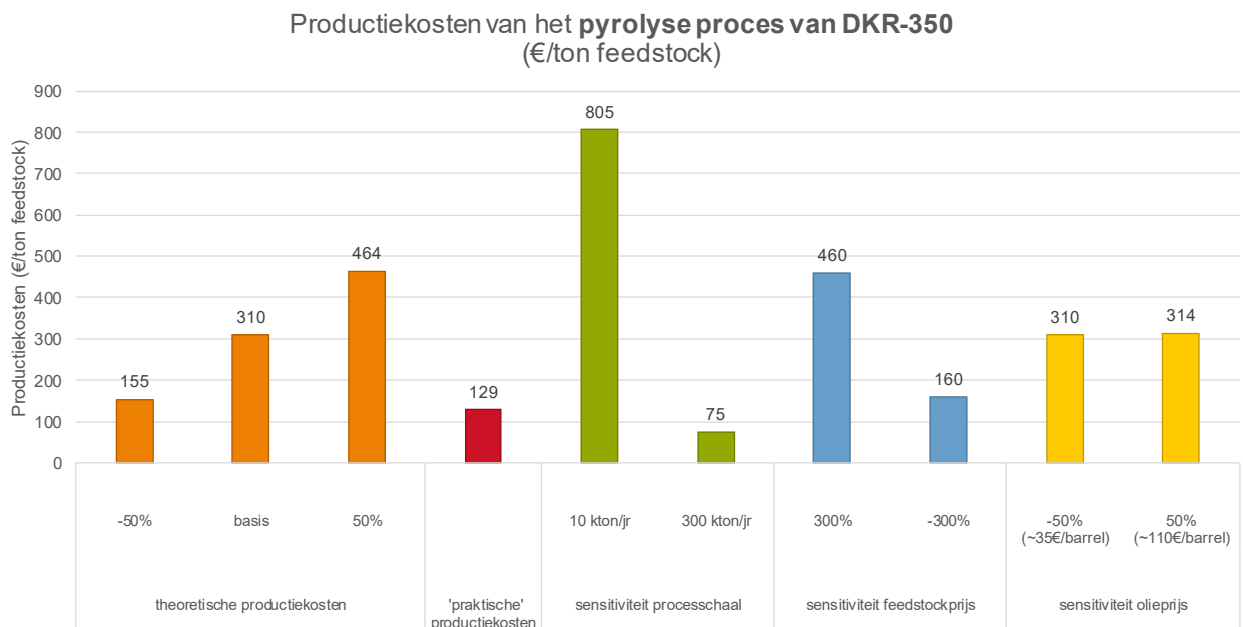
Hierna volgen de meest opmerkelijke resultaten, gerelateerd aan de waarden getoond in de Figuren 3.3 en 3.4:

- De OPEX heeft de grootste bijdrage in de overall kosten (zie Tabel 2).
- De OPEX wordt gedomineerd door het energieverbruik van destillatie en droging en dus indirect door de feedstock/solvent verhouding.
- De droger, reactoren en solventscheiding hebben een belangrijke bijdrage in de grootte van de CAPEX.
- De relatief hoge waarde van de monomeren geeft ruimte voor de toepassing van dit proces met relatief hogere productiekosten.
- Een schone PET feedstock geeft verlaging van de productiekosten.

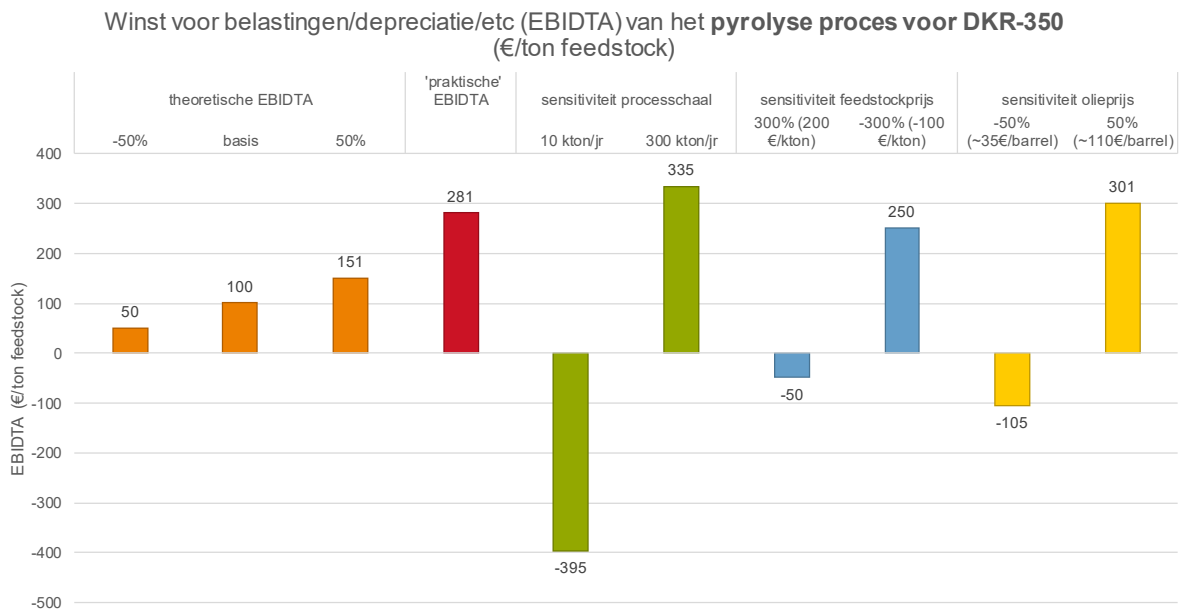
- Een lage feedstockprijs geeft verlaging van de productiekosten.
- Schaalvergroting heeft eveneens een duidelijke kostenverlagende invloed.
- Een lage olieprijs heeft een kostenverhogende invloed.
- Een lage feedstockprijs, schaalvergroting en een hoge olieprijs (met daarbij een hoge prijs voor de monnieren) geven een duidelijke opwaartse beweging naar een hogere winst.
- Daarentegen leiden een hoge feedstockprijs, operatie op een kleine schaal en een lage olieprijs tot operationeel verlies.

3.3 Productiekosten en brutowinst van het proxyproces voor pyrolyse: snelle, lage temperatuur pyrolyse

In de Figuren 3.5 en 3.6 worden de productiekosten c.q. de bruto winst van snelle lage temperatuur pyrolyse, voor de verwerking van DKR 350, als proxy proces voor pyrolyse getoond. Deze berekeningen zijn ook gedaan voor sorteer residu. De resultaten hiervan zijn erg gelijkend op de resultaten voor de pyrolysering van DKR 350 en daarom hier niet weergegeven. De productiekosten en brutowinst voor de pyrolyse van sorteer residue zijn weergegeven in de appendix.



Figuur 3.5 Productiekosten van het proxyproces voor pyrolyse: snelle, lage temperatuur pyrolyse



Figuur 3.6 Brutowinst van het proxyproces voor pyrolyse: snelle, lage temperatuur pyrolyse

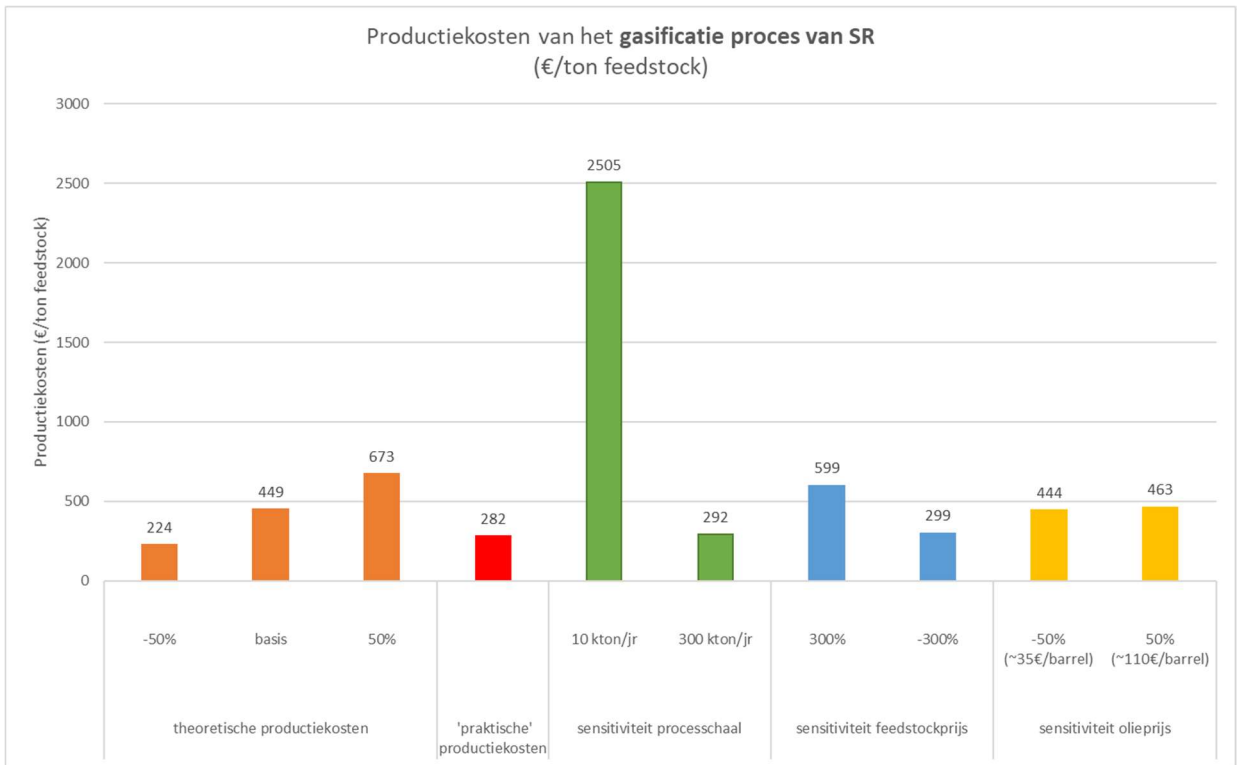
Hierna volgen de meest opmerkelijke resultaten, gerelateerd aan de waarden getoond in de Figuren 3.5 en 3.6:

- De OPEX heeft grootste bijdrage in de overall kosten (zie Tabel 2).
- De hoeveelheid energie, nodig voor de preprocessing van de feedstock, heeft een belangrijke invloed op de OPEX; verbranding van het off-gas levert de benodigde procesenergie voor de pyrolyse.
- De reactor met scrubber hebben een belangrijke invloed op de hoogte van de CAPEX.
- Een lage feedstockprijs betekent veelal meer verontreiniging in de feedstock, waardoor voorbehandeling nodig wordt. Vooraf verwijdering van PVC en PET is wenselijk.
- De schaalgrootte heeft een duidelijke invloed op een winst- of een verliesituatie.
- De feedstockprijs en de olieprijs hebben ook een duidelijke invloed op het niveau van de kosten.
- Bij een goed gekozen schaalgrootte, een lage feedstockprijs en een hoge olieprijs is er sprake van een reële winstsituatie.
- Bij een te kleine schaal, een hoge feedstockprijs en een lage olieprijs leidt het proces tot operationeel verlies.

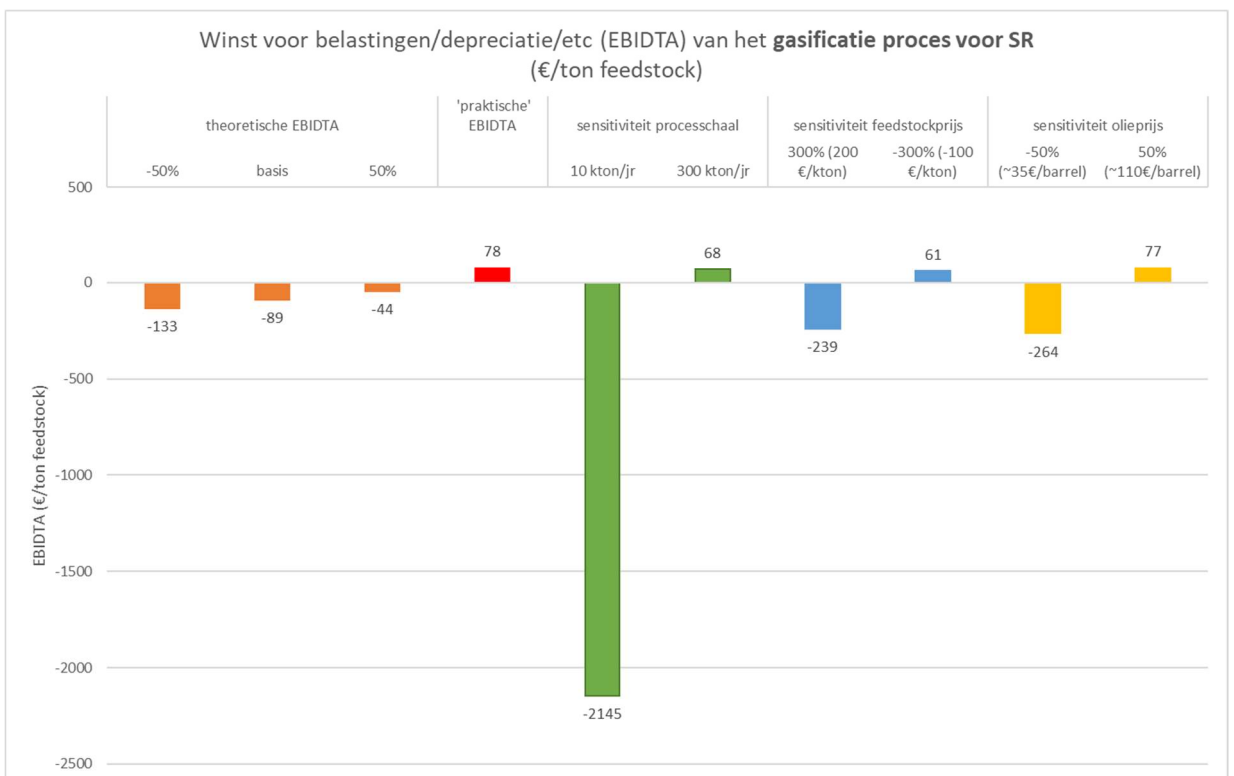
3.4 Productiekosten en brutowinst van het proxyproces voor vergassing: hoge temperatuur vergassing

In de Figuren 3.7 en 3.8 worden de productiekosten c.q. de bruto winst van hoge temperatuur vergassing, voor de verwerking van het sorteer residu, als proxyproces voor vergassing getoond.

Deze berekeningen zijn ook gedaan voor DKR 350. De resultaten hiervan zijn erg gelijkend op de resultaten voor de vergassing van sorteer residu en daarom hier niet weergegeven. De productiekosten en brutowinst voor de vergassing van DKR 350 zijn weergegeven in de appendix.



Figuur 3.7 Productiekosten van het proxyproces hoge temperatuur vergassing voor vergassing



Figuur 3.8 Brutowinst van het proxyproces hoge temperatuur vergassing voor vergassing

Hierna volgen de meest opmerkelijke resultaten, gerelateerd aan de waarden getoond in de Figuren 3.7 en 3.8:

- De OPEX heeft de grootste bijdrage in de overall kosten (zie Tabel 2).
- Voor vergassing naar syngas, en daarna de reactie naar methanol, zijn industriële gassen nodig. Kosten van zuurstof en waterstof hebben een belangrijke bijdrage aan de OPEX.
- De vergassingsreactor en de compressor hebben een belangrijke invloed op de hoogte van de CAPEX.
- Een lage feedstockprijs betekent veelal meer verontreiniging in de voeding, waardoor voorbehandeling mogelijkwerwijs nodig wordt.
- De schaalgrootte heeft een dominante invloed op de winst- of verliessituatie.
- De feedstockprijs en de olieprijs hebben ook een reële invloed op het niveau van de kosten.
- Bij een goed gekozen schaalgrootte, een lage feedstockprijs en een hoge olieprijs kan er zelfs sprake zijn van een winstsituatie.
- Bij een te kleine schaal, een hoge feedstockprijs en een lage olieprijs leidt het proces tot operationeel verlies..

4 Conclusies en mogelijkheden voor verder onderzoek

4.1 Algemene conclusies

In hoofdstuk 3 zijn de conclusies gepresenteerd voor de afzonderlijke proxyprocessen. Daarnaast kunnen er enkele algemene conclusies worden getrokken aan de hand van deze studie:

- De vier beschouwde processen zijn onderling niet te vergelijken; ze behandelen verschillende feedstockstromen, zijn gericht op de productie van verschillende producten voor verschillende toepassingen, via verschillende procesroutes. Men zou wel twee groepen kunnen onderscheiden; de groep solvolyse/chemolyse van specifieke kunststofstromen, waarbij afscheiding van polymeren en monomeren het doel is, en de groep pyrolyse/vergassing van mengsels kunststoffen, waarbij de productie van chemicaliën en brandstoffen aan de orde is.
- Kosten en brutowinst van de processen zijn sterk afhankelijk van de schaalgrootte van het proces, kosten van de feedstock en prijs van de producten (in relatie met de olieprijs). Deze variabelen bepalen het uiteindelijke beeld van kosten en winst gaan bepalen.
- De aanvoer van een stabiele hoeveelheid feedstock met een gegarandeerde kwaliteit is van wezenlijk belang voor de introductie van chemische recycling faciliteiten. Additionele voorzieningen (pre-processing) zijn eventueel nodig om continu aan die gevraagde kwaliteit te kunnen voldoen; de kosten hiervoor zijn niet meegenomen in de analyses omdat het gaat om een systemische verandering in het inzamel- & sorteersysteem.
- In Nederland zijn de randvoorwaarden voor de implementatie van de beoogde processen aanwezig; zo bezit Nederland al een infrastructuur voor afvalmanagement, sorteer- en scheidingsfaciliteiten, kunststof-producerende en chemische industrie bestaat en een aanbod van benodigde industriële grondstoffen (energie, gassen en warmte) en basischemicaliën. Deze inpassingsmogelijkheden kunnen benut worden en hebben een gunstig effect op de kosten van de processen.

4.2 Mogelijkheden voor verder onderzoek

In deze studie is een eerste aanzet gemaakt naar een heldere, objectieve kennisbasis met betrekking tot de proceskosten en mogelijke brutowinsten van vier chemische recyclingprocessen.

Dit is echter een eerste stap op weg naar het doel om inzichtelijk te krijgen welke chemische recyclingtechnieken voor welke feedstockstromen optimaal in het Nederlandse landschap kunnen worden ingezet, nu en in de toekomst.

Om van deze eerste kosteninschatting te komen naar een volledig beeld welke technieken waar en op welke manier kunnen worden ingepast en gestimuleerd, worden de volgende vervolgonderzoeken voorgesteld:

- Het opstellen van **scenario's** om de invloed van technieken ten opzichte van elkaar te analyseren
- Het maken van **volledige business cases** om de hier gerapporteerde brutowinsten in een volledig financieel kader te kunnen plaatsen
- Het in kaart brengen van de **feedstockstromen** en hun kwaliteit en gewenste inzameling en pre-processing om chemische recycling mogelijk te maken
- Het analyseren van **technisch meest impactvol onderzoek** met als doel hieruit af te leiden welke technisch onderzoek de recyclingefficiëntie het meest gaat beïnvloeden
- Het onderzoeken van het **effect van beleidsinstrumenten** om tot impactvolle en effectieve beleidsondersteuning voor (chemische) recycling te komen
- Het **stimuleren van het stakeholderveld** om tot gedragen keteninnovatie te komen

Hieronder een uitgebreider beschrijving van de mogelijke vervolgonderzoeken.

Scenario's voor Nederland

- In dit onderzoek zijn vier specifieke (proxy) processen voor vier specifieke kunststofstromen onderzocht. Om in bredere zin te onderzoeken welke end-of-life kunststof(fracties) uit verschillende sectoren met welke processen (technieken) verwerkt kunnen gaan worden nu én in de toekomst verdient het de aanbeveling om dit via scenario's te onderzoeken. Mogelijke scenario's kunnen verhelderen wat de impact is van: een verminderd afval-aanbod, een afnemende import van buitenlandse afvalstromen, een verbetering in mechanische recycling technieken of het verschijnen van een nieuwe soort (bio-)plastic. Door verschillende scenario's te vergelijken zal duidelijk worden welke (combinatie van) technieken economisch en milieukundig het meest aantrekkelijk zijn en welke impact hun inzet gaat hebben.

Volledige business cases

- Voor meer uitontwikkelde processen, dus met TRL niveau 8-9, die een praktijkintroduktie op industriële schaal krijgen, is het essentieel om een meer complete business case analyse te maken. Resultaten van Net Present Value en terugverdient tijden geven dan een vollediger plaatje van de economische haalbaarheid. Daarnaast geeft een volledige business case meer inzicht in hoe een techniek beleidsmatig ondersteund zou kunnen worden. Onder andere de kostenconsequenties van voorbehandeling van de afvalstromen vóór chemische verwerking kan hierin worden meegenomen om een sluitende business case voor een groter gedeelte van de keten te beschouwen.

Feedstockstromen: beschikbaarheid en kwaliteit

- Hetgeen voor mechanische recycling geldt, geldt in principe ook voor chemische recycling: de feedstock stromen dienen aan een bepaalde kwaliteit, c.q. specificatie te voldoen. Voor de vier categorieën van technieken verdient het aanbeveling om daar meer inzicht in te krijgen en hoe daaraan voldaan kan worden door verbetering/verandering van inzameling, sortering, opwerking en door mogelijk combinaties daarvan: de beschikbaarheid van feedstock is namelijk essentieel voor het realiseren van een chemische recycling keten.

Inzetten op technologisch onderzoek

- Voor de vier categorieën zijn vier proxyprocessen doorgerekend. Het betreft proxyprocessen, gesimuleerd op basis van TNO expertise en openbare informatie. Uit deze berekening kwam naar voren dat er enkele technische ontwikkelingen mogelijk zijn om de bestaande processen voor de bepaalde stromen te optimaliseren. Daarnaast lijkt het wenselijk om sommige chemische recyclingprocessen (bv. solvolyse) in te kunnen zetten op andere kunststofstromen dan tegenwoordig wordt gedaan. Dit heeft een technische ontwikkeling nodig. Het verdient de aanbeveling om te onderzoeken welke technologie ontwikkeling in Nederland, in aansluiting op wat er al in de landen om ons heen gebeurt, gestimuleerd dient te worden; zowel vanuit het gezichtspunt van economische kansen als vanuit het gezichtspunt van de versterking van de Nederlandse kennispositie in Europa. Daarnaast kan er, naast chemische recycling, gekeken worden naar de invloed van onderzoek op gerelateerde gebieden als bv. design-for-recycling (wat de plastic afvalstroom zal doen afnemen) en nieuwe materialen (bv. bioplastics).

Beleidsinstrumenten

- De implementatie van die chemische recyclingtechnieken, die een breed draagvlak hebben, zou ondersteund kunnen worden met de inzet van beleidsinstrumenten. Te onderzoeken valt welke het meest wenselijk zijn (bijvoorbeeld juridisch, subsidies, belastingtechnisch) en het meest effectief zijn (wat zal verschillen tussen de verschillende technieken). Gevolgen van een

beleidsbeslissing als ‘welke vorm van chemische recycling valt onder *recycling* en welke onder *verwerking*’, is essentieel om te onderzoeken.

Verbreding draagvlak en stakeholderinterventie

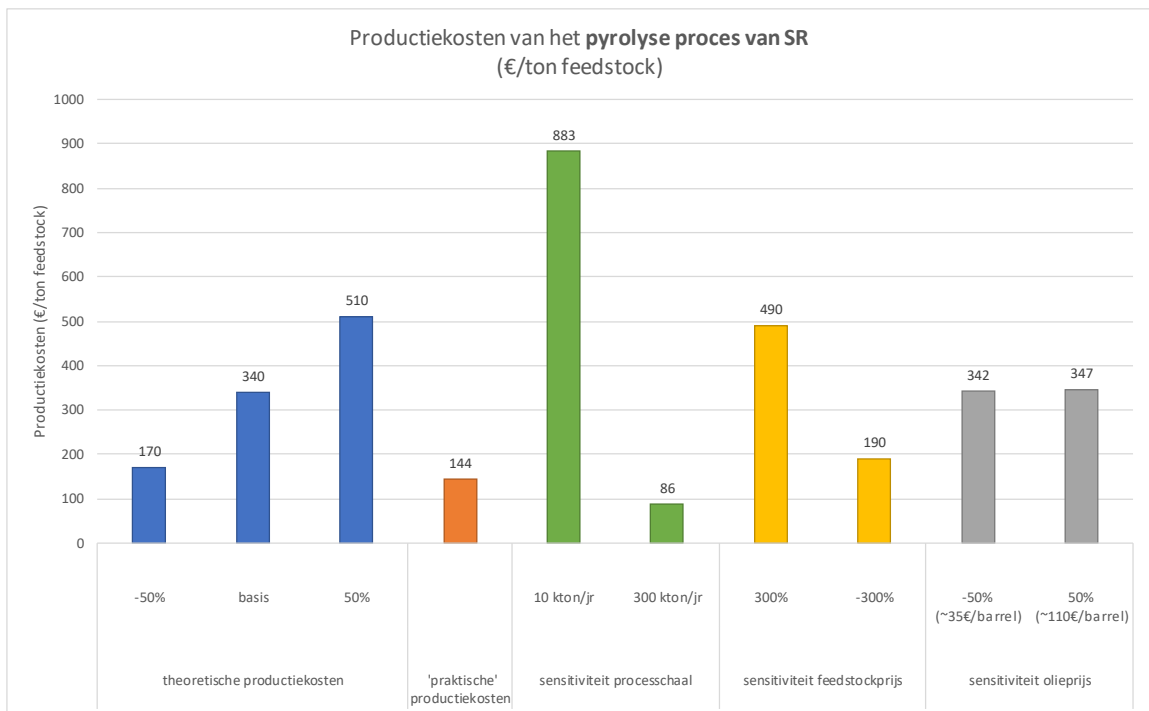
- Het verdient de aanbeveling om de resultaten van deze studie, met de KIDV roadmap, verder te distribueren en de betrokken stakeholders verder te enthousiasmeren. Te onderzoeken valt op welke wijze dit het meeste resultaat gaat geven en hoe de partijen in het veld, inclusief de overheden, optimaal hierbij betrokken kunnen worden.

Appendix: Pyrolyse van sorteer residu en vergassing van DKR 350

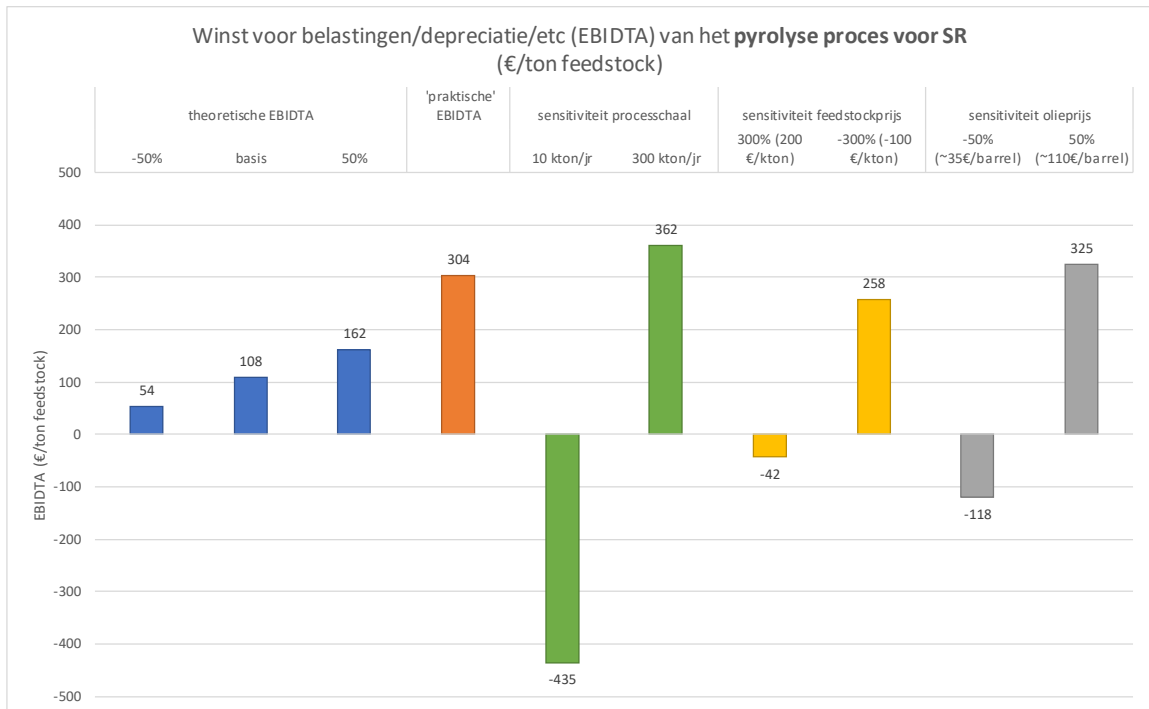
In Hoofdstuk 3 staan de productiekosten en brutowinsten weergegeven van de pyrolyse van DKR 350 en de vergassing van sorteer residu.

In deze studie zijn echter ook de productiekosten en brutowinsten van de pyrolyse van sorteer residu en vergassing van DKR 350 berekend. Deze zijn zeer gelijkend op de voorgenoemde berekeningen en zijn daarom niet afzonderlijk in de hoofdreportage opgenomen, maar in deze appendix bijgesloten.

In de Figuren A.1 en A.2 worden de productiekosten c.q. de bruto winst van snelle lage temperatuur pyrolyse, voor de verwerking van sorteer residu, als proxy proces voor pyrolyse getoond.



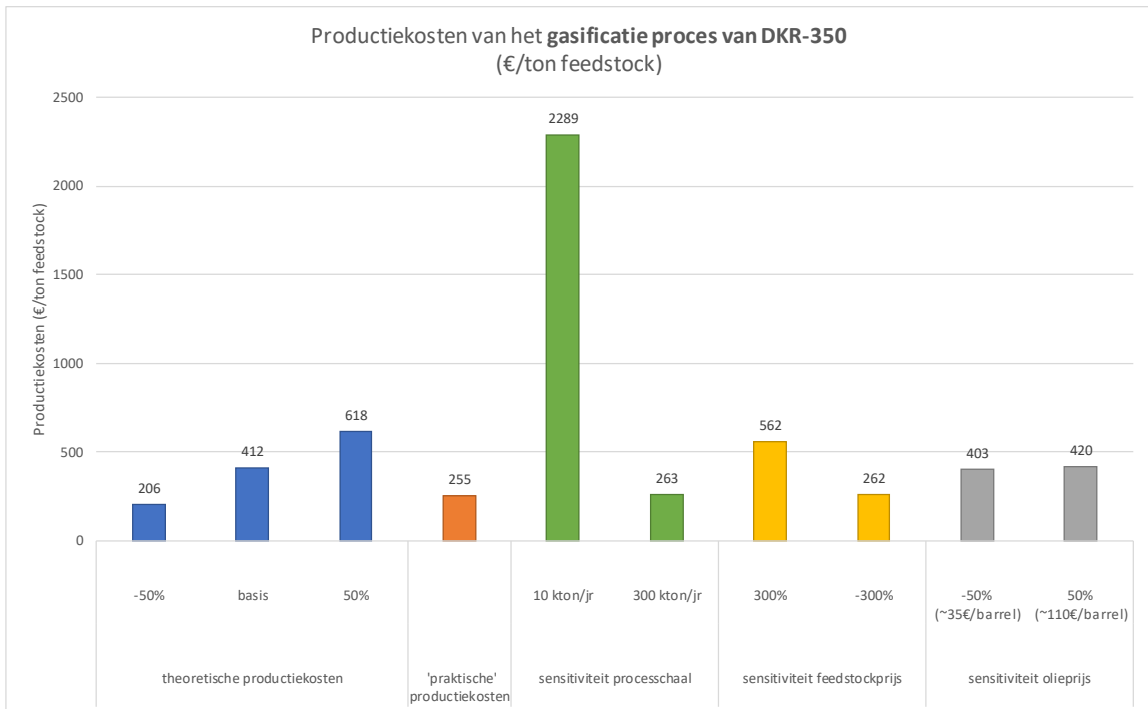
Figuur A.1 Productiekosten van het proxyproces voor pyrolyse: snelle lage temperatuur pyrolyse



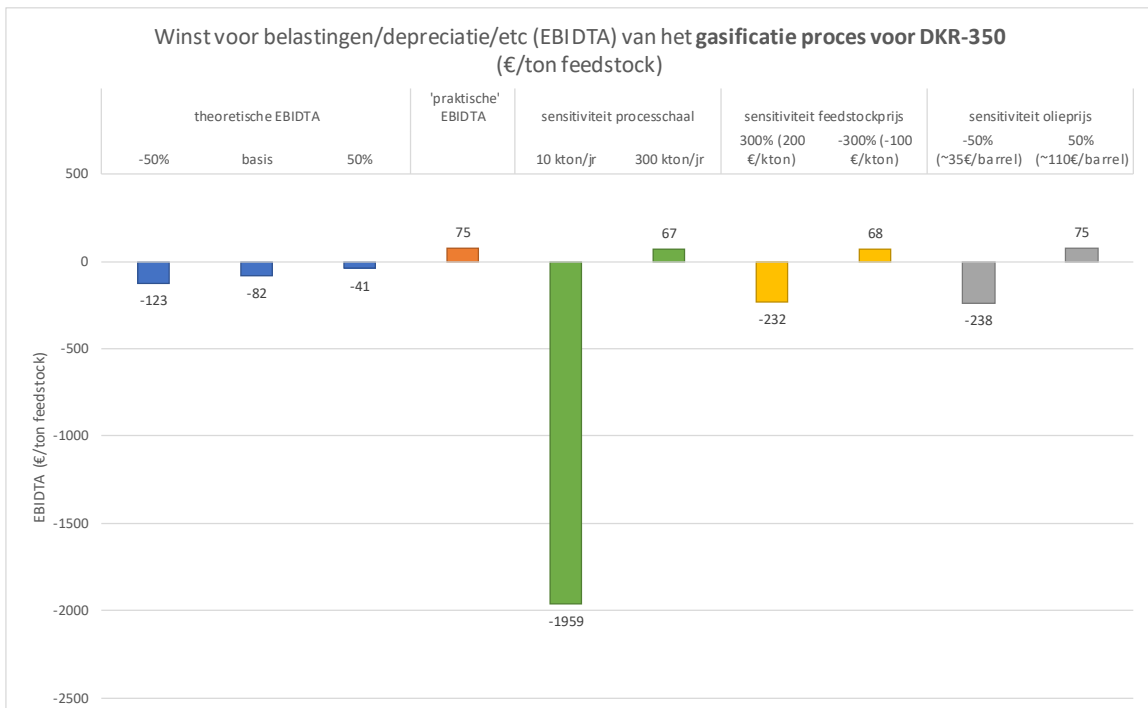
Figuur A.2 Brutowinst van het proxyproces voor pyrolyse: snelle lage temperatuur pyrolyse

De opmerkelijke resultaten, getoond in de Figuren A,1 en A.2 lijken sterk op die getoond in de Figuren 3.5 en 3.6 voor de beschrijving van de snelle, lage temperatuur pyrolyse van DKR 350; zie hoofdstuk 3 voor de beschrijving van de opmerkelijke resultaten.

In de Figuren A.3 en A.4 worden de productiekosten c.q. de bruto winst van hoge temperatuur vergassing, voor de verwerking van DKR 350, als proxy proces voor vergassing getoond.



Figuur A.3 Productiekosten van het proxyproces voor vergassing: hoge temperatuur vergassing



Figuur A.4 Brutowinst van het proxyproces voor vergassing: hoge temperatuur vergassing

De opmerkelijke resultaten, getoond in de Figuren A,3 en A.4 lijken sterk op die getoond in de Figuren 3.7 en 3.8 voor de beschrijving van de hoge temperatuur vergassing van sorteer residu; zie hoofdstuk 3 voor de beschrijving van de opmerkelijke resultaten.