

# Eindrapport Grondstof voor Kunststof – Sluit de Keten

**Beryl Circular B.V.**

**A.M. van Schuurmanlaan 11**

**3818 LS Amersfoort**

**Oktober 2022**

# 1 Table of Contents

2	Gegevens project	6
3	Samenvatting	7
4	Inleiding	8
5	Doelstelling	8
6	Werkwijze	9
6.1	Beschrijving deelnemers en essentiële uitbestedingsrelaties	9
6.1.1	Beryl Circular, Nederland (pervoerder)	9
6.1.2	Plant One Rotterdam (POR), Nederland	9
6.1.3	Universiteit van Pannonia, Hongarije	9
6.1.4	Dordtech, Nederland	9
6.1.5	ProBiomass, Nederland	10
6.1.6	Cramwinckel Consultancy, Nederland	10
7	Economisch perspectief en marktpotentie	11
7.1	De Markt - Aanbodzijde van afval plastics	11
7.1.1	Europa	11
7.1.2	Evolutie van het storten, terugwinnen en recyclen van afval plastic in de EU	12
7.2	Afval van elektrische en elektronische apparatuur	12
7.1.	De Markt - Vraagzijde voor afval plastics.	13
7.1.1.	Mechanische recycling	13
7.1.2.	Chemische recycling	14
7.1.3.	Zuivere mono-plastic afvalstromen	14
7.1.4.	Gemengde plastic afvalstromen	15
7.2.	De markt voor D-HALO	16
7.2.1	Bestaande Chemische Recycling Installaties	17
7.2.2	Aangekondigde projecten in chemische recycling	18
7.2.3	De Industriële wax markt	18
7.2.4	Producttypen	18
7.2.5	Marktanalyse Samenvatting:	19
7.2.6	De wereldwijde markt voor wax:	20
7.2.7	De Industriële wax markt 2021 - 2022	20
7.3	Literatuurlijst Economisch perspectief	22
8	Innovatie en technologie	23
8.1	Inleiding	23
8.2	Bepalen optimale parameters en invloed feedstock	23

## OPENBARE VERSIE

8.2.1	Inleiding proces parameters	23
8.2.2	Samenstelling van afval stromen	23
8.2.3	Kunststof in fijn huishoudelijk restafval	24
8.3	Effect van gemengde plastics in het pyrolyseproces	24
8.3.1	Polyethyleen	24
8.3.2	Polypropyleen	25
8.3.3	Polystyreen	25
8.3.4	Polyethyleen terephthalaat	25
8.3.5	Polyvinyl chloride	26
8.3.6	Effect van verontreinigingen in de proces stromen	26
8.3.7	Pyrolyse olie	27
8.3.8	Conclusies plastic voeding	27
8.3.9	Samenstelling acceptabele voeding voor het pyrolyse proces	27
8.4	Pyrolyse parameters	28
8.4.1	Druk	28
8.4.2	Temperatuur	29
8.4.3	Verontreinigingen	29
8.5	Pyrolyse van gemengde plastics met PVC als verontreiniging	29
8.5.1	Partiële pyrolyse bij lage temperaturen	29
8.5.2	Gebruik van chloor bindende sorbents	29
8.5.3	D-HALO proces	29
8.5.4	B-WAX proces	30
8.6	Doelstelling product specificatie	30
8.6.1	D-HALO	30
8.6.2	B-WAX	30
8.7	Literatuur optimale parameters en invloed feedstock	31
8.8	Integratie van D-HALO en een pyrolyse reactor	31
8.8.1	Integratie van pyrolyse unit in een proces	31
8.8.2	Corrosieve verontreinigingen	31
8.8.3	Partiële verwijdering tijdens de pyrolyse	32
8.8.4	Verwijdering voor de pyrolyse	32
8.8.5	Product afvoer uit de pyrolyse reactor	32
8.8.6	Coke afvoer uit de pyrolyse reactor	32
8.8.7	NGE pyrolyse reactor	33
8.8.8	Aansluiting van D-HALO op de pyrolyse reactor	33
8.8.9	D-HALO voorbehandeling voor de pyrolyse stap	34
8.8.10	Behandeling van de product stromen met zoutzuur	34

## OPENBARE VERSIE

8.8.11	Materiaal selectie bestendig tegen corrosie	34
8.8.12	Katalytische pyrolyse	34
8.8.13	Separatie van vaste stoffen en product stromen	35
8.8.14	D-HALO nabehandeling na de pyrolyse stap	35
8.8.15	Pyrolyse olie nabehandeling tot product op commerciële schaal	36
8.9	D-HALO Pilot plant	36
8.9.1	Pakket 1: Zoutzuur absorptie	36
8.9.2	Pakket 2: Hydrotreating	36
8.9.3	Integratie van de pilot plant	36
8.10	Productie van wax uit afvalplastic	37
8.10.1	Wax productie	37
8.10.2	Polyethyleen voeding	37
8.10.3	Reactie parameters	37
8.10.4	Materiaal selectie	37
8.10.5	Katalysator	37
8.10.6	Product opslag	38
8.10.7	Hydrotreating	38
9	Resultaten	39
9.1	CO <sub>2</sub> Berekeningen	39
9.1.1	Samenvatting	39
9.1.2	CO <sub>2</sub> balans voor plastic pyrolyse	39
9.1.3	Afval hiërarchie	40
9.1.4	Van aardolie naar plastic naar afval naar pyrolyse olie	40
9.2	Berekening CO <sub>2</sub> emissies	41
9.2.1	Plastic als bron voor (pyrolyse) olie	41
9.2.2	Vuilnisbelt	41
9.2.3	Afvalverbranding voor stadsverwarming vs. elektriciteitsproductie	42
9.2.4	Recycling tot pyrolyse olie	43
9.2.5	Recycling tot wax	43
9.3	D-HALO Pilot installatie budget studie	43
9.3.1	CAPEX van de D-HALO pilot plant (500 ton per jaar)	44
9.3.2	CAPEX pyrolyse unit	45
9.3.3	CAPEX automatisering	45
9.3.4	CAPEX verbranding van de afgassen	45
9.3.5	CAPEX analyse apparatuur voor D-HALO	46
9.3.6	CAPEX voor de D-HALO pilot plant in totaal	46
9.3.7	Commerciële operatie	46

## OPENBARE VERSIE

9.3.8	Hydrotreating	46
9.3.9	OPEX per jaar voor de D-HALO pilot plant	47
9.4	Patent – Freedom To Operate voor D-HALO	47
9.5	D-Halo + Pyrolyse, Commerciële installatie budget studie	47
9.6	WAX, commerciële installatie budget studie	48
9.7	ORC en energie voor levering van warmte aan een warmtenet	49
9.8	Hydrotreater	50
9.9	Patent – Freedom To Operate voor B-WAX	50
9.10	Literatuurlijst Resultaten	50
10	Spin-off en vervolgactiviteiten, beschrijving vervolgproject en verdere implementatie.	52
10.1	Spin off	52
10.1.1	D-HALO	52
10.1.2	B-WAX	53
10.2	Vervolgstappen	53
10.3	Opschalingsmogelijkheden en het herhaalpotentieel	55
10.3.1	D-HALO	55
10.3.2	WAX	55
11	Conclusie en aanbevelingen	57
11.1	D-HALO	57
11.2	WAX	57
11.3	CO <sub>2</sub> Reductie	58
12	Uitvoering van het project	59
12.1	Problemen tijdens het project en oplossingen	59
12.2	Wijzigingen ten opzichte van het projectplan	59
12.3	Wijze van kennisverspreiding (Kennisoeverdracht en intellectueel eigendom)	59

## 2 Gegevens project

**Projectnaam:**

Grondstof voor Kunststof – Sluit de keten

Referentienummer: TESN121023

Kenmerk: TESN121DF72U

Penvoerder: Beryl Circular BV

Projectperiode: 9 mei 2021 tot en met 8 mei 2022

**Contactpersoon:**

Beryl Circular BV

t.a.v. Han Beckmann

Postbus 154

3800 AD Amersfoort

Additionele exemplaren zijn op aanvraag verkrijgbaar en worden kosteloos als pdf verzonden.

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie, uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

### 3 Samenvatting

In Europa wordt steeds meer afvalplastic gerecycled. Mechanische recycling wordt veel toegepast, echter deze methoden zijn ontoereikend omdat ze niet om kunnen gaan met gemixte afvalstromen. Chemische recycling (pyrolyse) kan een gemixte stroom afval wel verwerken. Ondanks de grotere inzetbaarheid van pyrolyse, worden ook hier veel afvalstromen afgekeurd voor verwerking, door de aanwezigheid van contaminaties zoals broom en chloor.

In dit project heeft de aanvrager de eerste stappen gezet voor de ontwikkeling van een technologie die de inzetbaarheid van pyrolyse om afvalplastic te verwerken sterk zal vergroten: het Beryl D-HALO proces (hierna: "D-HALO"). De processtappen voor en na het pyrolyse proces zijn beschreven waardoor contaminaties kunnen worden weggevangen. Hierdoor kan pyrolyse voor brede en gevarieerde afvalstromen worden ingezet en zijn eindproducten van hoogwaardige kwaliteit mogelijk.

Het D-HALO proces bestaat uit 2 stappen, waarbij corrosieve contaminaties worden verwijderd en eindproducten van het pyrolyseproces tot hoogwaardige aromaten kunnen worden omgezet. Door deze innovatie is het mogelijk de plastic keten te sluiten, circulariteit van plasticafval te bevorderen en een substantiële reductie van CO<sub>2</sub> uitstoot te realiseren. In dit project is ingegaan op de 1<sup>e</sup> stap, het verwijderen van corrosieve contaminaties alsmede ook het beschrijven van een niche, het produceren van industriële wassen (hierna Wax om verwarring met het wassen van afvalplastics te vermijden). De productie van wax\* uit afvalplastic wordt beschreven omdat er parallellen gebleken zijn met het proces van verwijderen van contaminaties en pyrolyse.

De doelstelling van dit project is het aantonen van de technische en economische haalbaarheid van de bouw van een pilotinstallatie van ca. 500 ton afvalplastics per jaar om het D-HALO proces op grotere schaal te kunnen testen en demonstreren. De verschillende haalbaarheidsvragen zijn beantwoord door middel van deskresearch, marktonderzoek, risicoanalyses en calculaties, wat als onderbouwing voor de besluitvorming kan dienen. Ook is de technische en economische haalbaarheid van de bouw van een commerciële installatie voor verwerking van ca. 15.000 ton afvalplastics per jaar naar Wax onderzocht.

Binnen dit project is de technische haalbaarheid van het verwijderen van contaminaties middels D-HALO in kaart gebracht door allereerst te bepalen wat de optimale parameters en invloeden zijn van de potentiële feedstock, op basis van de uitgevoerde experimenten. Met deze kennis is een ontwerp gemaakt die de integratie van het D-HALO proces met de pyrolyse installatie mogelijk maakt. Er is bepaald wat de benodigde engineersstappen zijn die in het pilotproject uitgevoerd zullen moeten worden.

Tevens is voor zowel D-HALO als het wax proces een theoretische massabalans en CO<sub>2</sub> uitstoot berekening gemaakt om de exacte verwachte milieuwinst in kaart te brengen. Ook is de economische haalbaarheid in kaart gebracht door markt- en patentonderzoek uit te voeren, en risico's, kosten en baten te bepalen van het vervolgtraject. Dit heeft geleid tot de voorwaarden voor een Go/noGo bepaling van het vervolg voor de D-HALO pilotinstallatie. Voor Wax is bepaald wat de vereisten zijn om tot de bouw van een commerciële installatie over te gaan.

Het resultaat van deze studie is een onderbouwde basis voor een beslissing om een D-HALO pilot traject te starten voor de verdere uitwerking van de technologie resp. de vervolgstappen voor de bouw van een commerciële installatie voor verwerking van ca. 15.000 ton afvalplastics per jaar naar wax. De slaagkansen van de projecten zijn in kaart gebracht. Er is een duidelijk plan gemaakt van de benodigde stappen die ondernomen moeten worden voor de realisatie van een pilotinstallatie.

## OPENBARE VERSIE

\* In dit rapport worden voor het chemische product “was” de Engelse woorden “wax” en “waxen” (meervoud) gebruikt, om verwarring met het werkwoord “was” en het wassen van afvalplastics te vermijden. Het woord B-Wax wordt gebruikt in relatie tot de door Beryl ontwikkelde technologie.

## 4 Inleiding

In Europa wordt steeds meer plastic gerecycled. Mechanische recycling wordt veel toegepast, echter deze methoden zijn ontoereikend omdat ze niet om kunnen gaan met gemixte afvalstromen. Chemische recycling (pyrolyse) kan een gemixte stroom afval wel verwerken. Ondanks de grotere inzetbaarheid van pyrolyse, worden ook hier veel afvalstromen afgekeurd voor verwerking, door de aanwezigheid van contaminaties zoals broom en chloor.

In dit project heeft de aanvrager de eerste stappen gezet voor de ontwikkeling van een technologie die de inzetbaarheid van pyrolyse sterk zal vergroten: het Beryl D-HALO proces (hierna: “D-HALO”). De processtappen voor en na het pyrolyse proces zijn beschreven waardoor contaminaties kunnen worden weggevangen. Hierdoor kan pyrolyse voor brede en gevarieerde afvalstromen worden ingezet en zijn eindproducten van hoogwaardige kwaliteit mogelijk.

Het D-HALO proces bestaat uit 2 stappen, waarbij corrosieve contaminaties worden verwijderd en eindproducten van het pyrolyseproces tot hoogwaardige aromaten worden omgezet. Door deze innovatie is het mogelijk de plastic keten te sluiten, circulariteit van plasticafval te bevorderen en een substantiële reductie van CO<sub>2</sub> uitstoot te realiseren. In dit project is ingegaan op de 1e stap, het verwijderen van corrosieve contaminaties alsmede ook het beschrijven van een niche, het produceren van industriële wassen.

De productie van wax uit afvalplastics wordt in dit rapport beschreven omdat er parallellen gebleken zijn met het proces van verwijderen van contaminaties en pyrolyse.

## 5 Doelstelling

De doelstelling van dit project is het aantonen van de technische en economische haalbaarheid van de bouw van een pilotinstallatie van ca. 500 ton afvalplastics per jaar om het D-HALO proces op grotere schaal te kunnen testen en demonstreren. De verschillende haalbaarheidsvragen zijn beantwoord door middel van deskresearch, marktonderzoek, risicoanalyses en calculaties, wat als onderbouwing voor de besluitvorming kan dienen.

Daarnaast is de technische en economische haalbaarheid van de bouw van een commerciële installatie voor verwerking van ca. 15.000 ton afvalplastics per jaar naar wax onderzocht.



## 6 Werkwijze

### 6.1 Beschrijving deelnemers en essentiële uitbestedingsrelaties

Beryl werkt samen met een aantal derde partijen om de expertise bijeen te brengen voor uitvoering van het project. Er zijn een aantal uitbestedingsrelaties gewijzigd. De werkzaamheden verricht door de Universiteit van Pannonia in samenwerking met Beryl, en aanvullend de werkzaamheden door POR maakten dat er geen werkzaamheden verricht hoefden te worden door NGE, Eurosupport en CPERI. Toegevoegd zijn de uitbestedingen aan Dordtech en ProBiomass.

#### 6.1.1 Beryl Circular, Nederland (penvoerder)

Beryl Circular B.V. (hierna Beryl) heeft als voornaamste missie bij te dragen aan een gezonde planeet voor iedereen, door CO<sub>2</sub> uitstoot te verminderen, het gebruik van fossiele grondstoffen terug te dringen en afvalstorten en verbranding te voorkomen. Zij doen dit door op economisch verantwoorde wijze recycleprocessen ter verwerking van plasticafval te verbeteren en gebruikers en producenten van plastics een circulair alternatief te bieden. Het unieke recycle proces dat zij hebben ontwikkeld zorgt voor efficiënte en volledige recycling van een gemixte stroom plastic, bestaande uit 'rejects' van mechanische recycling processen, en levert 'native-like' bouwstoffen op voor nieuwe producten. Beryl heeft als penvoerder zowel marktstudies verricht als ook de technologie uitwerking en calculaties voor haar rekening genomen.

#### 6.1.2 Plant One Rotterdam (POR), Nederland

Plant One Rotterdam B.V. (hierna POR) is opgericht in 2015 als innovatiecentrum met als corebusiness het realiseren en exploiteren van een omgeving waar bedrijven en onderzoekinstellingen hun innovatieve ideeën met betrekking tot duurzame technologie kunnen ontwikkelen en testen. POR biedt multinationals, startups en onderzoeksinstituten toegang tot alle testfaciliteiten die zij nodig hebben om hun innovatieve ideeën op het gebied van duurzame procestechnologie te ontwikkelen, testen en opschalen. Duurzaamheid staat hierbij centraal. POR heeft in dit project de uitwerking Het is voorzien dat POR ook de locatie biedt voor uitvoering van de pilot plant.

#### 6.1.3 Universiteit van Pannonia, Hongarije

De universiteit van Pannonia is een universiteit in Veszprém, Hongarije, opgericht in 1949 en ontplooit research en R&D programma's. Binnen de sectoren Chemical Engineering and Processes en Chemistry bestaat vanuit de historie veel kennis op het gebied van petrochemie. Dr. Laszlo Leveles is verbonden aan de universiteit en heeft op persoonlijke titel onderzoek verricht voor het project.

#### 6.1.4 Dordtech, Nederland

Dordtech wordt gezien als voorloper in de markt van renewable energy technologies, en biedt een volledige oplossing van gas treatment tot en met de daadwerkelijke koppeling met het net. Dordtech heeft een uitwerking gemaakt van de aanwending van de gasstromen die vrijkomen bij het D-HALO en/of het wax proces.

OPENBARE VERSIE

### 6.1.5 ProBiomass, Nederland

ProBiomass is adviseur op het gebied van duurzaamheid, en heeft een nadere uitwerking gemaakt van de emissies uit het wax proces. Ook de nuttige aanwending van de vrijkomende energie ten behoeve van de levering van warmte aan derden is onderzocht.

### 6.1.6 Cramwinckel Consultancy, Nederland

Cramwinckel Consultancy ondersteunt bedrijven bij het formuleren en uitvoeren van hun intellectueel eigendomsstrategie en in het bijzonder de octrooi-strategie. Cramwinckel heeft een studie naar de "freedom to operate" verricht met betrekking tot de processen voor D-HALO en wax.

## 7 Economisch perspectief en marktpotentie

### 7.1 De Markt - Aanbodzijde van afval plastics

Afval Plastics - Wereldwijd: Voor 1980 waren recycling en verbranding van plastic verwaarloosbaar. Tussen 1955 en 2015 werd er 8,3 miljard ton plastic geproduceerd, daarvan is 6,3 miljard ton plastic afval. 9% werd gerecycled, 12% verbrand en het overige werd gestort als afval.

In 2015 bedroeg de wereldproductie van primair plastic 407 miljoen ton (Mt), terwijl ongeveer driekwart (302 Mt) als plastic afval eindigde - 12 procent van al het vast stedelijk afval.

De plasticproductie en consumptie vertonen een jaarlijks stijgende trend waarbij tegen het jaar 2050 naar verwachting ongeveer 12 miljard ton plastic zich zal hebben opgehoopt op stortplaatsen en in het milieu. Met name markten in Amerika en Azië zijn nog onderontwikkeld. Europa heeft hier een duidelijke gidsrol.

Het recyclingpercentage van kunststofafval is nog onvoldoende en concurreert met verbranding en storten (Hestin et al., 2017; Simon et al., 2018). In 2020 werd 35% van het plastic na consumptie afval dat in Europa werd ingezameld en gerecycled, 42% of 12.5 Mt van al het plastic afval werd verbrand, en 24% naar stortplaatsen gestuurd (Plastics Europe, 2021). Omdat kunststofproducten een verschillende levensduur hebben (variërend van 1 tot 50 jaar of meer), komen de cijfers voor het inzamelen van plastic afval na consumptie niet overeen met de vraag- of consumptiecijfers.

Hoewel de recyclingpercentages groeien en het storten van afval afneemt, zijn ze nog steeds belangrijk in het ontdoen van kunststofafval. Verbranding is nog steeds een gangbare praktijk bij het ontdoen van plastic afval. Bijvoorbeeld, in ECHA – Chemische recycling van afval in de circulaire economie RPA EUROPA | 17, stegen in 2006-2018 de recyclingpercentages van kunststoffen met 100%, terwijl de verbranding met 77% steeg.

De aanbodzijde van de markt is de Nederlandse, Europese en mondiale afvalscheiding- en (kunststof) recycling branche. Deze branche ervaart in haar (mechanische) scheidingsprocessen dat steeds meer gemengde plastic afvalstromen (post-consumer recyclelaat) ontstaan (soms tot 50% van het aangeboden afval plastic) waarvoor geen vraag is in de markt, in tegenstelling tot de meer zuivere kunststof reststromen (PE, PP, PET, PS), die (vaak afhankelijk van de lokale situatie) kunnen worden teruggevoerd naar de kunststofverwerkende industrie. Een aanzienlijk deel van de op de markt gebrachte kunststof verpakkingen komt nog in het restafval terecht en wordt verbrand met energierugwinning. Een klein deel komt in het zwerfafval terecht. (ref: REBEL, Partners voor Innovation, 04-09-2018).

#### 7.1.1 Europa

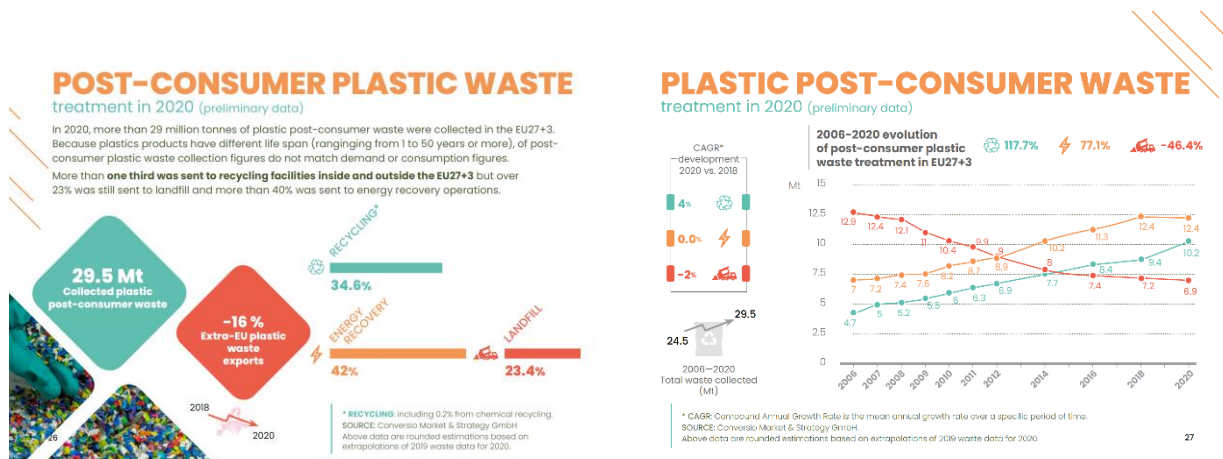
De Europese Unie heeft al strenge wetgeving aangenomen, zoals volledige stortverboden, uitgebreide producentenverantwoordelijkheid en specifieke recyclingdoelstellingen. In januari 2018 heeft de Europese Commissie een visie voor Europa's nieuwe kunststofeconomie aangekondigd, als onderdeel van de nieuwe reeks maatregelen die zijn aangekondigd in het Circular Economy Package 2018 (Europese Unie, April 30, 2018).<sup>4</sup> De Europese strategie voor kunststoffen schetst de volgende toezeggingen die moeten worden uitgevoerd:

- alle plastic verpakkingen die op de Europese markt worden gebruikt, moeten tegen 2030 kostenconcurrerend worden hergebruikt of gerecycled;
- meer dan de helft van het plastic afval dat in Europa wordt geproduceerd, moet in 2030 worden gerecycled;
- de sorteer- en recyclingcapaciteit van kunststof moet in 2030 verviervoudigd zijn ten opzichte van 2015; het realiseren van verbanden in de industrie, resulterend in 200.000 nieuwe banen in Europa;

## OPENBARE VERSIE

- tegen 2025 moet ongeveer 10 Mt per jaar gerecycled plastic worden gebruikt voor nieuwe producten.

In Europa werd in 2020 29,5 Mt plastic afval na consumptie ingezameld. Als we specifiek naar verpakkingen kijken, werd 41% van het plastic verpakkingafval (16,7 Mt) gerecycled. In het afgelopen decennium zijn de recycling- en energierugwinningspercentages gestaag toegenomen, waardoor het storten van afval aanzienlijk is afgenomen. Deze evolutie is weergegeven in onderstaande grafiek.



### 7.1.2 Evolutie van het storten, terugwinnen en recycelen van afval plastic in de EU

De tarieven voor inzameling, recycling, verbranding en storten zijn zeer ongelijk verdeeld over Europa (Plastics Europe et al., 2021). In landen waar stortverboden van kracht zijn (België, Luxemburg, Nederland, Duitsland, Denemarken, Zwitserland, Oostenrijk, Noorwegen en Zweden) wordt minder dan 10% van het plastic afval gestort. In andere landen, zoals Spanje en Griekenland, vindt nog steeds een duizelingwekkende hoeveelheid van meer dan 50% van al het plastic afval zijn weg naar de stortplaats (Plastics Europe, 2015)

### 7.2 Afval van elektrische en elektronische apparatuur

Afval van elektrische en elektronische apparatuur (WEEE: Waste of Electrical and Electronic Equipment) is een van de snelste groeiende afvalstromen in de EU, met ongeveer 9 Mt gegenereerd in 2005 en groeide tot meer dan 12 Mt in 2020 in de EU.

In 2014 bedroeg de wereldproductie van kunststoffen 270 Mt, met een EU-productie en vraag van respectievelijk 50 Mt (18,5%) en 49 Mt. 2,8 Mt (5,8%) van deze EU-productie werd gebruikt voor elektrische en elektronische apparatuur. De verspilling van elektrische en elektronisch gescheiden ingezameld afvalplastic in 2013 bereikte een niveau van 3,5 Mt (6,5 kg/inwoner), waarvan 2,7 Mt werden teruggewonnen. Het is opvallend dat in WEEE de vlamvertragende (flame retardant, FR) additieven ook -gechloreerde en gebromeerde organische verbindingen worden aangetroffen in polymeren die worden gebruikt in elektrische en elektronische apparatuur om brandschade te voorkomen. Gemiddeld 30% van de kunststoffen in WEEE bevatten FR's en gehalogeneerde verbindingen.

WEEE Kunststoffen dragen aanzienlijk bij aan de totale productie van plastic afval in de EU-27, maar door de lage inzamelingspercentages van WEEE is de recycling van deze kunststoffen erg laag. Door de

## OPENBARE VERSIE

aanwezigheid van broomhoudende vlamvertragers (BFR) in verschillende soorten kunststof en het ontbreken van prikkels (bijv. economische voordelen van energierterugwinning) wordt de recycling van plastic verkregen uit WEEE belemmerd. Het hoge halogeengehalte in deze kunststoffen vormen aan het einde van hun levensduur een milieu- en gezondheidsprobleem. Bij verwarming zoals bij pyrolyse kunnen bij deze gehalogeneerde kunststoffen, irriterende en corrosieve gassen, zoals HCl of HBr vrijkomen. Ook kunnen in aanwezigheid van zuurstof en metaaloxiden in de as, bij temperaturen tussen 200 en 500°C, naast HCl en HBr ook giftige stoffen zoals poly-gehalogeneerde dioxinen en furanen en verschillende andere organische halogeenvverbindingen vrijkomen.

### 7.1. De Markt - Vraagzijde voor afval plastics.

Er zijn vele initiatieven ontplooid om plastic afval om te zetten in waardevolle producten of in monomeren, de meeste daarvan zijn gebaseerd op mechanische of thermische (pyrolyse) conversie. Daarmee kwam een variëteit aan producten tot stand. De beperkte mechanische recycling stroom heeft granulaat als eindproduct, wat als vervanging van virgin plastic kan dienen. Met thermische recycling worden pyrolyse olie en gassen gevormd, deze hebben echter verdere behandelingen nodig voordat ze geschikt zijn om als ruwe grondstof te dienen waarmee het gebruik van nafta (uit aardolie) teruggedrongen kan worden. Ook in de toekomst zullen plastics in grote hoeveelheden geproduceerd worden. Er is een noodzaak om het gebruik van nafta terug te dringen zodat een proces van plastic productie op gang komt zonder het gebruik van fossiele grondstoffen om daarmee de CO<sub>2</sub> uitstoot te verminderen. Daarnaast moet het percentage plastic afval dat gerecycled wordt substantieel omhoog om de belasting van het milieu en ook de CO<sub>2</sub> uitstoot te verminderen.

De transitie naar circulair grondstoffengebruik zal richting 2030 nog vooral via hergebruik van afval-, materiaal- en productstromen en restgassen verlopen, zodat 50% minder primaire grondstoffen gebruikt worden. De doelstelling is dat in 2050 waardeketens voor tenminste 80% circulair zijn.

#### 7.1.1. Mechanische recycling

Mechanische recycling verwijst naar handelingen die erop gericht zijn kunststofafval terug te winnen via mechanische processen (d.w.z. malen, wassen, scheiden, drogen, granuleren en companderen). Bij mechanische recycling blijven polymeren intact, dit maakt meervoudig hergebruik van polymeren in hetzelfde of soortgelijk product mogelijk - waardoor effectief een gesloten lus wordt gecreëerd.

Mechanische recycling van kunststoffen verwijst naar de verwerking van kunststofafval tot secundaire grondstof of producten zonder de chemische structuur van het materiaal aanzienlijk te veranderen. In principe zijn alle soorten thermoplasten mechanisch te recyclen. Het is momenteel de bijna enige vorm van recycling in Europa en vertegenwoordigt meer dan 99% van de gerecyclede hoeveelheden.

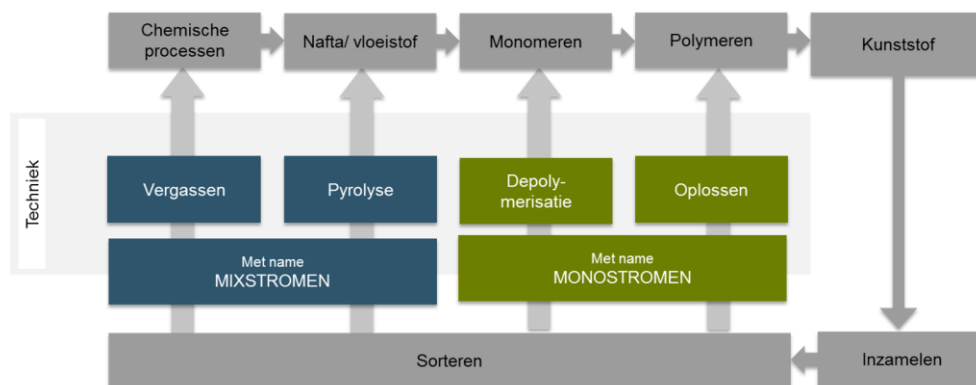
De milieuvordelen van het vervangen van nieuw materiaal overschrijden in het algemeen de milieubelasting van inzamelings-, sorteer-, transport- en recyclingactiviteiten, terwijl de kosten van dergelijke activiteiten kunnen worden gecompenseerd door potentiële inkomsten uit de verkoop van recyclaten op de markt. Aangezien sommige mechanische eigenschappen na recycling verslechteren, is de hoeveelheid gerecyclede materialen die in een nieuw product kunnen worden verwerkt, beperkt. Een andere uitdaging bij mechanische recycling is dat veel kunststoffen additieven bevatten, zoals kleurpigmenten, die de toepassing ervan kunnen beperken.

Kunststoffen en kunststofhoudend afval dat vanuit economisch en ecologisch oogpunt niet duurzaam mechanisch tot de vereiste norm kan worden gerecycled, vormen een waardevolle hulpbron voor andere terugwinningsoplossingen zoals grondstofrecycling en energierterugwinning om de terugwinning van de ingebedde energie en hulpbronnen te maximaliseren.

### 7.1.2. Chemische recycling

Vrijwel alle initiatieven voor het omzetten van een gemengde en variërende kunststof (polymeer) afvalstroom zijn gebaseerd op de thermische conversie van kunststoffen. De gebruikte kunststoffen zijn paraffines met een hoog molecuulgewicht (PE, PP en PS). PP en PS verschillen van PE omdat ze moleculair gezien een methyl- en een aromatische groep hebben die respectievelijk aan de paraffinische ruggengraat van het molecuul zijn gehecht. Er zijn verschillende commerciële bedrijven die polymeren kunnen omzetten in een soort ruwe olie of vliegtuigbrandstof, diesel, nafta en monomeren. Bedrijven gebruiken hiervoor een thermisch kraak (pyrolyse) proces. Bij thermisch kraken reduceert radicaal kraken het polymeer met hoog molecuulgewicht tot een mengsel van brandstoffen met een lager molecuulgewicht. Wanneer het proces met hoge temperatuur en speciale condities wordt uitgevoerd, wordt het polymeer teruggebracht tot de oorspronkelijke monomeren (of een mengsel hiervan samen met andere kraakproducten). Typische opbrengsten van vloeibare producten zijn 60 - 80 gewicht% van de polymeervoeding.

De producten van het thermische kraakproces zullen enkele kleine hoeveelheden nafta, een aanzienlijke hoeveelheid dieselolefinen en enkele waxen zijn, afhankelijk van de ernst van de operatie.



Overzicht van chemische recycle processen: Met de omzetting van gemengde kunststoffen naar aromaten wordt een type monomeer / grondstof gevormd uit het plastic, in plaats van een nafta / pyrolyse olie. Dit is in principe een combinatie van pyrolyse van plastics en de-polymerisatie naar monomeren, of pyrolyse naar nafta gevolgd door het vormen van monomeren in een stoomkraker.

### 7.1.3. Zuivere mono-plastic afvalstromen

De plastics die op grote schaal worden gerecycled zijn polyethyleentereftalaat (PET), polypropyleen (PP) en polyethyleen (PE). Op dit moment wordt plastic uit afvalstromen gescheiden in kleine, relatief zuivere afvalstromen mono-plastics, en grote gemengde plastic afvalstromen. Alleen de relatief zuivere mono-plastic stromen kunnen tot op zekere hoogte hergebruikt worden via mechanische recycling. Deze vorm van mechanisch recycling is mede door de maatschappelijke druk om meer te recyclen, omarmt door de polymeer inductie, haar afnemers en recycling industrie en is succesvol. Er is een grote vraag naar deze recycle producten, resulterend in hoge afzetprijzen en navenant hoge prijzen voor de zuivere afvalstromen.

#### 7.1.4. Gemengde plastic afvalstromen

Kunststofafval is voornamelijk afkomstig van industriële activiteiten of consumentenproducten. Post-industrieel afval is meestal schoon en niet verontreinigd met organisch materiaal of verontreinigende stoffen zoals papier, hout of andere kunststoffen, en het is vaak monomateriaal of van bekende samenstelling (polymeren en hun hoeveelheden in het geval van multimateriaal kunststoffen).<sup>1</sup> Postindustriële afval blijft meestal in het bedrijf of wordt business-to-business afgehandeld; daarom zijn hoeveelheden post-industrieel plastic afval niet openbaar verkrijgbaar.

Post-consumenten plastic afval dat aan het einde van de levensduur van het product wordt gegenereerd, bestaat doorgaans uit gemengde kunststoffen van onbekende samenstelling. Het is waarschijnlijk verontreinigd met organische fracties zoals voedsel afval of andere niet-polymeren (metaal of papier). Afval na consumptie wordt verwerkt door gemeenten en wordt doorgaans goed gevolgd in heel Europa.<sup>2</sup>  
<sup>3</sup>

Bovendien hangt de recycleerbaarheid ook af van het feit of het plastic uit meerdere lagen bestaat, uit meerdere materialen bestaat of samengesteld is of dat het oude additieven bevat (Europese Commissie, 2018c). Het recyclen van composietmaterialen kan bijvoorbeeld een uitdaging zijn vanwege hun inherent heterogene natuur. Hoewel mechanische recycling op industriële schaal bestaat voor composietmaterialen, zullen alleen korte vezels en vulstoffen kunnen worden teruggewonnen tegen een lage marktwaarde.<sup>5</sup> Op dit moment worden meerlagige kunststoffen niet mechanisch gerecycled.<sup>6</sup>

Chemische recycling wordt vaak gezien als een kansrijke beheer optie voor plastic afval na consumptie.<sup>7</sup> De recycleerbaarheid van bijvoorbeeld heterogeen en gemengd plastic uit huishoudelijk afval in de Europese context is beoordeeld door.<sup>8</sup> De studie evalueerde veel recycle scenario's, die een breed scala van sorteerschema's, efficiëntie van bronscheiding en configuratie en prestaties van materiaal herstel faciliteiten laten zien. Het circulariteitspotentieel onthulde dat slechts 42% van de plastic lus kon worden gesloten met de huidige technologie en vraag naar grondstoffen. Chemische recycling technologieën zoals hydrolyse en pyrolyse zijn met succes toegepast om gemengd plastic afval te behandelen dat is aangetast door onzuiverheden.<sup>9</sup>

#### **Verbeterde technieken**

De efficiëntie van recycling neemt toe, naarmate de sorteer- en recyclingtechnologieën blijven verbeteren en zelfs gemengde en vervuilde kunststofstromen kunnen worden gerecycled.

Nabij-infrarood spectroscopie (NIR) wordt veelvuldig ingezet om verschillende soorten plastic te sorteren vanaf een lopende band. Elke soort plastic kent een andere chemische structuur en beschikt over een eigen 'vingerafdruk' die de sensoren oppikken.

Een van de nadelen van NIR-systemen is dat ze geen zwart plastic kunnen herkennen. Donkere kleuren absorberen de lichtgolven die in het bereik liggen dat de sensoren scannen, waardoor het spectrum ervan niet wordt herkend. Lasersystemen kunnen daarentegen wel zwart plastic herkennen en worden nu in sommige fabrieken ingezet als complementaire technologie, zodat voorwerpen die normaal gesproken zouden worden weggegooid nu kunnen worden gerecycled. Ook van kunstmatige intelligentie (AI) wordt steeds meer gebruikgemaakt.

Desalniettemin komt er nog altijd veel mensenwerk kijken in de recycling van plastics. Zo worden veel verontreinigingen, zoals verontreinigde producten en andere soorten afval, handmatig gescheiden. Maar

## OPENBARE VERSIE

machines die gebruik maken van AI, een camerasysteem en een robotarm kunnen nu worden ingezet om verontreinigingen te herkennen en te verwijderen.

Ook interviews met afval plastic recyclingbedrijven en eigen deskresearch hebben geleerd dat bij mechanische recycling van afval plastics er nog een substantiële gemengde reststroom van gemengde plastics overblijft. Het merendeel is een reststroom van gemengde en gelaagde samenstelling die moeilijk economisch te scheiden zijn.

Deskresearch en interviews betreffende afvalstromen gaven ook aan dat de markten voor deze reststromen van gemengd afval plastic moeilijk zijn te kwantificeren. In literatuur worden vaak percentages van 30-50% gemengd plastic van de plastic afvalstroom genoemd die na mechanische scheiding alsnog in de verbrandingsoven of op de vuilstort beland.

Daarnaast worden bij veel bedrijven die actief zijn in mechanisch recycling deze afvalplastic stromen niet of nauwelijks chemische geanalyseerd, waardoor het onduidelijk blijft om wat voor verontreiniging het gaat. Veel van deze reststromen worden daarom geëxporteerd of verbrand met energierecuperatie.

Er zijn vele voorbeelden van initiatieven waarbij men beweert dat er gemengd plastic afval van lage kwaliteit kan worden gerecycled. 2 Voorbeelden:

- Sabic en Plastic Energy zetten momenteel een pyrolyse fabriek in Nederland op in het chemisch industriepark Chemelot bij Sittard-Geleen voor de productie van 'Tacoil'. Nadere inlichtingen geven aan dat hier alleen halogeenvrij materiaal kan worden verwerkt. (geen PVC of Bromide houdende plastics.)
- Neste en Ravago, distributeur van polymeren en chemicaliën, zijn van plan een eerste industriële installatie voor chemische recycling te bouwen in de North Sea Port van Vlissingen, met een jaarlijkse verwerkingscapaciteit van ongeveer 55.000 ton gemengd plastic afval. De technologie komt van Alterra Energy, USA. De lange termijn ambitie van de partners is om de verwerkingscapaciteit op wereldschaal aanzienlijk te verhogen en de joint venture voortdurend uit te bouwen tot een wereldleider voor de chemische recycling van gemengd plastic afval. Neste en Ravago hebben gezamenlijk een doel gesteld om in 2030 de capaciteit te bereiken om meer dan 200.000 ton gemengd plastic afval per jaar te verwerken.

## 7.2. De markt voor D-HALO

Zoals in de voorgaande paragrafen beschreven, bestaan afval plastics vaak nog uit substantiële gemengde reststromen die niet mechanisch te recyclen zijn. Deze gemengde reststromen bevatten vaak nog ongewenste verontreinigingen zoals PVC en ander halogeenvrij houdend plastic. Een aanzienlijk deel van de op de markt gebrachte kunststof verpakkingen komt nog in het restafval terecht en wordt verbrand met energierecuperatie.<sup>10</sup>

In het Beryl D-HALO proces worden naast andere verontreinigingen, vooral chloor- en broomhoudende verbindingen, door middel van een lage temperatuur pyrolyse en een sortatie verwijderd tot een zeer laag niveau van 10 ppm (parts per million) in de pyrolyse olie overblijft. Dit lage halogeenvrij gehalte is noodzakelijk om (petro)chemische verwerkingsapparatuur tegen corrosie te beschermen. Het D-HALO proces bestaat uit 2 stappen, waarbij deze corrosieve verontreinigingen worden verwijderd. De resulterende nagenoeg halogeenvrije pyrolyse olie kan vervolgens met conventionele technieken opgewerkt worden t.b.v. verwerking in een petrochemische installatie of een raffinaderij. D-HALO is daarmee altijd een onderdeel van een chemisch recycle proces en geen proces op zich.



## OPENBARE VERSIE

Precieze schattingen over de markt voor D-HALO zijn er niet. Dit komt mede door dat dit een nieuwe ontwikkeling is in de plastic afvalscheiding. In de literatuur worden vaak percentages van 30-50% gemengd plastic van de plastic afvalstroom genoemd die na mechanische scheiding alsnog in de verbrandingsoven of gestort. Uitgaande van de genoemde getallen: van de 29 Mt (miljoen ton) post-consumenten afvalplastic die in 2020 werd verzameld is meer dan 10 Mt naar recyclingfaciliteiten binnen en buiten Europa gestuurd, 12 Mt van al het plastic afval verbrand, en 7 Mt naar stortplaatsen gestuurd.

We spreken hier dus van een potentiële Europese markt voor D-HALO van [3 Mt (30% uit recycling) + 12 Mt (nu verbrand) + 7 Mt (nu gestort)] = 22 Mt afvalplastic per jaar.

Een tweede manier om de markt voor het D-HALO proces te benaderen is door naar de huidige aanwezige geïnstalleerde capaciteit en geplande toekomstige capaciteit voor plastic recycling d.m.v. van plastic pyrolyse installaties te kijken. Veel van deze installaties zullen worden geconfronteerd met gemengde plastic afvalstromen met halogeen houdende bestanddelen.

Name, Partners	technology	Location Plant	Capacity (Kt)	start-up
Pryme, Shell, Suez	Pryme	Rotterdam	35	
Blue Alp, Renasci	Blue Alp	Oostende	21	
Blue Alp, Shell	Blue Alp	Moerdijk	30	2023
Blue Alp, Shell	Blue Alp	Ruhrgebied	30	2023
Fuenix Ecogy, Dow	Fuenix	Terneuzen	10	
Fuenix Ecogy, Dow	Fuenix	Weert	20	
BP, Clean Planet Energy	Clean Planet Energy	Teeside, UK	20	
BP	Brightmark	NL/BE/Germany	tbd	
Altera Energy, Neste	Altera	Vlissingen	55	
BioBTX, Nouryon	BioBTX	Groningen	20	2027
BioBTX, PETRA Circular Chemicals	BioBTX	Delfzijl	50	2024
Mura, Dow	Mura UK	Teeside, UK	20	
Quantafuels, Denmark	Quantafuel	Denmark	80	
Exxonmobil, Plastic Energy	Plastic Energy	Le Havre, France	33	
Total Grandpuit, Plastic Energy	Plastic Energy	France	15	
TotalEnergies, Plastic Energy	Plastic Energy	Sevilla, Spain	33	2021
Plastic Energy	Plastic Energy	Sevilla, Spain	5	2017
Plastic Energy	Plastic Energy	Almeria, Spain	5	
Ineos, Plastic Energy	Plastic Energy	Grangemouth UK		
Sabic, Plastic Energy	Plastic Energy	Geleen	20	2022
Esso le Havre	Plastic Energy	France	25	
Shell Moerdijk	Waste4Me	Moerdijk	35	2030
Itero	Itero	Brightland Chemel	27	2024
Xycle	Patpert Techno System	Rotterdam	20	2023
<b>Totaal:</b>			<b>609</b>	

Tabel 7.1 Geïnstalleerde pyrolyse capaciteit in Europe 2022 in kiloton (Kt)

### 7.2.1 Bestaande Chemische Recycling Installaties

Volgens Chemical Recycling 2022 – Ecoprog GmbH<sup>11</sup> zijn er in Europa 19 actieve chemische recycling installaties. 11 hiervan zijn commerciële installaties, 13 pilot installaties. Helaas is er geen volledig beeld

## OPENBARE VERSIE

over hoeveel van de geïnstalleerde capaciteit werkelijk in gebruik is. Installaties vermeldt in persberichten en artikelen vullen deze lijst aan.

Door middel van onze eigen deskresearch hebben we de volgende tabel samengesteld van de huidige pyrolyse installaties: samen ongeveer 600.000 ton/jaar

### 7.2.2 Aangekondigde projecten in chemische recycling

Volgens Chemical Recycling 2022 – Ecoprog GmbH<sup>11</sup> zijn er in Europa 92 projecten aangekondigd, waarvan 24 projecten van commerciële schaal en 13 groter dan 100.000 ton/jaar capaciteit, van 50 projecten is de schaal niet duidelijk, 41 van de 92 projecten zijn gebaseerd op pyrolyse techniek.

Optelling van al deze projecten geeft 2,2 miljoen ton / jaar capaciteit. Hiervan is ongeveer 44% gebaseerd op pyrolyse techniek, wat neerkomt op bijna 1 Mt afval plastic verwerking per jaar.

In september 2022 hebben Dow Chemicals in Buhren, Duitsland en Mura Technology UK een grote investering in een Chemische recycling plant van 120.000 ton per jaar in Böhlen bij Leipzig aangekondigd. Mura heeft aangegeven dat zij hiervoor ook een investering moet doen in de-chlorinatie waarvoor Mura met een externe partner wil gaan werken.

### 7.2.3 De Industriële wax markt

Vanwege het feit dat D-HALO geen proces op zich is en het resultaat afhangt van het soort recycling totaal-proces, bleek tijdens het researchonderzoek door Beryl dat er een toepassingsgebied is dat gestoeld is op dezelfde basistechnologie als voor pyrolyse en een duidelijk marktpotentieel heeft: de productie van wax. Deze toepassing wordt daarom hieronder verder uitgewerkt.

Waxen zijn de groepen van organische verbindingen die bij omgevingstemperaturen kneedbare en hydrofobe (waterafstotende) vaste stoffen zijn. Het omvat lipiden en hogere alkanen die onoplosbaar zijn in water maar oplosbaar zijn in niet-polaire, organische oplosmiddelen. Verschillende waxproducten, waaronder minerale, natuurlijke en synthetische wax, worden geproduceerd uit op aardolie gebaseerde producten zoals basisolie en aardgas, chemicaliën zoals polyethyleen en planten en dieren.

### 7.2.4 Producttypen

#### 7.2.4.1 Minerale wax

Het segment minerale wax domineerde de markt en was goed voor het grootste omzetaandeel van 67,8% in 2021. Minerale waxen zijn puur en bevatten geen sporen van esters of alcohol zoals in bijenwax of plantaardige waxen. Deze producten worden gewonnen uit steenkool, aardolie, bruinkool en schalieolie via het gefractioneerde destillatieproces. Enkele van de algemeen erkende minerale waxen omvatten microkristallijne, paraffine, vaseline en cersine wax.

#### 7.2.4.2 Paraffinewax

is een van de algemeen gewonnen waxen uit de olie-industrie als bijproduct, wat zorgt voor een continue, zorgvuldige inkoop en het gemak van het produceren van de wax. Het producttype paraffine wordt algemeen gebruikt bij de formulering van kaarsen, omdat het de unieke eigenschap heeft om zowel geur als kleur extreem lang vast te houden. Bovendien wordt paraffine veel gebruikt bij huidverzachtende

## OPENBARE VERSIE

behandelingen. Aan de andere kant heeft **microkristallijne** wax een hoger smeltpunt en is relatief flexibeler dan paraffine en wordt daarom gebruikt in grootschalige industriële toepassingen, afgezien van de cosmetische industrie.

### 7.2.4.3 Synthetische wax

Het segment **synthetische wax** wordt naar schatting het snelst groeiende segment in de nabije toekomst, waarbij de groei is toe te schrijven aan de stijgende vraag naar papier en karton en bouwplaten. Ook wordt verwacht dat een toename van de vraag naar cosmetica en persoonlijke verzorging, lijmen en inkt- en coatingsectoren de groei van het segment in de komende jaren zal sturen.

De markt voor (industriële) wax kan als volgt worden ingedeeld op basis van oorsprong:

- **Op fossiele grondstoffen gebaseerde waxen**
  - Minerale wax:
    - montaanwax (bruinkool/bruinkool)
    - ozokeriet.
  - Petroleumwaxen:
    - paraffine wax (alkanen met lange ketens)
    - microkristallijne wax.
- **Wax op synthetische basis**
  - Poly-olefinewax/alfa-olefinewax
  - Fischer-Tropsch-wax (GTL, CTL, BTL)
- **Bio-gebaseerde waxen**
  - Plantaardige waxen (candelillawax, carnaubawax)
  - Dierlijke wax (bijenwax, Chinese wax, talg, lanoline)

Marktsegmenten per toepassing:

- De industriële wax-markt kan op basis van toepassingen in grote lijnen worden onderverdeeld in:
  - Kaarsen
  - Verpakking
  - Coatings en poetsmiddelen
  - Smeltlijmen
  - Banden en rubber
  - Cosmetica en persoonlijke verzorging
  - Voedingstoffen
  - Overige

### 7.2.5 Marktanalyse Samenvatting:

- Snelle uitbreiding van de meeste wax toepassingen, zoals cosmetica en toiletartikelen, verven en coatings, verpakkingen en kaarsenproductie;
- Grote vraag naar wax als additief in de kunststofindustrie;
- Industriële wax wordt gebruikt om de viscositeit en duurzaamheid van deze producten voor persoonlijke verzorging en cosmetische producten te verbeteren. Zo verhoogt de stijgende vraag naar producten voor persoonlijke verzorging de vraag naar industriële wax aanzienlijk;

## OPENBARE VERSIE

- De groeiende vraag naar industriële toepassingen heeft geleid tot een toename van onderzoeks- en ontwikkelingsactiviteiten. Wetenschappers richten zich ook op het ontwikkelen van technieken om industriële wax toepassingen uit te breiden.
- Synthetische wax zal naar verwachting de snelste CAGR vertonen vanwege de grote vraag naar coatings, smeltlijmen, karton, kaarsen, drukinkten, lamineren, PVC-smeermiddelen en poetsmiddelen;

### 7.2.6 De wereldwijde markt voor wax:

Volgens een nieuw rapport gepubliceerd door Allied Market Research, getiteld “Wax Market by Type and Application: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2017-2023”:

- marktgrootte in 2016: \$ 9.322 miljoen.
- marktgrootte in 2023: \$ 11,780 miljoen.
- Gemiddelde marktprijs: \$1.530 per ton
- CAGR van 2017 tot 2023: 3-4%
- Het volume van de wereldwijde wax markt: 7 miljoen ton in 2020

Belangrijkste leveranciers op de wereldmarkt:

- China Petrochemical Corporation
- Koninklijke Nederlandse Shell PLC
- Petrobras [Braziliaanse regering]
- Exxon Mobil Corporation
- Sasol Limited
- NK Lukoil PAO
- Numaligarh Raffinaderij Limited [Bharat Petroleum]

### 7.2.7 De Industriële wax markt 2021 - 2022

De wereldwijde marktomvang van wax werd geschat op 9,8 miljard USD in 2021 en zal naar verwachting groeien met een samengesteld jaarlijks groeipercentage (CAGR) van 4,3% van 2022 tot 2030. De vraag naar het product zal naar verwachting worden gedreven door de groeiende vraag in verschillende industrieën vanwege zijn superieure eigenschappen zoals hoge glans, goede waterafstotendheid en uitstekende chemische resistentie. De markt is zeer competitief van aard door de grote betrokkenheid van multinationals en constante capaciteitsuitbreiding en productdiversificatie en innovatie. Om in dit competitieve markttype te blijven, ondergaan bedrijven verschillende strategische plannings- en uitvoeringsprogramma's om hun operationele efficiëntie te vergroten en de wereldwijde aanwezigheid op de markt te vergroten.

Gemiddelde wax prijzen midden-2021 (Europa/Midden-Oosten/VS). Prijzen aan groothandel/verwerkers van eindproducten:

Product	Spec	Quantities	Price \$/mt	Price (€/mt)
Micro Crystalline	Fully Refined, micro crystalline	12.5 kg bags	\$ 4,200	€ 3,590
Micro Crystalline	Micro crystalline	12.5 kg bags	\$ 2,150	€ 1,838
Slack Wax / Paraffin Wax		bulk (20t)	\$ 922	€ 783

## OPENBARE VERSIE

### 7.2.7.1 Prijsontwikkeling Europa:

#### Prijs indicaties in Q2-2021 (Europa):

- Slack wax, afhankelijk kwaliteit: 1.000 – 1.200 euro/ton
- Paraffinische wax: 1.500 – 2.000 euro/ton
- Microkristallijne wax > 2.500 euro/ton.

Sinds midden- 2021 zijn de prijzen in Europa sterk gestegen door krapte op de markt. Markt partijen hebben vaak moeite om aan de vraag naar zowel slack-wax en microkristallijne wax te kunnen voldoen

In 2022 ontstonden er grotere tekorten aan industriële wax. Verschillende marktpartijen hebben aangegeven dat deze prijzen in 2022 alleen maar fors verder zijn gestegen:

Prijs indicaties voor Q2-2022 (Europa). Prijzen aan groothandels/verwerkers van eindproducten:

- Slack wax, afhankelijk kwaliteit: 1.500 – 1.800 euro/ton
- Paraffinische wax: 2.000 – 2.500 euro/ton
- Microkristallijne wax > 4.000 euro/ton.

Deze tekorten aan diverse waxen zijn het gevolg van:

1. EU-verbod op het gebruik van palm, soja of koolzaad ("Canola") als grondstof voor waxkaarsen.
2. Het Europees Parlement heeft besloten om het gebruik van palmolie in transportbrandstoffen tegen 2021 geleidelijk af te schaffen en andere op gewassen gebaseerde biobrandstoffen, zoals soja en koolzaad, te beperken tot het verbruiksniveau van 2017 en een volledig verbod op het gebruik van plantaardige oliën in transportbrandstoffen in 2030.
3. Bezorgdheid over het verband tussen biobrandstoffen en de vernietiging van het milieu, mensenrechtenschendingen en de impact op de voedselprijzen hebben het enthousiasme getemperd over wat ooit werd gezien als een levensvatbaar alternatief voor fossiele brandstoffen.
4. Tegenwoordig is een toenemend aantal kaarsenmakers gekant tegen het gebruik van palm, soja of koolzaad (canola) als grondstof voor hun kaarsen om ecologische en sociaal-ethische redenen, ondanks het feit dat plantaardige grondstoffen gunstige prijzen kunnen opleveren.
5. Van consumenten van industriële wax hebben we vernomen dat ook IKEA heeft aangegeven vraagtekens te zetten bij het gebruik van palm, soja of koolzaad als grondstof voor kaarsen.
6. Sluiting van een deel van de industriële productie: de sluiting van oudere basisoliefabrieken (smeerolie) en aardolieraffinaderijen, die deze industriële wax produceren (voorbeelden: Shell Pernis, Gunvor Europoort, Total Frankrijk).
7. Sinds het uitbreken van de oorlog in de Oekraïne en de sancties voor Rusland, zijn de exporten van met name slack-waxen uit Rusland stopgezet.

Verschillende gebruikers en handelaren in industriële wax hebben aangegeven aan Beryl Circular grote belangstelling te hebben voor afname van 'duurzame, milieuvriendelijke en circulaire wax.

### 7.3 Literatuurlijst Economisch perspectief

1. Ragaert et al., 2018; Ragaert, K., Hubo, S., Delva, L., Veelaert, L., & Du Bois, E. (2018). Upcycling of contaminated post-industrial polypropylene waste: A design from recycling case study. *Polymer Engineering & Science*, 58(4), 528-534.
2. Ragaert et al., 2017; Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24-58.
3. Schwabl et al., 2021; Schwabl, D., Bauer, M., & Lehner, M. (2021). Advancing Plastic Recycling by Wet-Mechanical Processing of Mixed Waste Fractions. *Processes*, 9(3), 493.
4. Europese Commissie European Parliament Adopts Circular Economy Package, By Latham & Watkins LLP on April 30, 2018, Posted in Contaminated Properties & Waste, European Environmental and Public Law <https://www.globalelr.com/2018/04/european-parliament-adopts-circular-economy-package/#:~:text=The%20European%20Parliament%20adopted%20the%20new%20Circular%20Economy,waste%20recycling%20and%20lower%20the%20amount%20of%20landfilling.>
5. Shuaib, N. A., & Mativenga, P. T. (2016); Energy demand in mechanical recycling of glass fibre reinforced thermoset plastic composites. *Journal of Cleaner Production*, 120, 198-206.
6. Vollmer, I., Jenks, M.J., Roelands, M.C., White, R.J., van Harmelen, T., de Wild, P., van Der Laan, G.P., Meirer, F., Keurentjes, J.T. and Weckhuysen, B.M. (2020). Beyond mechanical recycling: Giving new life to plastic waste. *Angewandte Chemie International Edition*, 59(36), 15402-15423.
7. Solis, M., & Silveira, S. (2020); Technologies for chemical recycling of household plastics—A technical review and TRL assessment. *Waste Management*, 105, 128-138.
8. Eriksen, M. K., Damgaard, A., Boldrin, A., & Astrup, T. F. (2019). Quality assessment and circularity potential of recovery systems for household plastic waste. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 156-168.
9. Faraca, G., & Astrup, T. (2019); Plastic waste from recycling centres: Characterisation and evaluation of plastic recyclability. *Waste Management*, 95, 388-398.
10. REBEL, Partners voor Innovation, 04-09-2018); Verkenning 'Kunststof Verpakkingsafval als Grondstof' Michiel Kort / Reinier van der Vusse / Chantal van Driel / Nina van Rijn, Rebel (Economische Analyse) Siem Haffmans / Ingeborg Gort, Partners for Innovation (Technische Analyse). In opdracht van samenwerkingsverband van Rijkswaterstaat en Kennisinstituut Duurzaam Verpakken. Eindrapportage, 4 september 2018. Technische en Economische Analyse
11. Çhemical Recycling 2022 – Ecoprog GmbH, "Trend Study – Chemical Recycling 2022"(gekocht, niet publiek toegankelijk)

## 8 Innovatie en technologie

### 8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden procesomschrijvingen voor D-HALO en B-WAX gegeven. Hierbij worden onderwerpen zoals het bepalen van de optimale parameters en de invloed van de feedstock - uitgewerkt. Voor de uitwerking van de processen is door PlantOne Rotterdam een engineering studie uitgevoerd.

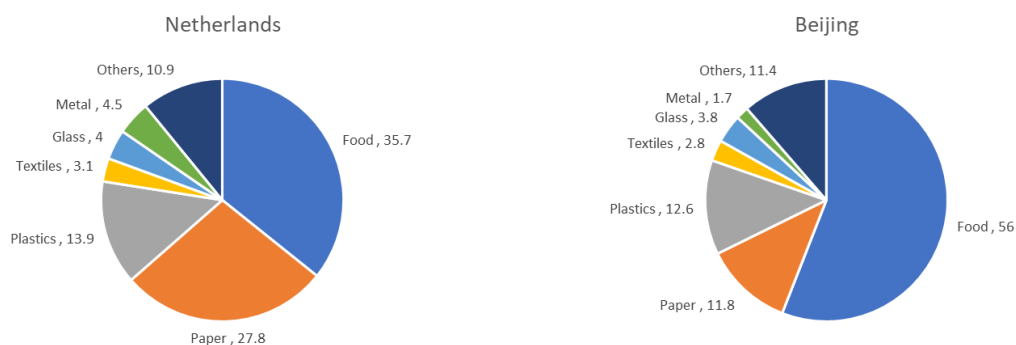
### 8.2 Bepalen optimale parameters en invloed feedstock

#### 8.2.1 Inleiding proces parameters

“De producten van een Fluid Catalytic Cracking (FCC) proces worden voor 85% bepaald door de voeding, 10% door de proces condities zoals temperatuur en 5% door de katalysator.” Dit wordt (mondeling) in de meeste cursussen over FCC technologie verteld. Deze vuistregel gaat zeer zeker ook op voor de verwerking van gemengde afval plastics. In deze paragraaf wordt ingegaan op de samenstelling van afvalstromen en de voorwaarden voor optimale recycling van afvalplastics.

#### 8.2.2 Samenstelling van afval stromen

Huisvuil heeft geen vaste compositie maar hangt sterk af van de locatie waar het ingezameld wordt. Dat geldt op mondiaal niveau (zie figuur 1.1 en 1.2), maar ook op lokaal niveau: of huisvuil ingezameld wordt in een stad of op platteland. In Japan vindt men plastic types die men niet in Europa vindt, zoals polyvinidyleenchloride (PVDC), een materiaal dat in Japan voor verpakkingen wordt gebruikt, maar niet in Europa. Huisvuil bevat veel verschillende componenten en maar een fractie ervan zijn plastics geschikt voor chemisch recyclen. Voorbehandeling is nodig om verontreinigingen zoals hout, papier, voedingsresten, glas en metalen te verwijderen.



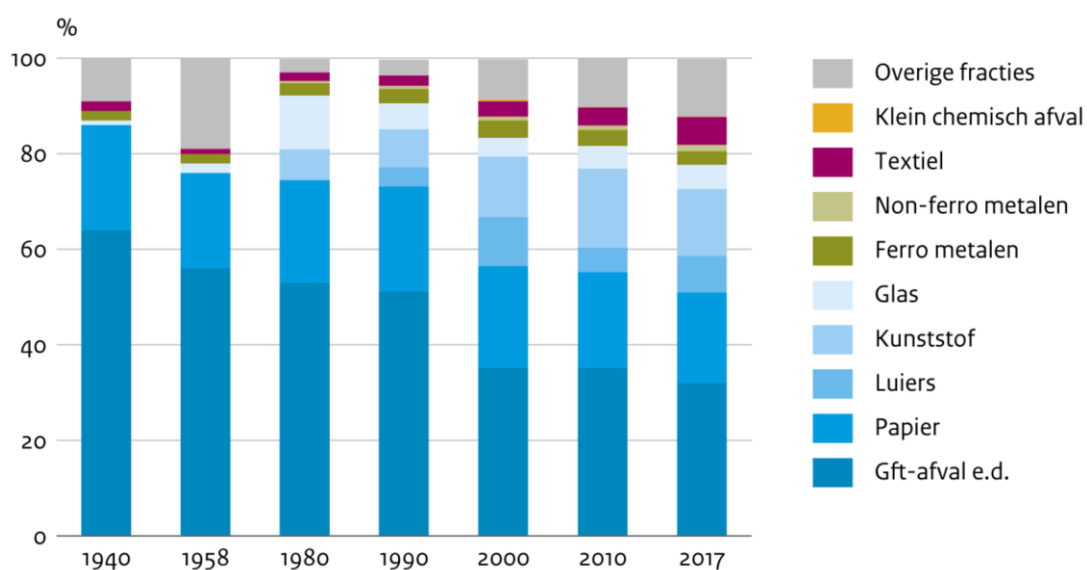
Figuren 8.1 en 8.2. gemiddelde samenstelling van huisvuil in Nederland (links) en Beijing (rechts in 2005<sup>1</sup>).

Om plastics te recyclen moeten ze gescheiden worden van het overige vuil. Soms worden plastics apart ingezameld. Bijvoorbeeld in Zwitserland worden plastics per type ingezameld op centrale inzamelpunten. Dit soort initiatieven maakt het eenvoudiger om stromen te creëren met een veel hogere concentratie en homogeniteit. Apart ingezamelde plastics moeten gecontroleerd worden op de aanwezigheid van vervuilingen zoals zware metalen, batterijen, verf enzovoorts.

### 8.2.3 Kunststof in fijn huishoudelijk restafval

De kunststof fractie in huishoudelijk restafval nam tot en met 2008 aanzienlijk toe. Daar waar kunststofafval voor 1970 nog nauwelijks werd gevonden in het restafval, maakt het in 2008 20 procent van het restafval uit. Vanaf 2009 is er een afname te zien in het aandeel. Dit was ook te verwachten vanwege de gescheiden inzameling van kunststofverpakkingen sinds eind 2009. Sinds 2011 is het aandeel kunststofafval met 14 procent stabiel. Na gft-afval, papier en karton is kunststof de derde fractie in het fijn huishoudelijk restafval. 7 Deze afvalstroom wordt in deze studie niet verder geanalyseerd.

#### Samenstelling huishoudelijk restafval



Figuur 8.3: Compendium voor de Leefomgeving, samenstelling van huishoudelijk restafval 1940-2017 <sup>7</sup>.

## 8.3 Effect van gemengde plastics in het pyrolyseproces

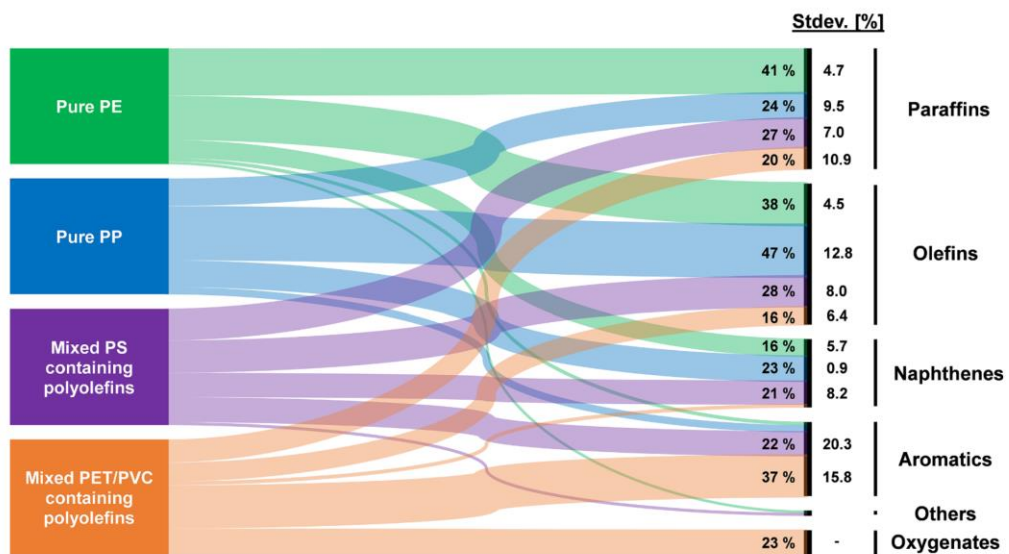
### 8.3.1 Polyethyleen

Met polyethyleen (PE) als voeding in een pyrolyse proces worden vooral hoogmoleculaire, waxachtige producten gemaakt. Er worden weinig gassen en coke geproduceerd. De gevormde pyrolyse olie bestaat vooral uit olefinen en paraffines (zie figuur 1.3). Bij pyrolyse onder relatief milde omstandigheden worden er weinig naphthenen en aromaten gevormd. Bij hogere temperaturen, langere verblijftijden en door de aanwezigheid van katalysatoren die de-hydrogenatie reacties kunnen bevorderen kan de selectiviteit naar aromaten vergroot worden. De aanwezigheid van wax in de product olie leidt tot een hoog cloud point en het verhoogt het pour point van de hoger kokende fracties van de pyrolyse olie. Dit kan tegengegaan worden door katalytisch de-waxen of door de verwijdering van de wax door solvent extractie. Katalytisch de-waxen verlaagt het pour point en het cloud point van de pyrolyse olie. Katalytische isomerisatie van wax verlaagt ook het final boiling point van de pyrolyse olie. Katalytische isomerisatie is alleen mogelijk na hydrotreating van de pyrolyse olie, omdat katalysatoren edelmetalen zoals platinum bevatten die snel deactiveren wanneer ze blootgesteld worden aan de olefinen en/of zware metalen uit pyrolyse olie.



### 8.3.2 Polypropyleen

Polypropyleen vertoont vergelijkbaar gedrag als PE in pyrolyse. PP is gevoeliger voor thermisch kraken en het kraken begint al bij iets lagere temperaturen. Een direct vergelijk van pyrolyse producten bij constante conversie kan gemaakt worden, maar altijd met de gedachte dat de condities waaronder de producten gevormd worden niet gelijk zijn. In pyrolyse maakt PP vergelijkbare producten als PE, maar met een iets hogere fractie gas ten koste van de fractie vloeistoffen (de ontleding naar monomeer is hoger voor PP). Zowel PE als PP geven vergelijkbare producten in de pyrolyse reactie, met weinig coke en weinig waterstof productie. Beide polymeren maken niet veel coke omdat ze veel waterstof bevatten. Een verschil in de product kwaliteit is dat PP meer vertakte producten en minder wax-achtige producten maakt in de vloeistof fase (PP wax heeft met een vergelijkbaar molecuul gewicht een lager smeltpunt).



Figuur 1.4: Sankey grafiek die de invloed van de voeding laat zien op producten in een pyrolyse proces. Data is indicatief en gebaseerd op meerdere studies (producten in wt%) <sup>3</sup>.

### 8.3.3 Polystyreen

Pyrolyse van polystyreen (PS) ontleedt het polymeer vooral in zijn monomeer, styreen, en overige aromaten. Pyrolyse van styreen levert een lichte olie / naphtha op die zeer rijk is in aromaten. Relatief weinig coke en gassen worden gevormd gedurende de pyrolyse. Polystyreen kan ook broomhoudende vlamvertragers bevatten die het corrosieve broomzuur kunnen vormen.

### 8.3.4 Polyethyleen terephthalaat

Voor het recyclen van polyethyleen terephthalaat (PET) is in Europa en in de VS een uitgebreide recycle cyclus opgezet en PET wordt separaat ingezameld. Bij voorkeur wordt PET uit gemengde plastics verwijderd. De pyrolyse van PET levert veel coke op, typisch levert een procent PET in voeding een extra procent coke als product op. Een bijkomend probleem is een van de producten die gevormd wordt is terephthaal zuur. Dit zuur slaat neer beneden de 400°C en vormt afzettingen en blokkeringen in koudere plaatsen in het proces (afvoer leidingen van product bijvoorbeeld). Pyrolyse van PET vormt ook benzoë zuur dat zeer corrosief is.

### 8.3.5 Polyvinyl chloride

Pyrolyse van polyvinylchloride (PVC) levert een grote hoeveelheid coke op. Pyrolyse van PVC levert typisch 20 wt% tot 50 wt% coke op <sup>4</sup> (praktisch alle niet chloor componenten van PVC gaan naar coke). Het belangrijkste ontledingsproduct van PVC pyrolyse is zoutzuur (HCl). Zoutzuur zorgt voor grote uitdagingen met corrosie. PVC begint te ontleden bij lagere temperaturen dan de ontleding van PE, PP of PS begint. Wanneer PVC niet verwijderd kan worden uit de voeding voor het pyrolyse proces, wordt de pyrolyse bij voorkeur in meerdere stappen uitgevoerd. Bij lagere temperatuur wordt PVC ontleedt tot zoutzuur en wordt het zoutzuur verwijderd (typisch 56% van PVC bestaat uit chloride, dit getal kan lager zijn (rond de 30%) wanneer weekmakers en andere additieven zijn toegevoegd). Een aparte uitdaging is de aanwezigheid van chloor in de vloeibare en gasvormige producten in de vorm van gechloreerde koolwaterstoffen. De aanwezigheid van PET naast PVC in de voeding vergroot de concentratie van gechloreerde koolwaterstoffen door de vorming van chloro-esters met terephthaal zuur. Een andere bron voor chloor zijn voedselresten (zouten).

### 8.3.6 Effect van verontreinigingen in de proces stromen

Gemengd afvalplastic bevat verontreinigingen zoals zand, metaal, glas, hout en etensresten. Deze moeten verwijderd worden om het plastic te kunnen verwerken en schade aan de proces apparatuur te voorkomen. De verontreinigingen zorgen er ook voor dat de kwaliteit van het eindproduct nadelig beïnvloed wordt (zuurstof, stikstof, zwavel, halogenen).

#### 8.3.6.1 Papier

Gemengd afval kan cellulose bevatten zoals in pulp en papier. Cellulose gaat vooral naar coke in een pyrolyse proces, maar kan ook zuurstofhoudende koolwaterstoffen produceren, en CO, CO<sub>2</sub> en water. Hout en papier kunnen metalen en vulmiddelen bevatten die bijdragen aan vervuiling in een pyrolyse proces.

#### 8.3.6.2 Zwavel

Zwavelhoudende materialen, zoals polysulphonen of rubbers die gecrosslinked zijn met zwavelbruggen (zoals in autobanden) kunnen een bron zijn voor zwavelhoudende koolwaterstoffen in de pyrolyse olie. Een andere bron voor zwavel zijn voedselresten.

#### 8.3.6.3 Halogenen

Naast halogeen houdende plastics, zoals PVC, kunnen andere materialen bijdragen aan halogenen in de plastic smelt: vlamvertragers en zouten bijvoorbeeld. Let wel, er zijn weinig bewijzen dat de aanwezigheid van zouten direct bijdragen aan de vorming van gechloreerde koolwaterstoffen. Er zijn een aantal artikelen die suggereren dat zo'n transfer onder specifieke condities kan plaatsvinden afhankelijk van de proces condities en aanwezigheid van een katalysator. Gechloreerde vlamvertragers kunnen gebromeerde koolwaterstoffen produceren. De meerderheid van het broom gaat naar de hoger kokende componenten. Verwijdering van broom voor het pyrolyse proces is noodzakelijk voor een verdere verantwoorde verwerking.

#### 8.3.6.4 Stikstof

ABS, nylon en polyurethanen kunnen bijdragen aan stikstof in de voeding. De stikstof kan producten vormen zoals waterstof cyanide, paraffinische aromatische nitrilen en stikstof bevattende heterocyclische koolwaterstoffen.

## OPENBARE VERSIE

### 8.3.6.5 Metalen en overig

Afval plastic kan ook anorganische materialen bevatten zoals pigmenten, glas vezel, vulmiddelen zoals titanium of zink oxides, vlamvertragers, inkt pigmenten en aluminium. Ook kan de aanwezigheid van batterijen (in plastic speelgoed) bijdragen aan zware metalen zoals nikkel, maar ook bijvoorbeeld lithium.

### 8.3.7 Pyrolyse olie

Pyrolyse olie is geen eind- maar een tussenproduct. Verbranden is een mogelijkheid (al dan niet gemengd), maar bezien vanuit de gedachte van circulariteit geen lange termijn optie. Het is niet mogelijk om pyrolyse olie direct weg te mengen in petrochemische producten (behalve in minuscule hoeveelheden) vanwege de verontreinigingen die erin zitten. In een typische raffinaderij kunnen veel van deze verontreinigingen effectief verwijderd worden, zoals zuurstof, stikstof, zwavel en metalen. Hierna kan de pyrolyse olie in conventionele processen en product stromen gebruikt worden.

Wanneer de pyrolyse olie halogenen bevat is verwerking in een raffinaderij niet meer mogelijk. Conventionele processen zijn niet in staat om halogenen te verwijderen van koolwaterstoffen wanneer dit meer dan een paar ppm is. PVC bevat 560,000 ppm Cl, doorgaans zijn in een conventioneel pyrolyse proces 100 tot 1,000 keer grotere concentraties aanwezig dan acceptabel is voor conventionele verwerking

### 8.3.8 Conclusies plastic voeding

Gemengde plastics uit afval voor pyrolyse zijn goed te verwerken mits ze geen verontreinigingen bevatten. Voor de conventionele productie van pyrolyse olie bestaan de plastics bij voorkeur uit PE, PP en PS. Vooral PP en PE leveren een pyrolyse olie op die na een nabehandeling zoals hydrotreat-en een interessante voeding is voor een stoomkraker. Wanneer de pyrolyse olie na behandeling als mengvoeding voor motorbrandstoffen is bedoeld is een mengsel van PS en PP interessanter omdat deze een hoger octaan gehalte heeft door de aromaten en vertakte verbindingen en het octaan getal hierdoor stabiel is bij hydrotreating, wanneer de olefinen verzadigd worden en de potentiële verontreinigingen (zwavel, zuurstof, stikstof, metalen) verwijderd worden. De markt beschouwt brandstoffen echter niet als volwaardig circulair, als intermediaire oplossing zijn deze echter geschikt om te gebruiken.

Wanneer plastics met halogenen zoals PVC in de voeding zitten wordt het verwerken aanzienlijk complexer. Het is dan niet mogelijk om een conventionele pyrolyse olie te produceren die eenvoudig door een raffinaderij of petrochemische plant verwerkt kan worden door de hoge concentratie halogenen, een verontreiniging die op dit moment niet eenvoudig met conventionele reinigingsprocessen verwijderd kan worden. Het onderzoek door Beryl Circular moet hiervoor een oplossing bieden.

### 8.3.9 Samenstelling acceptabele voeding voor het pyrolyse proces

In de voeding die verwerkt kan worden in het D-HALO of in het B-WAX proces zijn er meer mogelijkheden dan tot op heden met het conventionele pyrolyseproces. Voor D-HALO is de voeding vergelijkbaar, maar niet identiek, aan de voeding die in de pyrolyse fabrieken in Niigata, Mikasa en Sapporo gebruikt werd.

Tabel 1: voeding voor het **D-HALO proces**.

	MIN (WT%)	TYPICAL (WT%)	MAX (WT%)
PE	*	40	100
PP	*	25	100
PS	*	15	70
PVC	0	3	5
PET	0	3	5
OTHER	0	3	5
DRY RESIDUE	0	2	3
WATER	0	6	8

\* De voeding moet voornamelijk uit plastics bestaan die na pyrolyse voornamelijk pyrolyse olie produceren en een lage selectiviteit naar coke en gassen hebben. PET, nylons en PVC produceren lage kwaliteit olie en relatief veel vast residue en gassen. De gezamenlijke concentratie PE, PP en PS in de voeding is ten minste 85%. Dit betekent dat er max. 15% aan andere verontreinigingen is toegestaan.

Tabel 2: voeding voor het **B-WAX proces**.

	MIN (WT%)	TYPICAL (WT%)	MAX (WT%)
PE	*	*	100
PP	*	*	100
PS	*	0	3
PVC	0	0	0
PET	0	0	1
OTHER	0	0	1
DRY RESIDUE	0	0	2
WATER	0	6	8

\* De voeding moet voornamelijk uit plastics bestaan die na pyrolyse voornamelijk pyrolyse wax produceren en een lage selectiviteit naar coke en gassen hebben. In tegenstelling tot het D-HALO proces moeten verontreinigingen tot een minimum beperkt worden, en bestaat de voeding bij voorkeur uit monostromen PE of PP, eventueel kan tot 25% verontreiniging van PE in PP of vice versa getolereerd worden.

## 8.4 Pyrolyse parameters

### 8.4.1 Druk

Door het pyrolyse proces onder hogere of lagere druk uit te voeren wordt de verdeling van het molecuul gewicht van de producten beïnvloed. Bij hogere druk wordt het kookpunt van een vloeistof verhoogd. Dat betekent dat de te pyrolyseren plastic smelt langere tijd in de reactor doorbrengt en minder makkelijk als product vervluchtigd. Daardoor wordt het product spectrum lichter, minder hoogkokende componenten worden gevormd en meer gassen en lichte nafta. Een lagere druk heeft het tegenovergestelde effect: hierbij wordt de gemiddelde molecuul massa van het product zwaarder, dus worden er meer wax-achtige producten en meer vloeistof geproduceerd en minder gassen en lichte nafta.

Er zijn pyrolyse processen beschreven die onder gereduceerde druk plaatsvinden (Trifol bijvoorbeeld) om zwaardere producten te maken. Green Mantra beschrijft ook een proces dat onder hogere druk plaats

## OPENBARE VERSIE

vindt in een autoclaaf maar zware producten maakt. Dit gebeurt door de conversie te beperken door het gebruik van lagere pyrolyse temperatuur en het product als vloeistof af te voeren.

### 8.4.2 Temperatuur

Verhogen van pyrolyse temperatuur verhoogd het gemiddelde product molecuul gewicht wanneer het product als gas / damp uit de pyrolyse reactor wordt afgevoerd. Hoe hoger de pyrolyse temperatuur, hoe hoger het gemiddelde molecuul gewicht van de componenten die uit de smelt vervluchtigen na kraken. Hierbij is het belangrijk om op te merken dat de temperatuur een parameter is en ondergeschikt aan de samenstelling van de te kraken voeding. De verschillen in reactiesnelheid tussen de verschillende componenten uit de voeding (vergelijk bij voorbeeld PE met PS) kan een effect van 100°C in kraak temperatuur teniet doen.

Wanneer het product niet als gas maar als vloeistof uit de pyrolyse reactor wordt afgevoerd wordt de conversie en product verdeling bepaald door de temperatuur en de verblijftijd.

### 8.4.3 Verontreinigingen

Verontreinigingen kunnen meerdere effecten hebben. De aanwezigheid van metalen (bijvoorbeeld uit pigmenten) vergroot de hoeveelheid coke die tijdens de pyrolyse gevormd wordt. Ook neemt de hoeveelheid lichte gassen, vooral waterstof, toe door metalen.

De aanwezigheid van halogenen heeft meerdere effecten. Experimenten hebben aangetoond dat de aanwezigheid van zoutzuur pyrolyse reacties versnelt. De aanwezigheid van halogenen beïnvloedt de pyrolyse olie kwaliteit zeer sterk. Door recombinatie reacties van olefinen (kraakproduct) en zoutzuur in de damp fase worden gechlorideerde koolwaterstoffen gevormd.

## 8.5 Pyrolyse van gemengde plastics met PVC als verontreiniging

### 8.5.1 Partiële pyrolyse bij lage temperaturen

De ontleding van PVC begint bij temperaturen die lager zijn dan waarbij PE, PP of PS wordt gekraakt. In de literatuur wordt daarom een twee-staps pyrolyse voorgesteld om de chloor te verwijderen. Door de smelt te verhitten tot een temperatuur van 280 – 350°C wordt de PVC ontleedt in zoutzuur en een poly-ene. Daarna kan de smelt gepyrolyseerd worden terwijl 90 – 95% van het chloor verwijderd is. Dit proces is commercieel toegepast in de processen zoals in geopereerd in Niigata, Sapporo en Misaka.

### 8.5.2 Gebruik van chloor bindende sorbents

In de literatuur zijn veel sorbents beschreven die in de pyrolyse van PVC houdende plastics gebruikt kunnen worden. Dit zijn over het algemeen (aard) alkalische stoffen die chloor kunnen binden tot een chloride. Deze sorbents zijn commercieel toegepast in de pyrolyse fabrieken van Niigata en Sapporo en hebben effectief de concentratie van chloor in pyrolyse olie gereduceerd.

### 8.5.3 D-HALO proces

Het D-HALO proces maakt gebruik van bewezen concepten, een lage temperatuur pyrolyse en een sorptie om de chloor tot 10 ppm in pyrolyse olie te verwijderen. Aanvullende experimenten uitgevoerd aan de Universiteit van Pannonia hebben aangetoond dat deze technieken complementair toegepast kunnen

## OPENBARE VERSIE

worden. De pyrolyse olie kan vervolgens met conventionele technieken opgewerkt worden zodat verdere verwerking in een petrochemische plant of een raffinaderij uitgevoerd kan worden.

### 8.5.4 B-WAX proces

De pyrolyse in het B-WAX proces is een eenvoudigere pyrolyse stap waarbij een mono-stroom plastic gepyrolyseerd wordt in de aanwezigheid van een katalysator. De katalysator wordt aan de plastic smelt toegevoegd en bevat geen zware metalen of andere materialen die de specificaties van de wax negatief kunnen beïnvloeden. Na eenvoudige zuivering (filtratie) kan de wax verder verwerkt worden in technische kwaliteit producten.

## 8.6 Doelstelling product specificatie

Voor de pyrolyse olie wordt de volgende specificatie als doel gesteld na toepassing van de D-HALO techniek. De praktische haalbaarheid moet in de pilot plant fase aangetoond worden. Hierbij wordt de afnemer van de pyrolyse olie betrokken bij het proces en zodoende wordt een verkoopbaar product gerealiseerd.

In deze studie zullen de hier beschreven voeding- en proces parameters verder uitgewerkt worden om tot een afgebakend en werkend proces voor D-HALO en WAX te komen.

### 8.6.1 D-HALO

Tabel 3: target specificaties pyrolyse olie.

	MIN	TYPICAL	MAX
DENSITY (G/ML)	0.80	0.85	0.90
CARBON RESIDUE (WT%)	0	0.5	1
ASH CONTENT (WT%)	<0.1	<0.1	<0.1
FBP (°C)	400	450	500
VISCOSITY (50°C MM <sup>2</sup> /S)	0.5	2.5	5
TOTAL CHLORINE (PPM)	0	10	20
S (PPM)	0	25	100
N (PPM)	0	500	1,000
WATER (WT%)	0	0.025	0.05

Doelstellingen moeten samen met de afnemer vastgesteld worden. Afhankelijk van de doelstellingen kunnen de benodigde rectificaties vastgesteld worden.

### 8.6.2 B-WAX

	MIN	TYPICAL	MAX
MELTING RANGE (°C)	45		90
DENSITY (G/ML)	0.78	0.85	0.95
PENETRATION (MM <sup>-1</sup> )			
VISCOSITY (100C MM <sup>2</sup> /S)	0.5	6	20
ACID VALUE	0	15	25
OIL CONTENT (WT%)	15	22	28
FLASH POINT (°C)	200		

Doelstellingen moeten samen met de afnemer vastgesteld worden. Afhankelijk van de doelstellingen kunnen de benodigde rectificaties vastgesteld worden.

## 8.7 Literatuur optimale parameters en invloed feedstock

1. Adrie Veeken, Pim Hamminga, Zhang Mingshu, Improving Sustainability of Municipal Solid Waste Management in China by Source Separated Collection and Biological Treatment of the Organic Fraction, *Environmental Management and Sustainable Development* (2005) 164-172
2. Azubuike Francis Anene, Siw Bodil Fredriksen, Kai Arne Sætre, Lars-Andre Tokheim, Experimental Study of Thermal and Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste Components, *Sustainability* 10 (2018) 3979
3. Marvin Kusenberg, Andreas Eschenbacher, Marko R. Djokic, Azd Zayoud, Kim Ragaert, Steven De Meester, Kevin M. Van Geem, Opportunities and challenges for the application of post-consumer plastic waste pyrolysis oils as steam cracker feedstocks: To decontaminate or not to decontaminate?, *Waste Management* 138 (2022) 83 – 115
4. H.P. Wenning, The VEBA OEL Technologic pyrolysis process, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 25 (1993) 301 – 310
5. Y. Shiraga, M. A. Uddin, A. Muto, M. Narazaki, and Y. Sakata, Boiling-Point Distributions and Dechlorination of Organic Chlorine Compounds in Oil Obtained from the Degradation of PVC Mixed Plastic, *Energy & Fuels* 13 (1999) 428 – 432
6. Masaaki Fukushima, Hideki Ibe, Keiji Wakai, Eiichi Sugiyama, Hironobu Abe, Beili Wu, Kiyokhiko Kitagawa, Shigenori Tsuruga, Katsumi Shimura, Eichi Ono, Development of dechlorination technology for pyrolysis oil of used plastic containers and packaging, *J. of Waste Resource Recycling* 22 (2011) 178 – 189 (Japanese)
7. CBS, PBL, RIVM, WUR (2019). Samenstelling van huishoudelijk restafval, 1940-2017 [11] (indicator 0141, versie 16 , 6 mei 2019 ). [www.clo.nl](http://www.clo.nl). Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), Den Haag; PBL Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag; RIVM Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven; en Wageningen University and Research, Wageningen.

## 8.8 Integratie van D-HALO en een pyrolyse reactor

### 8.8.1 Integratie van pyrolyse unit in een proces

Pyrolyse van gemengde afval plastics is een empirisch vakgebied. Door de lage warmtegeleiding van plastics, de sterke afhankelijkheid van de viscositeit met de temperatuur, de wisselende samenstelling van de afval plastics, variatie in hoeveelheid en type vervuiling worden pyrolyse reactoren ontwikkeld voor een bepaalde samenstelling van plastics voor een bepaalde doorzet. Door de slechte menging en potentiële temperatuur distributie in de reactor is opschalen een probleem. Schaal vergroting van het proces vindt tot op heden plaats door meer (of minder) identieke reactoren te installeren, gepresenteerd als een “modulair” systeem.

### 8.8.2 Corrosieve verontreinigingen

De aanwezigheid van corrosieve stoffen die tijdens de pyrolyse ontstaan zoals zoutzuur eisen meer van de pyrolyse reactor en alle aansluitingen rondom de pyrolyse reactor, opslagtanks enzovoorts. Zolang de corrosieve stoffen niet condenseren valt de corrosie mee. Op het moment dat condensatie plaats vindt is de corrosie excessief en de integriteit van de apparatuur is gecompromiteerd. Het is van belang om de corrosieve verontreinigingen in het proces gecontroleerd te verwijderen. Er zijn twee opties om de corrosieve verontreinigingen te verwijderen: (voornamelijk) voor de pyrolyse of tijdens de pyrolyse.

### 8.8.3 Partiële verwijdering tijdens de pyrolyse

VEBA Oel GmbH heeft in de jaren '80 en '90 een kool hydrogenerings-plant omgebouwd om daarin ook afval plastic te verwerken. In dit proces wordt in een eerste partiële pyrolyse ongeveer 85% van alle chloor uit het plastic verwijderd. Daarna volgt een hydrotreating stap waarin onder hoge druk (100 bar) de overige 15% chloor wordt verwijderd. Dit proces kan tot 4% PVC (2% chloor) in de voeding verwerken. Waar dit proces een goede olie produceerde, wax het niet economisch rendabel. Het proces leverde 80% olie, 10% gassen en 10% residu op.

### 8.8.4 Verwijdering voor de pyrolyse

Alle Japanse pyrolyse plants en de BASF pyrolyse plant die PVC in de voeding tolereerden opereerden met een twee stappen pyrolyse. In de eerste stap werd bij relatief lage temperatuur (rond de 300 – 350°C) bijna alle chloor (en broom) verwijderd in een extrusie. Dit betekent dat de bulk van de geproduceerde zoutzuur en de excessief corrosieve condities vooral gelimiteerd zijn aan het begin van het proces. De zoutzuur is zeer geconcentreerd in de productstroom van de lage temperatuur pyrolyse omdat het kraken van de grote plastic polymeren nog zeer beperkt is.

Het is van belang om de meerderheid van het chloor (en/of broom) te verwijderen voor de pyrolyse fase omdat recombinatie van zoutzuur (en broomzuur) met olefinen gechloreerde koolwaterstoffen produceert. Hoewel 95% van het chloor verwijderd wordt voor de pyrolyse, wordt er dus nog steeds een paar procent van het chloor uit de voeding in de pyrolyse tot zoutzuur omgevormd. Dit betekent dat ook na de pyrolyse extra zorg besteed moet worden om condensatie te voorkomen.

### 8.8.5 Product afvoer uit de pyrolyse reactor

In de selectie van de pyrolyse reactor is de fase waarin het product afgevoerd wordt van belang. Er zijn twee opties: het product kan in de gas fase of vloeistof fase afgevoerd worden. In de vloeistof fase is in mogelijk wanneer de reactie omstandigheden relatief mild zijn. De reactor temperatuur geeft in principe de ondergrens van het kooktraject van het product aan. Het product is dan een zware stookolie of wax. Wanneer het product in de gasfase wordt afgevoerd kan het product spectrum beïnvloed worden door de druk. De verblijftijd van de producten in de reactor wordt beïnvloed door de druk in de reactor: hoe hoger de druk, hoe langer de verblijftijd. Een langere verblijftijd (hogere druk) verlaagt het molecuul gewicht spectrum van de producten.

### 8.8.6 Coke afvoer uit de pyrolyse reactor

De afvoer van coke uit de pyrolyse reactor kan een groot effect hebben op de hoeveelheid coke die effectief afgescheiden kan worden en dus als product verlies waargenomen wordt. Wanneer de coke als vaste stof wordt afgevoerd, zoals in het design van de pyrolyse plant in Sapporo, is de coke yield (relatief) laag. Wanneer de coke uit de vloeistof wordt afgevoerd, zijn de poriën van de coke gevuld met pyrolyse olie. Intra- en interstitiële pyrolyse olie wordt in dat geval met de coke afgevoerd en ook als "coke" in de massabalans terug gevonden. Voorbeelden van deze operatie zijn de pyrolyse plants in Niigata and Mikasa. De coke yield is twee keer zo hoog wanneer de coke in de vloeistof fase wordt afgevoerd (rond de 20%) dan wanneer de coke als vaste stof uit de reactor wordt verwijderd (ongeveer 10%). De coke yield is onder alle omstandigheden een functie van de samenstelling van de voeding en de conversie, maar de manier waarop de coke wordt afgevoerd uit de reactor kan de coke yield verdubbelen.



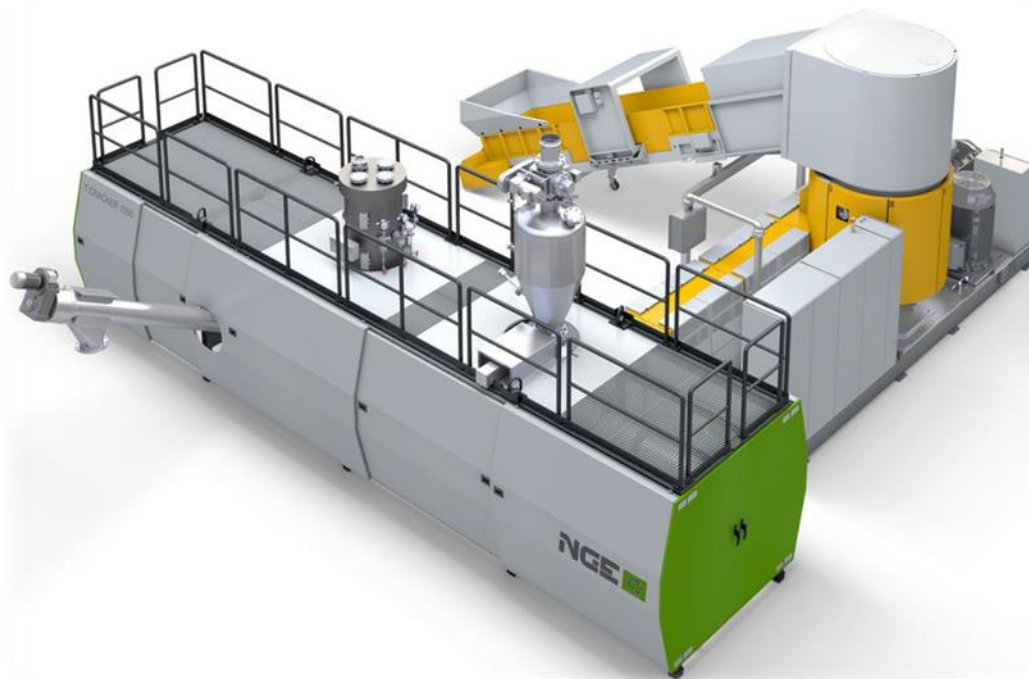
### 8.8.7 NGE pyrolyse reactor

Vanwege de positieve ervaringen in het verleden is in deze studie de NGE reactor opgenomen, in principe is het D-HALO proces echter niet gebonden aan een specifiek merk. Het D-HALO proces is in principe geschikt te maken voor vele typen pyrolyse units.

NGE biedt de mogelijkheid om een elektrisch verwarmde pyrolyse reactor met een capaciteit van 500 ton per jaar voor het ontwikkelen van het D-HALO proces te gebruiken). Het NGE pyrolyse systeem bestaat uit een extruder en een rotary kiln reactor.

Een NGE T-Cracker pyrolyse unit met een doorzet van 1000 kg/uur heeft ruwweg een energie consumptie van 700 kW. De opstelling heeft geen plastic versnipperaar en droog sectie, maar wordt geleverd met een scrubber om de lichte product gassen te reinigen. De pyrolyse reactor kan tot 550°C geopereerd worden, de extruder heeft een beoogde operatie temperatuur van 300 – 350°C.

De coke wordt als droge stof uit de reactor afgevoerd. Zoals hiervoor beschreven minimaliseert dit de verliezen van plastic naar coke en residu. De producten worden in de gas / damp fase afgevoerd.



Figuur 8.1: NGE T-Cracker

### 8.8.8 Aansluiting van D-HALO op de pyrolyse reactor

Het D-HALO proces bestaat uit een voor- en een nabehandeling van de koolwaterstoffen rond de pyrolyse reactor. Voor de pyrolyse reactor wordt de plastic smelt bij 300 – 350°C in een gecontroleerd tijdsbestek behandeld om het merendeel van de chloor uit de plastic smelt te verwijderen (95% +). Dit is vergelijkbaar met de voorbehandeling zoals die in het BASF proces en in de fabrieken in Niigata,

## OPENBARE VERSIE

Sappora en Mikasa werd uitgevoerd. Het eindproduct is pyrolyse olie. De pyrolyse olie moet nabehandeld worden door hydrotreating.

### 8.8.9 D-HALO voorbehandeling voor de pyrolyse stap

Plastic wordt in het D-HALO proces geïntroduceerd als snippers gemengde plastics (flakes). Plastic wordt gesmolten en in een serie geroerde tank reactors bij lage temperatuur gedeeltelijk gekraakt om chloor als zoutzuur te verwijderen. Deze reactoren worden voor de pilot plant fase in glas uitgevoerd. Glas is inert voor zoutzuur. Omdat glas fragiel is, is het geen optie voor een industriële uitvoering van het proces. Hier kan een reactor die gecoat is met titanium gebruikt worden, zoals in de bereiding van chlorohydról. Een alternatieve materiaalkeuze voor de lage temperatuur pyrolyse reactoren kan een redelijk resistente staal soort zijn mits het de reactoren altijd een minimale temperatuur hebben waarbij zoutzuur nergens kan condenseren, of alleen nadat de reactor met een neutraliserende stof is gespoeld, zoals bijvoorbeeld met een amine.

### 8.8.10 Behandeling van de product stromen met zoutzuur

De afgassen van de lage temperatuur pyrolyse stap is een stroom die voor de helft uit zoutzuur bestaat. Deze stroom is zeer corrosief. Hier zijn twee opties om deze product stroom te behandelen. De eerste is de volledige oxidatie van de lichte gassen en zoutzuur bij hoge temperatuur, waarbij alle koolwaterstoffen en gechloreerde koolwaterstoffen omgezet worden naar water, koolzuur gas en zoutzuur. De zoutzuur wordt vervolgens in een speciale absorptie kolom afgevangen en als 20% procent zoutzuur gewonnen. Door de verontreinigingen is dit een zuur wat in de staal industrie gebruikt kan worden, maar niet in chemische processen. Een tweede optie is de verwijdering van zoutzuur uit deze stroom in een absorptie kolom, vergelijkbaar met het vorige schema, waarbij een mengsel van koolwaterstoffen en gechloreerde koolwaterstoffen overblijft. Deze stroom kan gezuiverd worden via selectieve adsorptie van de gechloreerde koolwaterstoffen of door hydrotreating. De relatief hoge concentratie gechloreerde koolwaterstoffen in de product stroom, de potentiële vervuiling van de zoutzuur met koolwaterstoffen en de lage product-waarde van de koolwaterstoffen na hydrotreating zijn de oorzaak dat de tweede route alleen in uitzonderlijke situaties en na extensieve validatie beschouwt kan worden. De BASF plant heeft mogelijk de tweede route gebruikt (verwijdering van zoutzuur zonder volledige verbranding). In Niigata, Mikasa en Sapporo is de volledige verbranding de route die toegepast is.

### 8.8.11 Materiaal selectie bestendig tegen corrosie

De sectie die de stromen met zoutzuur kunnen verwerken bij lage temperaturen bestaat uit exotische materialen die volledig corrosie bestendig zijn. Er zijn een handvol bedrijven wereldwijd die voldoende gespecialiseerd zijn in het ontwerp en executie van deze ontwerpen, zoals turn-key skids en grotere proces secties onder condities die de vorming van dioxines uitsluit. De zoutzuur stromen zijn zeer beperkt in omvang wanneer ze vergeleken worden met een zoutzuur fabriek..

### 8.8.12 Katalytische pyrolyse

Na de partiële pyrolyse stap kan een katalysator worden toegediend om het pyrolyse proces een grotere opbrengst van specifieke producten te geven, zoals een grotere opbrengst aan aromaten. Omdat de katalysator overblijft in het residu is het van belang dat de katalysator aan een aantal voorwaarden voldoet. De katalysator wordt niet teruggewonnen, dus hij moet goedkoop en actief zijn. De katalysator kan geen dure materialen bevatten (zoals edelmetalen) en het proces om de katalysator te maken moet goedkoop zijn. Om de hoeveelheid residu beperkt te houden (en de warmte inhoud van het residu niet te nadelig te beïnvloeden) kan er maar een paar procent katalysator op de voeding worden toegevoegd.

## OPENBARE VERSIE

Omdat de katalysator in het residu achterblijft mag de katalysator geen exotische materialen bevatten die giftig zijn, schadelijk voor het milieu zijn of overige negatieve invloeden kunnen hebben, zoals bijvoorbeeld in de verbranding van het residu de vorming van gevaarlijke stoffen bevorderen.

De katalysator moet om voldoende actief te zijn in het proces een hoge toegankelijkheid hebben, een hoog extern oppervlak, een uitgebreid en goed ontworpen porie-netwerk. Dit laatste helpt ook om de katalysator minder gevoelig te maken voor de-activatie door de vorming van coke. De katalysator moet coke selectief zijn. De katalysator moet ook relatief ongevoelig zijn voor de verontreinigingen die de voeding met zich meebrengt.

Waar het gebruik van katalysatoren het pyrolyse proces kan bijsturen en de vorming van waardevolle producten vergroten, zijn de kandidaten voor geschikte materialen zeer beperkt.

### 8.8.13 Separatie van vaste stoffen en product stromen

In de pyrolyse unit wordt coke gevormd, zoals hiervoor beschreven. De coke kan onder meer uit zeer fijn stof bestaan. Deze coke en overige vaste stof verontreinigingen wordt door de product stromen meegevoerd en kan verstoppingen in leidingen veroorzaken. Het is daarom noodzakelijk om cyclonen te gebruiken die na de pyrolyse unit worden geïnstalleerd. Voor de operatie van cyclonen is het van belang dat de gas flow zo constant mogelijk te houden. Wanneer de gas flow te laag is, is de scheiding van de fijne stofdeeltjes onvoldoende en gaat een relatief groot gedeelte van de allerkleinste deeltjes mee met de gassen. Dit veroorzaakt verstoppingen in leidingen, afsluiters en reactoren. Een constante operatie (en plastic voeding in het proces) is daarom noodzakelijk. In het design kan het wenselijk zijn om een continue inerte stroom bij te mengen om schokken in doorzet op te vangen.

### 8.8.14 D-HALO nabehandeling na de pyrolyse stap

In de pyrolyse van gemengde plastics in de pyrolyse reactor worden koolwaterstoffen in de vorm van lichte gassen, benzine, diesel, zware stookolie en wax. Deze producten zijn verontreinigd met zoutzuur en gechlloreerde koolwaterstoffen. Het is van belang om het zoutzuur zo snel mogelijk van de koolwaterstoffen te scheiden. Hier zijn meerdere redenen voor. Als zoutzuur niet meer in de product stroom zit is de corrosiviteit van de product stroom aanzienlijk lager. Een andere belangrijke reden is dat gechlloreerde koolwaterstoffen gevormd worden uit recombinatie reacties van zoutzuur en olefinen. Omdat het product een gekraakte koolwaterstof is, is de concentratie van olefinen in de product stroom hoog en bevat deze stroom veel reactanten om gechlloreerde koolwaterstoffen te vormen.

Er zijn meerder mogelijkheden om zoutzuur te verwijderen. Omdat de concentratie laag is, is het mogelijk om met conventionele sorbents zoutzuur af te vangen uit de product stroom. Een alternatief is om in de zware componenten uit de product stroom te verwijderen (wax, zware stookolie, diesel) in een scrubber de lichtere producten over een gepakt bed of door een tweede scrubber te leiden.

Het gebruik van een gepakt bed met een (aard)alkalisch sorbent, naast bijvoorbeeld een zeoliet voor de zoutzuur absorptie heeft een aanvullend voordeel. Wanneer er PET in de voeding aanwezig is, is terephthal zuur een van de producten uit de pyrolyse. Dit zuur slaat neer wanneer de temperatuur onder de 400°C daalt. Dit is een probleem dat verschillende commerciële operaties hebben opgelost door gebluste kalk toe te voegen aan de voeding. Een nadeel van de toevoeging van gebluste kalk aan de voeding is dat het de hoeveelheid residu verdubbeld, en de calorische waarde halveert.

### 8.8.15 Pyrolyse olie nabehandeling tot product op commerciële schaal

Pyrolyse olie is als gevolg van de verontreinigingen niet direct te verwerken in vervolg processen, zoals stoomkraken, noch is het mogelijk om het weg te mengen met conventionele stromen in een raffinaderij of petrochemische plant. Hiervoor is hydrotreating als nabehandeling nodig. Deze behandeling is zeer wel mogelijk. Op dit moment zijn er twee commerciële partijen die claimen hydrotreating van koolwaterstoffen verontreinigd met chloor te kunnen uitvoeren: Haldor Topsoe en Sulzer.

De hydrotreating unit bestaat uit meerdere proces eenheden. Deze kunnen uitgebreid worden met een water-gas-shift reactor voor de vorming van waterstof wanneer geen waterstof uit een raffinaderij netwerk verkregen kan worden. Afhankelijk van de omvang kan er recycle van waterstof uit de regeneratie van de absorptie vloeistof plaatsvinden om zoutzuur en waterstofsulfide af te vangen.

## 8.9 D-HALO Pilot plant

POR heeft een Basic Engineering Design studie gedaan voor het ontwerp van de pilot plant. De pilot plant heeft de mogelijkheid om alle belangrijke proces variabelen te onderzoeken, met twee belangrijke uitzonderingen (zie hierna, Pakket 1 en 2).

Waar voor een commerciële operatie het van belang is om een stabiel product af te leveren, is het voor een pilot plant belangrijk om het proces te ontwikkelen en alle proces variabelen afdoende in kaart te brengen. In de pilot plant fase worden een 2-tal proces stappen niet uitgevoerd die in een 15 of 30 kta (kiloton per jaar) pyrolyse fabriek als compleet pakket door commerciële partijen aangeleverd worden.

### 8.9.1 Pakket 1: Zoutzuur absorptie

De eerste is de absorptie van zoutzuur als 20% oplossing. In een commerciële plant van ca. 15 kta afvalplastic verwerking wordt waarschijnlijk een skid gebruikt (kosten ongeveer 2 miljoen euro). In de pilot plant worden de lichte gasstromen met zoutzuur bij hoge temperatuur verbrand, de verbrandingsgassen worden afgekoeld en met een alkalische oplossing in een scrubber afgevangen. De massa- en energiebalansen laten zien dat deze oplossing een grote hoeveelheid afvalwater oplevert en relatief veel energie voor de intensieve koeling vereist. Dit is een pilot plant-specifiek probleem. In een commerciële fabriek kan de energiehuishouding veel eenvoudiger geoptimaliseerd worden omdat het proces vastligt en niet de flexibiliteit vereist die nodig is in de pilot plant.

### 8.9.2 Pakket 2: Hydrotreating

De pyrolyse olie moet onderworpen worden aan hydrotreating. Dit is niet mogelijk om dit zelfstandig te ontwerpen, hier zijn gespecialiseerde partijen die de expertise hebben, en de benodigde laboratoria om dit onderzoek te doen. Een gezamenlijk onderzoekstraject moet ingegaan worden waarbij representatieve pyrolyse oliemonsters geleverd moeten worden, waarna de proces licensor een fabriek kan bouwen met een gegarandeerde eindproduct kwaliteit.

### 8.9.3 Integratie van de pilot plant

POR heeft een engineeringbureau en mechanische en elektronische werkplaats die zelfstandig ontwerpen van beperkte schaal kunnen maken. POR heeft expertise om de pilot plant te ontwerpen met de inpassing van de NGE pyrolyse reactor, te bouwen en te opereren. Van belang hierbij is ook het milieuvergunningstraject waar POR een uitgebreide staat van dienst heeft.

## 8.10 Productie van wax uit afvalplastic

### 8.10.1 Wax productie

Het maken van wax uit homogene stromen van (afval-) plastics is een proces wat sinds de jaren '50 bestudeerd is door verschillende bedrijven. Deze processen zijn commercieel toegepast met virgin plastic. Het gebruik van afval plastic leverde door de verontreinigingen naast beperkingen in de toepassingen van de producten ook problemen in de operatie op.

POR heeft een analyse gemaakt van de verwachte CAPEX en OPEX van een fabriek die 15 kta homogene stromen polyethyleen afval plastic omzet in wax.

### 8.10.2 Polyethyleen voeding

De polyethyleen afval plastic is van een relatief hoogwaardige kwaliteit en kan tegen een marktprijs verkregen worden. Dit wordt onder meer geleverd door specialistische afval sorteerdere die stromen leveren met een aandeel van 95% of 98% PE. De PE wordt geleverd in balen (zie hoofdstuk 7). Als alternatief kan een monostroom polypropyleen (PP) genomen worden, met een beperkt toegestane vervuiling van PE.

### 8.10.3 Reactie parameters

Door het kraken van plastic onder lagere druk en hogere temperatuur wordt er een lager molecuul gewicht was gemaakt, wanneer de wax in de gas fase afgevoerd wordt. Door de reactie bij lagere temperatuur uit te voeren onder atmosferische druk blijft het product in de vloeistof fase en heeft de wax een hoger molecuul gewicht.

De molecuul gewichtsverdeling van de wax is gevoelig voor de verblijftijd. Door een grote verblijftijdsspreiding zal de wax teveel zware en teveel lichte componenten bevatten. Controle van de reactie tijd is daarom noodzakelijk. In een continu doorstroomde geroerde tank is de verblijftijdsspreiding groot. Deze wordt ingeperkt door een serie geroerde tank reactoren te gebruiken. De eenvoudigste methode is om het proces in batch mode te opereren, omdat daarmee de reactie tijd exact bepaald kan worden.

### 8.10.4 Materiaal selectie

Door de keuze voor afvalplastics met geringe hoeveelheid verontreinigingen en het ontbreken van corrosieve verontreinigingen is de materiaal selectie voor de apparatuur in de wax fabriek eenvoudiger en veel goedkoper. Hiervoor zijn bijvoorbeeld staalsoorten als 304SS of 316SS goede keuzes.

### 8.10.5 Katalysator

Het maken van wax uit plastic vindt plaats door thermische pyrolyse. Het gebruik van een katalysator kan het kraken van plastic naar wax versnellen. Door de hoge viscositeit van het plastic is het lastig om de katalysator in de plastic smelt in te mengen, maar door de lage viscositeit van de was na de reactie is de fysische scheiding na de reactie eenvoudig.

### 8.10.6 Product opslag

In het hele proces is het van belang dat lucht, voornamelijk zuurstof, vermeden wordt. Dit is van belang om explosie en brand te voorkomen. Maar ook bij de opslag van het product moet zuurstof vermeden worden omdat deze het product oxideert. Het gebruik van koper in legeringen moet vermeden worden. De aanwezigheid van koper katalyseert de oxidatie van was. Verder moet de was bij zo laag mogelijke temperatuur opgeslagen worden.

### 8.10.7 Hydrotreating

De was moet onderworpen worden aan hydrotreating indien de zeer zuivere varianten geproduceerd worden. Dit is niet mogelijk om dit zelfstandig te ontwerpen, hier zijn gespecialiseerde partijen die de expertise hebben, en de benodigde laboratoria om dit onderzoek te doen. Daarnaast speelt de schaal waarop geproduceerd wordt een rol. Een gezamenlijk onderzoekstraject moet ingegaan worden waarbij representatieve pyrolyse oliemonsters geleverd moeten worden, waarna de proces licensor een fabriek kan bouwen met een gegarandeerde eindproduct kwaliteit.

## 9 Resultaten

### 9.1 CO<sub>2</sub> Berekeningen

#### 9.1.1 Samenvatting

Aan het eind van het gebruiksleven van plastic moet het als afval verwerkt worden. Hier worden een aantal alternatieven vergeleken: vuilstort, verbranding, verbranding met terugwinning van warmte en energie en de vorming van pyrolyse olie of de vorming van was. Voor de vuilstort en verbranding zijn literatuur data gebruikt. Voor de pyrolyse olie en was zijn eigen berekeningen gebaseerd op de engineering data van POR uitgevoerd. Voor de milieu belasting is voor CO<sub>2</sub> equivalenten gekozen, zoals besproken in de studie door Eriksson et al. <sup>2</sup> Deze waardes wijken af van stoichiometrische berekeningen, omdat meerdere emissies bij de verbranding meegenomen worden, en niet alleen de reactie zelf maar ook overige effecten, zoals bijvoorbeeld potentiële vervangingseffecten, beschouwd worden.

- Wanneer het plastic als afval gestort wordt is de CO<sub>2</sub> emissie 250 g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> plastic.
- Voor verbranding in een CHP plant is de CO<sub>2</sub> emissie 343 g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> plastic. Verbranding van afval plastics produceert CO<sub>2</sub>. Wanneer effecten zoals verdringing van gas, olie of kool in elektriciteits- en warmte productie in ogenschouw wordt genomen dan kan onder omstandigheden de verbranding van plastics een netto negatieve CO<sub>2</sub> emissie geven, de effectieve CO<sub>2</sub> emissie van gemengde plastics kan variëren tussen net negatief en 4600 g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> plastic.
- Wanneer pyrolyse olie wordt gemaakt van gemengde plastics wordt 1700 - 1900 g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> plastic geproduceerd. Dit is een CO<sub>2</sub> reductie van 33.4 tot 25.4% ten opzichte van verbranding, dat volgens Eriksson 2547 g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> plastic produceert.
- Voor het maken van wax is de emissie 630 g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> plastic. Dit is een CO<sub>2</sub> reductie van 75% ten opzichte van verbranding.

#### 9.1.2 CO<sub>2</sub> balans voor plastic pyrolyse

Aan het einde van het bruikbare leven van een plastic voorwerp moet het verwerkt worden. Hier zijn verschillende mogelijkheden afhankelijk van het type plastic, potentiële vervuilingen en de methode waarop het afval verwerkt wordt. Een Life Cycle Analysis is de beste methode om de gevolgen van de verwerking van plastic naar pyrolyse olie te evalueren. Dit verschaft een overzicht in de totale impact die een product heeft en de gevolgen van alternatieven. Het is belangrijk om bij de beschouwing van deze getallen te bedenken dat bij Life Cycle Analysis en CO<sub>2</sub> emissie getallen er een grote variatie is in verschillende publicaties. De verschillen worden veroorzaakt door verschillende uitgangsscenario's te kiezen als base case. Daarom kunnen getallen die met oprechte analyses geproduceerd zijn af en toe tot afwijkende resultaten leiden.

In de afgelopen decennia is er meer focus gekomen op de effecten van de productie van materialen en verwerking ervan aan het einde van het gebruik. Dit gaat verder dan alleen de effecten van het beheersen van vervuiling. Nu wordt er nadruk gelegd op alternatieven om vervuiling te voorkomen. Dit geldt voor emissies naar lucht, water en land, inclusief broeikasgassen, biodiversiteit en energie gebruik in de levenscyclus, een analyse van het complete perspectief. Er is nu erkenning dat een product in elk stadium van zijn leven het milieu beïnvloedt, van de winning van de voeding in de fabricage, distributie, gebruik en tot met de verwerking van het product als afval.

## OPENBARE VERSIE

De plastics die hier voor de analyse beschouwd worden zijn polyethyleen, polypropyleen, polystyreen, met verontreinigingen van polyvinylchlorides, inclusief de additieven die ze bevatten. Voor PET zijn recycle faciliteiten opgezet die al jaren succesvol in operatie zijn.

### 9.1.3 Afval hiërarchie

Binnen de Europese Unie, zowel als in vele andere landen is de afval regelgeving gebaseerd op de volgende hiërarchie (in volgorde van wenselijkheid) 1:

1. Waste prevention
2. Re-use of products
3. Recycling van het materiaal
4. Herwinning van energie
5. Storten van afval

De analyse beschreven in dit hoofdstuk beschrijft de opties 3 – 5 voor plastic afval dat gebruikt is en niet direct herbruikbaar is.

### 9.1.4 Van aardolie naar plastic naar afval naar pyrolyse olie

Plastic wordt gevormd uit aardolie. Aardolie wordt gewonnen wereldwijd. De impact van de oliewinning verschilt per locatie. In sommige locaties is olie makkelijk te winnen, in andere locaties kost oliewinning meer energie. De olie wordt per schip, pijplijn en treinwagons vervoerd naar de raffinaderij waar de olie verwerkt wordt. Op de raffinaderij wordt de olie opgewerkt tot fracties die verwerkt kunnen worden in een stoomkraker. In een specifiek geval kan ethaan, een bijproduct van schalie-gas winning, gebruikt worden in een stoomkraker. De producten van de stoomkraker worden gezuiverd tot ethyleen, propyleen en overige producten. In een stoomkraker is de energie-huishouding zeer kritisch, omdat er in zo'n complex temperaturen van -100 tot 800°C heersen. De ethyleen en propyleen wordt via pijpleidingen naar de fabriek waar plastic gemaakt wordt. Deze fabrieken maken typisch plastic granulaat.

Het plastic granulaat wordt vervoerd naar de bedrijven die het plastic vormgeven, bijvoorbeeld door er folie, een tuinstoel, de behuizing voor een tv of een van vele andere mogelijke toepassingen. Hier worden typisch additieven toegevoegd, die elk hun eigen toeleveringsketen hebben. Voorbeelden van plastic additieven zijn kleurstoffen, was die de kleurstoffen beter inmengt, vlamvertragers en weekmakers om het plastic makkelijker vorm te geven. Deze producten worden naar distributiecentra getransporteerd en vandaar naar de verschillende winkels.

Aan het einde van het leven van het product wordt het afgevoerd met afval. Het afval kan separaat of gemengd opgehaald worden. Hier zijn verschillende paden voor het plastic: vuilnisbelt, verbranding, verbranding met energiewinning, mechanisch en chemisch recylen.

In het geval van recylen moet het plastic gescheiden worden. Het afval wordt naar een sorteercentrum gebracht waar het afval gescheiden wordt in verschillende stromen. Het plastic wordt daarna naar type gescheiden. Dit kan manueel gebeuren, op een lopende band met een scanner, op dichtheid enzovoorts. Het gescheiden plastic kan nu verwerkt worden in mechanisch – en chemisch recylen, afhankelijk van de homogeniteit van de plastic en de additieven. Voor de impact van mechanisch recylen is een goed overzicht te vinden in een rapport van plastic recyclers <sup>3</sup>.

In geval van chemisch recylen is het product pyrolyse olie. Plastic wordt gekraakt tot pyrolyse olie. De pyrolyse olie wordt gefractioneerd en moet verder opgewerkt worden voordat het in raffinaderij of chemische plant verder gebruikt kan worden. De pyrolyse olie ondergaat hydrotreating om olefinen en



## OPENBARE VERSIE

andere onverzadigde verbindingen te verwijderen, samen met heteroatomen zoals zwavel, stikstof en zuurstof.

## 9.2 Berekening CO<sub>2</sub> emissies

Elke stap vereist een analyse van de materialen die nodig zijn (en de energieconsumptie om ze te verkrijgen), de emissies naar de omgeving, effect op biodiversiteit en de energie geconsumeerd in de stap zelf. Voor de CO<sub>2</sub> emissies is het ook van belang om de energie consumptie te kunnen vertalen naar CO<sub>2</sub>, omdat biomassa, kernenergie en een kolencentrale elk een ander emissie profiel hebben.

De Life Cycle Analysis geeft inzicht in de actuele (milieu) kosten van een product en een evaluatie van de potentiële winst om alternatieve routes te bevorderen.

De berekening van de uitgespaarde CO<sub>2</sub> voor verschillende methodes van recyclen en verwerken van afval plastics is door veel verschillende partijen onderzocht, waarbij hier slechts een beperkt aantal worden gepresenteerd. De studies variëren van het produceren van pyrolyse olie en het maken van een vergelijking met alternatieven tot en met het vergelijken van het verwerken van pyrolyse olie tot petrochemicaliën en het vergelijken hiervan met de vorming van deze producten uit (conventionele) aardolie<sup>9</sup>. Elke studie hanteert andere getallen voor elke separate stap. Voor een deel licht dit aan lokale omstandigheden die sterk kunnen verschillen (zie de vergelijkingen die Eriksson maakt). Maar voor een deel ligt dit ook aan keuzes die gemaakt worden om positieve en negatieve effecten toe te kennen en in de berekening te betrekken. Over elke aanname kunnen oprechte debatten gevoerd worden. Dat is niet het doel van onze analyse. Hier hebben we een eenvoudige aanpak gehanteerd voor onze analyse: we hebben de emissies berekend voor pyrolyse en voor de vorming van wax en deze vergeleken met literatuurwaardes voor landfill en volledige verbranding in een CHP plant.

### 9.2.1 Plastic als bron voor (pyrolyse) olie

Wanneer plastic afval als alternatief voor olie wordt gezien is het van belang om te realiseren dat het hier om alternatieven gaat aan het einde van de levenscyclus van het plastic product. Dan zijn van belang de energie input en materiaal verliezen die nodig zijn om uit olie plastic te maken, te distribueren, op te halen en scheiden, omzetten naar pyrolyse olie en daarna opwerken tot een olie die gebruikt kan worden in de (petro)chemische industrie.

Omdat het gaat om alternatieven aan het eind van het leven van plastic moet de verwerking tot pyrolyse olie afgezet worden tegen de al eerder genoemde alternatieven:

- vuilnisbelt
- afvalverbranding
- afvalverbranding met energie productie

Voor pyrolyse olie en de overige alternatieven voor plastic verwerking aan het levenseinde zijn alle stappen tot aan het ophalen van afval identiek met betrekking tot de CO<sub>2</sub> voetprint.

### 9.2.2 Vuilnisbelt

De meest geringe CO<sub>2</sub> emissies voor plastic is per definitie de vuilnisbelt. In dit geval zijn er bijna alleen de collectie kosten van het afval. De kosten voor het milieu zijn hierbij aanzienlijk, omdat de

## OPENBARE VERSIE

biodegradeerbaarheid van plastic zeer slecht is. De afbraak van polyolefinen vormt voornamelijk microplastics. Waar 25 jaar geleden dit nog als een potentieel acceptabele oplossing werd gezien, worden de effecten van microplastics nu aanzienlijk meer zorgwekkend ingeschat<sup>6-8</sup>. Hierdoor is de oplossing van storten op de vuilnisbelt waarschijnlijk de meest negatieve voor het milieu en biodiversiteit. Additieven, zoals zware metalen, worden hierbij ook niet separaat afgevangen.

De getallen gepresenteerd in deze analyse zijn overgenomen van de analyse van Eriksson en Finnveden<sup>2</sup>. Zoals eerder aangegeven, maakt het voor de analyse niet uit welke getallen gebruikt zijn om tot de vorming van het afval plastic te komen omdat deze als begin punt worden genomen voor alle verwerkings-alternatieven.

In de analyse van Eriksson et al.<sup>2</sup> is aangenomen dat 3% van het plastic in de eerste eeuw na de stort degradeert door chemische reacties. De producten van deze reacties zijn 70% methaan met een opbrengst van 0.025 kg CH<sub>4</sub> / kg plastic. De auteurs hebben in hun analyse aangenomen dat 50% van het gas afgevangen wordt en gebruikt in een gas motor voor energie productie. De gasmotor heeft een aangenomen efficiëntie van 85% waarbij 37.5% van de energie elektriciteit vormt. Naast de emissie van CO<sub>2</sub> stoot de gas motor ook minieme hoeveelheden methaan en NO<sub>2</sub> uit. De vuilstort heeft additionele CO<sub>2</sub> emissies voor compacteren en het creëren van een gas- en vloeistofdichte afdekking. Wanneer het plastic als afval gestort wordt is de CO<sub>2</sub> emissie 250 g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> plastic.

### 9.2.3 Afvalverbranding voor stadsverwarming vs. elektriciteitsproductie

Het effect op het milieu door het verbranden van gemengde plastic is vaak te prefereren boven vuilstort. Het is een slechte keuze wanneer afval verbranden recycling vervangt. Eriksson et al.<sup>4</sup> hebben een uitgebreide analyse gedaan naar de effecten van de rol die gemengde plastics in afvalverwerking kunnen spelen en hun respectieve bijdrages aan CO<sub>2</sub> en overige broeikasgasemissies.

De grootste CO<sub>2</sub> emissies aan het einde van het gebruiksleven van plastic wordt geproduceerd wanneer het als afval verbrand wordt. Door de behandeling van de afgassen, economisch mogelijk door de grote schaal waarop de afval verbranding plaats vindt, is de belasting aan het milieu voornamelijk beperkt tot de emissie van CO<sub>2</sub>. Extra aandacht moet besteed worden wanneer er polyurethanen en polyvinylchlorides aanwezig zijn. De verbrandingscondities en nabehandeling moeten verontreinigingen in de verbrandingsgassen zoals CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> en dioxines verwijderen. De studie van Eriksson<sup>2</sup> geeft aan dat wanneer gemengde plastics in een CHP (Combined Heat and Power) fabriek verbrand worden, de plastics 343 g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> plastic uitstoten. Let wel, deze waarde is sterk afhankelijk van wat als basis case genomen wordt, dat is in dit geval het vermijden van het verbranden van olie voor en het gebruik van kolen voor het opwekken van elektriciteit. Wanneer als basis lijn het gebruik van hernieuwbare energie wordt vergeleken (biomassa en wind-energie) dan is de CO<sub>2</sub> belasting 2546 g CO<sub>2</sub> / kg plastic.

Een interne studie laat zien dat de grootste hoeveelheid energie als warmte kan worden teruggewonnen, en een beperkte fractie gebruikt kan worden om elektriciteit te genereren (15 – 25%). Deze interne studie (ook al betreft het hier de afgassen van de kraak producten en niet de volledige plastic stroom) en Eriksson laten zien dat er kleine verschillen zijn in de milieu impact wanneer gemengde plastics gebruikt worden voor warmte productie versus warmte en elektriciteit productie.

Stadsverwarming is een aantrekkelijke manier om de overige energie te gebruiken omdat het relatief lage temperatuur stromen betreft. Dit betekent dat het merendeel van de energie uit de verbranding benut kan worden.

### 9.2.4 Recycling tot pyrolyse olie

Voor de analyse van de CO<sub>2</sub>-emissie wanneer pyrolyse olie wordt gemaakt uit gemengde afval plastics wordt gepubliceerde data van de SPR recycling plant in Sapporo en Mikasa gebruikt <sup>5</sup>. Dit zijn data van faciliteiten die jarenlang commercieel geopereerd hebben.

Mikasa was een kleine fabriek (6 kta) en leverde als eindproducten 17% cokes en 29% pyrolyse olie op. De fabriek genereerde genoeg energie voor de operatie door de verbranding van de afgassen (24%) en olie (29%). De effectieve CO<sub>2</sub> productie per kg plastic is hier 1689 g CO<sub>2</sub> / kg plastic. Dit is een reductie van 33.4% ten opzichte van verbranding zonder warmte terugwinning Sapporo was een grotere fabriek die 21% van de producten als pyrolyse olie en 17.5% van de producten als coke leverde voor aan externe partijen. De effectieve CO<sub>2</sub> productie per kg plastic is hier 1933 g CO<sub>2</sub> / kg plastic. Dit is een reductie van 25.4% ten opzichte van verbranding zonder warmte terugwinning (zie *Eriksson et. al.*<sup>2</sup>).

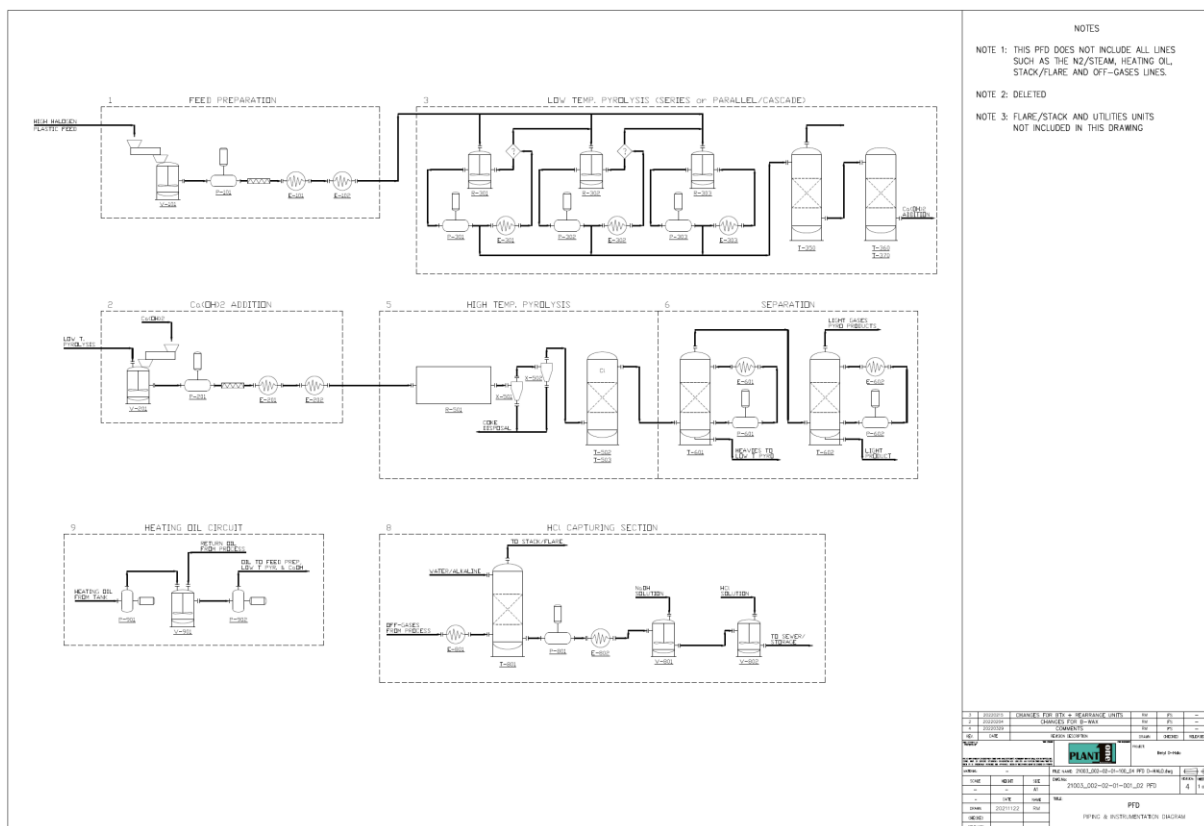
### 9.2.5 Recycling tot wax

Voor de analyse van de CO<sub>2</sub> emissie wanneer wax wordt gemaakt uit gemengde afval plastics wordt engineering analyse van POR gebruikt. Een 15 kta (input plastic afval) fabriek levert als eindproduct ca. 75% wax op. De fabriek opereert op de afgassen (24%) en coke (1%). De effectieve CO<sub>2</sub> productie per kg plastic is hier 786 g CO<sub>2</sub> / kg plastic. Dit is een reductie van 75.3% ten opzichte van verbranding zonder warmteterugwinning (zie *Eriksson et. al.*<sup>2</sup>).

## 9.3 D-HALO Pilot installatie budget studie

POR heeft een uitgebreide studie gedaan naar een 500 ton per jaar plastic intake D-HALO pilot plant, met als onderdelen een meer uitgebreide analyse van de kosten van de verschillende onderdelen van de pilot plant, de proces beschrijving, de PFD's (process flow diagrams) in de Bill of Materials, en een Design Safety Hazard Review.


## OPENBARE VERSIE



Figuur 9.1: Process Flow Diagram van de D-HALO pilot plant.

### 9.3.1 CAPEX van de D-HALO pilot plant (500 ton per jaar)

De CAPEX van de D-HALO pilot plant zoals ontworpen door POR is gebaseerd op de aanschaf van nieuwe apparatuur en instrumentatie. Hoewel de prijs van de apparatuur indicatief zijn voor de aanschaf van nieuwe apparatuur, zijn er afgelopen jaar aanzienlijke schommelingen in de prijzen geweest door variatie in materiaal prijzen en tekorten aan specifieke producten, beduidend meer dan afgelopen jaren gebruikelijk was. Voor veel onderdelen is het mogelijk om gebruikte of refurbished onderdelen te gebruiken zonder aan functionaliteit in te boeten. De engineering uren zijn een afschatting van de verwachte uren die nodig zijn voor het volledige engineering proces inclusief constructie en commissioning.

<b>CAPEX</b>			
<b>Main Equipment</b>	Number	€/number	Total
	<b>Subtotal</b>		<b>€ 479,800</b>
<b>Instrumentation</b>	Number	€/number	Total
	<b>Subtotal</b>		<b>€ 61,100</b>
<b>Valves</b>	Number	€/number	Total
	<b>Subtotal</b>		<b>€ 21,000</b>
<b>Plot</b>			Total
	<b>Subtotal</b>		<b>€ 81,750</b>
<b>Engineering</b>	Hours	€/hour	Total
	<b>Subtotal</b>		<b>€ 148,660</b>
<b>Production Costs</b> Piping & Construction			Total
	<b>Subtotal</b>		<b>€ 450,000</b>
<b>Total CAPEX Costs</b>			<b>€ 1,221,310</b>

### 9.3.2 CAPEX pyrolyse unit

De grootste kosten voor de pilot plant is de pyrolyse unit en zijn aansturing. Met een producent is overlegd om een unit ter beschikking te stellen voor het onderzoek naar de pyrolyse van gemengde afval plastics. Informeel is een schatting gemaakt van de kosten van deze unit inclusief aansturing en heropbouw in Nederland, deze bedragen €1.5 mln.

### 9.3.3 CAPEX automatisering

De opstelling zoals hier ontworpen heeft een laag niveau van instrumentatie/automatisering. Derhalve zijn geen additionele investeringen begroot. Het uiteindelijke ontwerp zal meerdere lagen van veiligheid bevatten. Door een hogere mate van automatisering toe te passen zal de operatie aanzienlijk vereenvoudigd worden. Hoewel dit de CAPEX kosten aanzienlijk verhoogd, leidt dit tot een meer stabiele operatie, een lagere belasting van de operators en een hogere veiligheid in het proces.

### 9.3.4 CAPEX verbranding van de afgassen

De afgassen die zoutzuur en (chloorhoudende) koolwaterstoffen bevatten, voornamelijk LPG en lichte benzine, moeten vernietigd worden tot zoutzuur, water en CO<sub>2</sub> bij een proces temperatuur van rond de 1200 a 1250 graden om de vorming van dioxines te voorkomen. Na de thermische vernietiging dienen de rookgassen afgekoeld te worden door middel van water. Na een afkoelproces gaan de rookgassen door een was toren waar het zoutzuur verwijderd wordt. Dit maakt dat de installatie goed opgebouwd moet worden met voldoende beveiligingen voor een veilige operatie. Afhankelijk van de (materiaal en

## OPENBARE VERSIE

instrumentatie) keuzes die er gemaakt worden kan dit gerealiseerd worden voor een budget prijs tussen de €100.000 en €150.000.

### 9.3.5 CAPEX analyse apparatuur voor D-HALO

Voor de analyse van de reactie producten zijn verschillende apparaten nodig.

- Chloor analyse: de chloor analyse wordt met XRF uitgevoerd. Kosten hiervoor zijn €150.000.
- SIMDIST: kookpunt analyse van de pyrolyse olie. Kosten hiervoor zijn €100.000
- PIONA: analyse van de benzine fractie. Kosten hiervoor zijn €80.000
- TOC (Total Organic Content): voor afvalwater analyses. Kosten ongeveer €25.000

### 9.3.6 CAPEX voor de D-HALO pilot plant in totaal

De totale CAPEX voor de D-HALO pilot plant bedraagt samengevat:

- €1.2 mln D-HALO installatie
- €1.0 mln additionele automatisering
- €1.5 mln pyrolyse unit (indien beschikbaar om niet door NGE)
- €0.2 mln afgas behandeling
- €0.4 mln analyse apparatuur
- €0.3 mln overhead costs/management
- €0.9 mln onvoorzien

Dit maakt de totale CAPEX €5.5 mln. In dit stadium is een substantiële post voor onvoorzien kosten voorzien van ca. 20%, gezien het stadium van de engineering en de grote onzekerheden in de staalrijzen en tekorten aan specifieke elektronische componenten.

### 9.3.7 Commerciële operatie


Voor een pyrolyse pilot plant is het niet mogelijk om de hydrotreating te integreren, zoals hiervoor al aangegeven moet dit door een externe partij worden uitgevoerd. Maar voor de commerciële operatie is het van belang om duidelijk te weten of de hydrotreating zelf uitgevoerd moet worden, of dat dit door een externe partij gedaan wordt. De warmteproductie die vrijkomt bij de volledige verbranding van de koolwaterstof stroom die zoutzuur en gechloreerde koolwaterstoffen bevat kan mogelijk gebruikt worden in een waste heat boiler, mogelijk om energie op te wekken of om de warmte direct te gebruiken deels in het proces en deels (indirect) voor overige toepassingen. Door de extreme corrosiviteit van de stromen is dit geen standaard applicatie en moet dit door een ter zake deskundig bedrijf uitgewerkt worden.

### 9.3.8 Hydrotreating

Hydrotreating van pyrolyse olie afkomstig van de pyrolyse van afval plastic is bestudeerd voor een 15 kta en een 30 kta pyrolyse installatie. De technologische ontwerpen voor zowel de hydrotreating van wax als voor pyrolyse olie is vrijwel identiek. Schaal grootte speelt een belangrijke rol en laat zien dat het een serieuze mogelijkheid is voor de 30 kta (en groter) pyrolyse installaties.

Waterstof productie door steam reforming is al mogelijk bij op kleinere schaal opererende fabrieken. Het levert een aanzienlijke kostenbesparing op door het te integreren in het design van de hydrotreater. De totale investeringskosten voor een hydrotreater zijn ca. 40 mln USD voor de 30 kta pyrolyse plant, met operating costs van ongeveer €1.3 mln per jaar volgens een externe studie. De benodigde absorptie stap om zoutzuur te verwijderen verhoogd de CAPEX en OPEX niet noemenswaardig.

### 9.3.9 OPEX per jaar voor de D-HALO pilot plant

<b>OPEX</b>				
<b>Operations Staff</b>	Hours	€/hour		<b>Total</b>
		<b>Subtotal</b>		<b>€ 869,401.00</b>
<b>Utilities</b>	Price	Quantity		<b>Total</b>
		<b>Subtotal</b>		<b>€ 23,438.78</b>
<b>Engineering</b>	Hours	€/hour		<b>Total</b>
* Based on 200 operational days		<b>Subtotaal</b>		<b>€ 80,856.00</b>
<b>Total OPEX Costs</b>				<b>€ 973,696</b>

De OPEX is gebaseerd op 200 dagen operatie met 2 operators per shift. De operators zullen bijgestaan worden door een engineer gedurende de operatie, met de engineer als standby in de weekenden wanneer hulp of advies nodig is.

De utility costs zijn gebaseerd op ervaring met vergelijkbare operaties zoals die uitgevoerd zijn door POR.

## 9.4 Patent – Freedom To Operate voor D-HALO

De “freedom to operate”, de vrijdom voor het uitvoeren van het Beryl Circular ‘D-HALO proces, een dechlorinatie / pyrolyse proces voor gemengde afvalplastics is uitgevoerd voor Europa als regio. De studie is gebaseerd op een patent search uitgevoerd door Polyresearch BV aangevuld met een aantal patenten bekend bij Beryl Circular BV.

Er zijn geen third party patenten series gevonden die nog geldig zijn in Europa met claims die een belemmering kunnen zijn voor het D-HALO proces zoals beschreven. Verder is vastgesteld dat er onderdelen van het proces zijn te vinden in openbare publicaties die ouder zijn dan 20 jaar. Dit maakt de kans dat (delen van het) proces onder een patent vallen miniem is.

## 9.5 D-Halo + Pyrolyse, Commerciële installatie budget studie

De hierna genoemde CAPEX en OPEX gegevens zijn na consultatie van derde partijen opgesteld voor een 15 kta unit (intake gemengde plastic flakes). Het proces converteert 60% van deze intake in pyrolyse olie (8.280 ton per jaar) en produceert 30% lichte gassen en 10% coke.

Uitgangspunt is een opbrengst van € 800 per ton voor de pyrolyse olie bij een ‘gate fee’(inkoopprijs) van €0 per ton voor de gemengde afvalplastics flakes. Vanwege de hogere kwaliteit van de pyrolyse olie – deze is vrij van halogenen en een aantal andere reststoffen – zou het mogelijk moeten zijn om een hogere prijs te bedingen in de markt dan de gehanteerde prijs.

## OPENBARE VERSIE

Productie: Uitgegaan is van productie gedurende 5 dagen/24 uur in een 3-ploegendienst van 5 man per ploeg, totaal 5040 uur per jaar. Er is gerekend met een elektriciteitsprijs van €300 per MWh elektrisch, en €227 per MWh thermisch.

Door middel van een fornuis en ORC wordt warmte en elektriciteit geproduceerd. Het proces is energetisch zelfvoorzienend en kan daarnaast nog meer dan 23 GWh/jaar aan restwarmte aan bijvoorbeeld een warmtenet leveren. Dit laatste is niet in de berekeningen meegenomen, maar wordt hierna kort toegelicht. De conclusie is dat indien op een warmtenet kan worden aangesloten, er sprake is van een goede business case. Een alternatief dat niet is uitgewerkt, maar wat ook toevoegt aan de verdere benutting van rest-energie is het opwekken van stoom voor derden.

4 5 YEAR PROGNOSSES						
						€ 14.747.440
Total investment		year 1	year 2	year 3	year 4	year 5
Inflation adjustment			3%	3%	3%	3%
Gross Margin		€ 8.636.040	€ 8.895.121	€ 9.161.975	€ 9.436.834	€ 9.719.939
OPEX		€ 4.791.933	€ 4.935.691	€ 5.083.762	€ 5.236.274	€ 5.393.363
EBITDA		€ 3.844.107	€ 3.959.430	€ 4.078.213	€ 4.200.560	€ 4.326.577
Depreciation (10 years)		€ 1.474.744	€ 1.474.744	€ 1.474.744	€ 1.474.744	€ 1.474.744
EBIT		€ 2.369.363	€ 2.484.686	€ 2.603.469	€ 2.725.816	€ 2.851.833
Interest		€ 1.032.321	€ 929.089	€ 825.857	€ 722.625	€ 619.392
EBT		€ 1.337.042	€ 1.555.598	€ 1.777.613	€ 2.003.191	€ 2.232.440
tax	25,8%	€ 344.957	€ 401.344	€ 458.624	€ 516.823	€ 575.970
net income		€ 992.085	€ 1.154.253	€ 1.318.989	€ 1.486.368	€ 1.656.471
repayment banks en subordinated loans (10 years)		€ 1.474.744	€ 1.474.744	€ 1.474.744	€ 1.474.744	€ 1.474.744
cash flow (ex working capital)		€ 992.085	€ 1.154.253	€ 1.318.989	€ 1.486.368	€ 1.656.471

## 9.6 WAX, commerciële installatie budget studie

Het ontwerp van deze commerciële wax-fabriek is gebaseerd op eigen procesontwerp studies met schattingen voor de productopbrengsten en gesprekken met zowel leveranciers van voorbehandeling-apparatuur zoals drogers en shredders en bouwers van proces apparatuur zoals extruders en reactorvaten. De CAPEX voor een fabriek met een 15 kta intake capaciteit per jaar, inclusief installatie en set up kosten, is begroot op ruim €14 mln. Daarnaast is de installatie van een ORC begroot op €3,6 mln. voor het opwekken van eigen elektriciteit.

Voor de inkoop van afval PE is uitgegaan van een inkoopprijs van €500 per ton, franco geleverd, en een opbrengst van €1600 per ton voor de microkristallijne wax. Beide waarden zijn recent in de markt geverifieerd.

Productie: Uitgegaan is van productie gedurende 5 dagen/24 uur in een 3-ploegendienst, totaal 5040 uur/jaar. Er is gerekend met een elektriciteitsprijs van €300 per MWh elektrisch, en €227 per MWh thermisch.



## OPENBARE VERSIE

De plant produceert 75% microkristallijne wax. Er wordt daarnaast 24% gas geproduceerd, door middel van een fornuis en ORC wordt warmte en elektriciteit geproduceerd. Het proces is energetisch zelfvoorzienend en kan daarnaast nog meer dan 25 GWh/jaar (90 TJ) aan restwarmte aan derden, zoals aan een warmtenet leveren. Dit laatste is niet in de berekening meegenomen, maar wordt hieronder in paragraaf 9.7 als aparte optie verder beschreven en gekwantificeerd. Indien op een warmtenet kan worden aangesloten is sprake van een duidelijk positieve opbrengst. Een alternatief dat niet is uitgewerkt, maar wat ook toevoegt aan de verdere benutting van rest-energie is het opwekken van stoom voor derden.

4 5 year prognoses							
Total investment			year 1	year 2	year 3	year 4	€ 18.030.636
Inflation adjustment				3%	3%	3%	3%
gross margin			€ 11.284.372	€ 11.622.903	€ 11.971.590	€ 12.330.738	€ 12.700.660
OPEX			€ 4.345.100	€ 4.475.453	€ 4.609.717	€ 4.748.008	€ 4.890.449
EBITDA			€ 6.939.271	€ 7.147.449	€ 7.361.873	€ 7.582.729	€ 7.810.211
Depreciation (10 y)			€ 1.803.064	€ 1.803.064	€ 1.803.064	€ 1.803.064	€ 1.803.064
EBIT			€ 5.136.208	€ 5.344.386	€ 5.558.809	€ 5.779.666	€ 6.007.147
Interest			€ 1.262.145	€ 1.135.930	€ 1.009.716	€ 883.501	€ 757.287
EBT			€ 3.874.063	€ 4.208.456	€ 4.549.094	€ 4.896.164	€ 5.249.861
tax	25,8%		€ 999.508	€ 1.085.782	€ 1.173.666	€ 1.263.210	€ 1.354.464
net income			€ 2.874.555	€ 3.122.674	€ 3.375.428	€ 3.632.954	€ 3.895.397
amortisation banks/loans (10 y, no subsidies)			€ 1.803.064	€ 1.803.064	€ 1.803.064	€ 1.803.064	€ 1.803.064
cash flow (ex working capital)			€ 2.874.555	€ 3.122.674	€ 3.375.428	€ 3.632.954	€ 3.895.397

### 9.7 ORC en energie voor levering van warmte aan een warmtenet

Naast de CAPEX en OPEX voor de waxfabriek zijn er twee additionele onderdelen die de operatie van de plant positief kunnen beïnvloeden. De eerste is een ORC, al dan niet in combinatie met levering van warmte aan een warmtenet, de tweede een hydrotreater. Een ORC is reeds aan het bovengenoemde rekenvoorbeeld toegevoegd. De ORC kan afgassen van het wax proces, voornamelijk lichte gassen en lichte benzine, omzetten in warmte of warmte en energie. Na omzetting in elektriciteit is er nog een substantiële hoeveelheid restwarmte beschikbaar voor extern gebruik. Met de huidige energieprijzen en de noodzakelijke verwerking van de afgassen is er bijna 5 MW<sub>Therm</sub> beschikbaar is voor extern gebruik (bij 5040 uur operatie per jaar is dit equivalent met 25 GWh of 90 TJ per jaar voor extern gebruik).

Een ORC is de aangewezen keuze omdat gasmotoren en gasturbines niet goed om kunnen gaan met gasstromen die in grootte en samenstelling variëren. Een ORC heeft een relatief hoge aanschafprijs en de hoogste OPEX van de drie vergeleken opties, maar is de enige die de nodige flexibiliteit verschaft voor een dergelijke proces operatie. Een ander alternatief is een stoomturbine, maar die heeft een nog hogere aanschafprijs (Capex voor een 8 MW warmte input stoomturbine is €4.6 mln).

De mogelijkheden en de details van de toepassing van de ORC zijn uitgewerkt. De CAPEX voor een 8 MW warmte input ORC is €3.6 mln, de OPEX €0.1 mln / jaar. De jaarlijkse opbrengsten bij een gemiddelde output van 0,9 Mwe gedurende 3.000 uren (netto, voorlopige cijfers) en een tarief van EUR 0,30 per kWe excl. BTW zijn €810.000. Er is sprake van een rendabele business case, met als kanttekening dat een minimale tot geen CO<sub>2</sub> reductie plaatsvindt.

## OPENBARE VERSIE

Ook zijn de CAPEX en OPEX van warmtelevering uitgewerkt, de geproduceerde warmte is middels een warmteleiding te transporteren en aan te sluiten op een warmtenet. Uitgaande van de uitgevoerde afgas berekeningen is een aanzienlijke warmteproductie van 90 TJ per jaar mogelijk. Het te produceren volume aan warmte is alleen voor zeer grote warmtenetten volledig rendabel in te zetten, voorsnog wordt uitgegaan van een afzet van 30TJ aan een kleiner warmtenet. Indien dit volume van 30 TJ aan warmte per jaar wordt geleverd tegen een prijs van €20 per GJ bedraagt de omzet €600.000 per jaar. Bij een CAPEX en kosten van €800.000 resp. €398.000 per jaar is er sprake van een rendabele business case. Hierbij opnieuw als kanttekening dat een minimale tot geen CO<sub>2</sub> reductie plaatsvindt.

### 9.8 Hydrotreater

Om wax te maken die in een hoger prijs segment valt is een hydrotreater nodig, en mogelijk ook een de-oiling stap. De kosten voor een hydrotreater maken alle andere kosten van het project bijna verwaarloosbaar klein.

Hydrotreating van pyrolyse olie afkomstig van de pyrolyse van afval plastic is bestudeerd voor een 15 kta en een 30 kta pyrolyse installatie. De technologische ontwerpen voor zowel de hydrotreating van wax als voor pyrolyse olie is vrijwel identiek. Schaalgrootte speelt een belangrijke rol en laat zien dat het een serieuze mogelijkheid is voor de 30 kta en grotere pyrolyse installaties.

Waterstof productie door steam reforming is al mogelijk bij op kleinere schaal opererende fabrieken. Het levert een aanzienlijke kostenbesparing op door het te integreren in het design van de hydrotreater. De totale investeringskosten voor een hydrotreater zijn ca. 40 mln. USD voor de 30 kta pyrolyse plant, met operating costs van ongeveer €1.3 mln. /y volgens deze studie. De benodigde absorptie stap om zoutzuur te verwijderen verhoogd de CAPEX en OPEX niet noemenswaardig.

### 9.9 Patent – Freedom To Operate voor B-WAX

De “freedom to operate”, de vrijdom voor het uitvoeren, van het Beryl Circular BV ‘B-WAX proces, een pyrolyse proces voor vrij homogene stromen afvalplastics is uitgevoerd voor Europa als regio. De studie is gebaseerd op een patent search uitgevoerd door Polyresearch BV aangevuld met een aantal patenten bekend bij Beryl Circular BV.

Er zijn geen third party patenten series gevonden die nog geldig zijn in Europa met claims die een belemmering kunnen zijn voor het B-WAX proces zoals beschreven. Verder is vastgesteld dat er onderdelen van het proces zijn te vinden in openbare publicaties die ouder zijn dan 20 jaar. Dit maakt de kans dat (delen van het) proces onder een patent vallen miniem is.

### 9.10 Literatuurlijst Resultaten

12. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives, EU, 2008
13. Plastic waste as a fuel - CO<sub>2</sub>-neutral or not?, Ola Eriksson and Göran Finnveden, Energy Environ. Sci., 2009, 2, 907-914
14. LIFE CYCLE IMPACTS FOR POSTCONSUMERRECYCLED RESINS: PET, HDPE, AND PP, Association of Plastic Recyclers, SUBMITTED BY: Franklin Associates, A Division of Eastern Research Group (ERG), December 2018

OPENBARE VERSIE

15. Life cycle assessment of fuels for district heating: A comparison of waste incineration, biomass- and natural gas combustion, Ola Eriksson, , Göran Finnveden, Tomas Ekvall, Anna Björklund, Energy Policy 35, 2007, 1346–1362
16. Feedstock recycling and pyrolysis of mixed waste plastics, edited by John Scheirs en Walter Kaminsky, John Wiley & Sons, Ltd., 2006, Chichester UK
17. A Review of Plastic Waste Biodegradation, Ying Zheng, Ernest K. Yanful & Amarjeet S. Bassi, Critical Reviews in Biotechnology, Volume 25, 2005 - Issue 4 Pages 243-250
18. Biodegradation of polyethylene: a brief review, Sunil Ghatge, Youri Yang, Jae-Hyung Ahn & Hor-Gil Hur, Applied Biological Chemistry volume 63, Article number: 27 (2020)
19. Research progress in sources, analytical methods, eco-environmental effects, and control measures of microplastics, Jian Gong, Pei Xie, Chemosphere, Volume 254, September 2020, 126790
20. System Analyses of High-Value Chemicals and Fuels from a Waste High-Density Polyethylene Refinery. Part 2: Carbon Footprint Analysis and Regional Electricity Effects, Ulises R. Gracida-Alvarez, Olumide Winjobi, Julio C. Sacramento-Rivero and David R. Shonnard, ACS Sustainable Chem. Eng. 2019, 7, 18267–18278

## 10 Spin-off en vervolgvactiteiten, beschrijving vervolgproject en verdere implementatie.

### 10.1 Spin off

Chemische recycling is tot op heden geen prominente markt. Er zijn veel initiatieven, waarvan vele early stage. Wereldwijd zijn er meer dan 100 bedrijven actief op dit terrein, met meer dan 90 aangekondigde projecten. Daarvan zijn er een klein aantal in productie, het merendeel bevindt zich in de planning en discussiefase. Vervolgactiviteiten voor zowel D-HALO als B-WAX hangen mede af van de gerelateerde industrietakken. We onderscheiden een 5-tal categorieën.

1. Olie-industrie en de petrochemie. Dit zijn de huidige producenten van nafta, het fossiele uitgangsmateriaal voor plastics. Veelal grote spelers die uit eigen beweging weinig vaart zullen maken met chemische recycling. Gedwongen door de publieke opinie en overheidsmaatregelen zijn er bewegingen. Relatief weinig kennis van pyrolyse/chemische recycling, een inhaalslag is gaande.
2. Chemiebedrijven, verwerkers van nafta tot plastics. Ook hier vanuit de historie weinig kennis van pyrolyse en chemische recycling. Op basis van hun kernactiviteiten zijn deze bedrijven in staat om versneld schaalgrootte in chemische recycling te realiseren, in samenwerking met kleine gespecialiseerde start-up bedrijven.
3. Kunststofverwerkers. Veel kennis van plastics in relatie tot de verwerking ervan tot eindproducten. Ook hier relatief weinig kennis van pyrolyse/chemisch recyclen, er zijn inmiddels geslaagde recycle sectoren die groeien (PET, PU), Er is toenemende druk van de consumenten/overheid om recycle plastics meer en meer in te zetten.
4. Afvalverwerkers. Deze bedrijven zitten op de fysieke stromen van afval, en hebben kennis van het sorteren/scheiden van plastics en in toenemende mate van mechanisch recyclen. Er is opnieuw weinig kennis van pyrolyse/chemisch recyclen.
5. Overige spelers, dit is een grote groep diverse en vaak kleine bedrijven. Er is aanwezigheid van gespecialiseerde kennis op het gebied van pyrolyse/chemisch recyclen. Vaak betreft het niches die allen een deel van het recycleprobleem willen oplossen. Samenwerking met grote spelers in een van de andere sectoren kan de volgende fase/ opschaling betekenen.

Tallose grote bedrijven als MacDonalds, IKEA, Nestle, Unilever etc., worden niet genoemd omdat zij verder in de keten zitten. Deze bedrijven zijn grote afnemers van plastics zoals voor verpakkingen, en zijn vaak applicatie technologieontwikkeling verbanden aangegaan met aanbieders van (chemische) recycling technologie. Zelf hebben ze verhoudingsgewijs weinig kennis van plastics of de verwerking ervan. Wel neemt de maatschappelijke druk enorm toe, hetgeen inhoudt dat zij direct of indirect (via de tussenhandel en/of de consument) mee gaan betalen aan de oplossing van het afvalplastic probleem.

#### 10.1.1 D-HALO

D\_HALO is een universele oplossing om verwerking van een breder spectrum aan afvalplastics te realiseren. Geschikt voor vele soorten pyrolyseprocessen. Door het duidelijker kader dat met deze TSE studie is bereikt is de meest logische vervolgstap voor D-HALO het zoeken van samenwerking met een bedrijf uit de categorie 2 of 3. Zoals beschreven zorgt de D-HALO techniek in combinatie met pyrolyse voor een goede verwerkbaarheid in stoomkrakers. Nadrukkelijk is het de bedoeling dat na een succesvolle pilottest (zie ook hierna bij "Vervolgstappen") versneld de opschaling plaatsvindt naar installaties van 15 kta of meer. Door de omvang van het grotere bedrijf, en daarmee de toegang tot

## OPENBARE VERSIE

kapitaal, resources en locaties, is deze opschaling haalbaar. Daarnaast kan de volgende stap gezet worden door onderzoek te doen naar productie van aromaten/BTX uit het D-HALO/pyrolyse proces.

### 10.1.2 B-WAX

B-Wax is een niche oplossing die verwerking van PE/PP afvalplastics tot meerdere soorten wax mogelijk maakt. Gezien de hogere marktprijzen voor wax een economisch verantwoorde oplossing voor het verwerken van afvalplastics. Door het duidelijker kader dat met deze TSE studie is bereikt is de meest logische vervolgstap voor B-WAX het zoeken van samenwerking met een bedrijf uit de categorie 3 of 4. Daar waar een dergelijk bedrijf als activiteit onder andere het shredderen en wassen van plastics heeft (mogelijk met als eindproduct R-granulaat) bestaat synergie doordat het gewassen materiaal als grondstof voor het WAX productieproces kan dienen. Ook bestaat risicospreiding doordat de markt voor WAX zoals beschreven een andere dynamiek en pricing kent dan die voor R-Granulaat. Het realiseren van een installatie die 15 kta afvalplastics omzet in wax is eenvoudiger. Het kapitaal, resources en locaties zijn met en bij meer partijen te realiseren, zie hierna bij "Vervolgstappen".

## 10.2 Vervolgstappen

- a. Pilot Project D-HALO
  - i. Plant One Rotterdam en Beryl Circular zullen een aantal vervolgstappen gaan zetten na afloop van het TSE project om tot uitvoering en implementatie te komen van wat onderzocht is. Het betreft het aantonen van de de-halogenisering van pyrolyse olie in een operationele omgeving op basis van plastic afval dat van afvalsorteerders wordt betrokken:
    - a. de opzet van de D-HALO Pilotplant van 500 ton per jaar op de locatie van POR;
    - b. Het uitwerken van de lijst van partijen met wie de FEED, detailengineering en bouw kan plaatsvinden;
    - c. Het contracteren van de bouwers voor de pilotplant van 500 ton;
    - d. Het contracteren van 500 ton afvalplastics van sorteerders/leveranciers van afvalplastics;
    - e. Het verkrijgen van de uitbreiding van de (milieu)vergunningen, financiering en operationele bezetting;
    - f. Het bepalen van de randvoorwaarden voor de koppeling en synergetische voordelen van de toepassing van D-HALO technologie met de productie van pyrolyse olie en aromaten (BTX).
  - ii. De niet-technologische factoren die een rol kunnen spelen bij de toepassing van het concept of de technologie in de markt en de wijze waarop daarmee wordt omgegaan betreffen een aantal aspecten. Allereerst is er toenemende maatschappelijke druk om de vervuiling door afvalplastics tegen te gaan. Op zich kunnen circulaire processen het primaire gebruik niet tegengaan doordat er weinig goede alternatieven zijn voor de inzet van plastics. Wel is het mogelijk door toepassing van strengere eisen op het gebruik van plastics en de wijze waarop deze in de end-of-life fase behandeld en ingezameld worden om de vervuiling terug te dringen. Daarvoor is het nodig dat de maatschappij een venster geboden wordt op het hergebruik van afvalplastics zodat de uitstoot van CO<sub>2</sub> en de vervuiling van het milieu daalt. Verbranding, storten of ongecontroleerd loslaten op het aardoppervlak bieden geen oplossing hiervoor. De rechte lijn van productie van **plastics-gebruik-afval** moet omgebogen worden tot een cirkel. Daarmee wordt het een zinvolle exercitie en neemt de bereidheid toe om in de voorfase de inzameling, sortering en verdere verwerking (betaald) mogelijk te maken. Substantiële inzet van chemische en mechanische recycling is een voorwaarde voor dit alles.

## OPENBARE VERSIE

- iii. Doordat de technologie mogelijkheden schept, kunnen overheden (primair) en bedrijven en branche-organisaties hierop acteren. Dit zien we in toenemende mate plaatsvinden, waarbij door interactie de toename van de circulaire toepassingen stijgt: vanuit start-ups naar bewezen technologie, waarna toenemende regelgeving volgt met betrekking tot circulariteit (verplichtingen aan producenten en gebruikers), waarna nieuwe technologieontwikkeling volgt die verdere circulariteit toestaat, etc.
  - iv. D-HALO betreft een technologieontwikkeling. Als we het geheel van activiteiten die samen het traject van energieproductie tot en met energieverbruik bezien is de inbedding van de D-HALO technologie in de energiewaardeketen op 4 manieren van belang:
    - a. Productie van betere pyrolyseolie zonder halogenen, waardoor nabewerking eenvoudiger/met bestaande stoomkrakers mogelijk is en daardoor goedkoper.
    - b. Productie van veel meer pyrolyseolie zonder halogenen omdat een grotere mix aan afvalplastics verwerkt kan worden waardoor het recycling% omhoog gaat.
    - c. Energie neutrale productie van de pyrolyse olie (de vrijkomende gassen uit het proces worden gebruikt voor de eigen energievoorziening) ten opzichte van het gebruik van fossiele brandstof. Op zich betekent dit dat dit deel van het proces geen CO2 bespaart, maar ook niet belastend is.
    - d. Langere levensduur van de pyrolyse installatie en lagere onderhoudskosten vanwege het afvangen van de halogenen.
  - v. D-HALO biedt opschalingsmogelijkheden en herhaalpotentieel voor installaties vanaf ca 15 kta,. Vereist is een pyrolyse installatie, bij voorkeur op locatie bij een chemie bedrijf of grote kunststofverwerker. Dit maakt het aantal locaties waar geproduceerd kan worden beperkter.
- b. Commerciële installatie WAX
- i. Het is voorzien dat de lab-testen uit de TSE studie een vervolg krijgen in een beperkt aantal grote validatietesten van ca 100 kg (140 liter) per batch. Deze zijn de basis voor een go no-go beslissing voor de commerciële installatie voor verwerking van 15.000 ton afvalplastics per jaar tot WAX.
    - a. de opzet van de commerciële installatie van 11.000 ton wax per jaar op de locatie van POR;
    - b. Het uitwerken van de lijst van partners met wie de FEED, detailengineering en bouw kan plaatsvinden;
    - c. Het verkrijgen van de uitbreiding van de vergunningen, financiering en operationele bezetting;
    - d. Het contracteren van 15.000 ton afvalplastics van sorteerders;
    - e. Het contracteren van de afzet 11.000 ton wax aan diverse partijen.
  - ii. De niet-technologische factoren die een rol kunnen spelen bij de toepassing van het concept of de technologie in de markt en de wijze waarop daarmee wordt omgegaan betreffen dezelfde aspecten als hierboven verwoord voor D-HALO.
    - a. de opschalingsmogelijkheden voor B-WAX installatie met een omvang van 11.000 ton wax per jaar zijn vooral interessant voor kunststofafval verwerkers en wax verwerkers. Er is synergie vanwege de voor B-WAX vereiste input van flakes, deze zijn tevens de input voor een R-Granulaat productieproces. Ook gebaalde PE/PP stromen van sorteerders kunnen eenvoudig tot grondstof voor het B-WAX proces worden omgezet. Gezien de beperktere omvang van de productie-installatie en de opslag en ingaande en uitgaande goederenstromen in verhouding tot omvang van raffinage- of (petro)chemische complexen zijn er veel locaties waar een B-WAX installatie kan aansluiten bij een bestaand bedrijf.

## OPENBARE VERSIE

Een zgn. “greenfield” operatie heeft niet de voorkeur, onder andere vanwege de lange doorlooptijd van de benodigde vergunningen.

### 10.3 Opschalingsmogelijkheden en het herhaalpotentieel

#### 10.3.1 D-HALO

D-HALO is een proces dat het verwerking van gemengde afval plastics via pyrolyse tot pyrolyse olie mogelijk maakt. Op dit moment zijn er veel pyrolyse units die in aanbouw zijn of gepland zijn. Maar al deze units maken gebruik van dezelfde, relatief schone, afval plastics. D-HALO breidt het dieet van deze units uit. Omdat D-HALO een voor- en nabehandelingsstap is in de pyrolyse is dit toepasbaar in veel pyrolyse projecten.

D-HALO is een serie van verschillende processen die het chloor niveau in de producten verlaagd. Dit is een relatief complex proces, ook omdat er door de chloor met corrosieve stromen (zoutzuur) moet worden omgegaan. Daarnaast is een zorgvuldige behandeling van de producten nodig omdat deze (uiteindelijk) beperkte hoeveelheden gechloreerde koolwaterstoffen bevatten. Daarnaast is de verbranding van de afgassen in de aanwezigheid van zoutzuur een kritisch element omdat de vorming van dioxines voorkomen moet worden.

Vanwege de complexiteit en de extreem hoge efficiëntie die gehaald moet worden (99.9+% verwijdering van chloor) is dit een complex proces waarbij elke stap zorgvuldig uitgezocht moet worden, ook al zijn verscheidene stappen in het verleden al bewezen op commerciële schaal. Om dit proces te ontwikkelen is hiernaast ook de betrokkenheid van een hydrotreating licensor en een licensor voor de behandeling van zoutzuur nodig. Dit vereist een pilot plant traject van enkele jaren om dit voldoende uit te zoeken.

Er zijn een aantal stappen in het D-HALO proces die min of meer onafhankelijk van elkaar ontwikkeld kunnen worden, ook al vereisen ze aansluiting op elkaar. De lage temperatuur pyrolyse is hier een voorbeeld van. Hoewel het van belang is om de optimale de-chlorinatie over het hele proces te verkrijgen is het mogelijk om de effectiviteit (de-chlorinatie vs. product opbrengst) in de eerste stap uit te zoeken terwijl de rest van het proces nog niet in ogenschouw wordt genomen. Uiteindelijk is het van belang om te bepalen onder welke omstandigheden in welke stap de graad van de-chlorinatie wordt bereikt met de hoogste product opbrengst, hoeveel chloor moet specifiek in welke stap verwijderd worden om de hoogste pyrolyse olie opbrengst te krijgen.

Voor het opschalen is een uitgebreid pilot plant onderzoek nodig. POR heeft de faciliteiten en een paraplu vergunning voor de site. Er is een specifieke vergunning aangevraagd (DCMR) voor de onderdelen waar een additionele vergunning nodig is.

Er is interesse van commerciële partijen met verschillende achtergronden en het is een maatschappelijk relevant probleem wat hiermee opgelost wordt.

#### 10.3.2 WAX

De vorming van wax uit mono-stromen plastics is een commercieel bewezen proces. Gezien de krapte op de wax markt door o.a. de sluitingen van oudere smeeroliefabrieken van westerse raffinaderijen in o.a. Nederland en Frankrijk en een verdere groei in de markt voor wax, is dit een proces waar een directe

## OPENBARE VERSIE

commerciële toepassing voor is. In de wax markt is er op dit moment nog geen premie te verkrijgen voor het leveren van wax met een “groene” afkomst, maar verschillende commerciële partijen hebben hun interesse bevestigd.

Het maken van wax uit monostromen afval plastics is een orde grootte eenvoudiger dan de dehalogenisatie van gemengde afval plastics. Desondanks is toch een ontwikkelingstraject nodig om de juiste proces parameters vast te stellen voordat een commerciële fabriek gebouwd kan worden. Met de juiste apparatuur en na het voltooien van een uitgebreid verkennings- onderzoek op laboratorium schaal is het mogelijk om binnen 6 – 12 maanden de benodigde parameters vast te stellen voor het bouwen van een commerciële fabriek. Hierbij is een nauwe samenwerking nodig met de toekomstige afnemers van de producten om de garantie te hebben dat de fabriek producten kan maken van voldoende kwaliteit. Hierbij worden ook de noodzakelijke nabehandelingsproces stappen vastgesteld.

POR heeft een pilot plant ontwerp gemaakt. De vergunning voor deze pilot plant valt binnen de DCMR vergunningsaanvraag die voor D-HALO wordt gedaan.

Ook hierbij kan een samenwerking met een hydrotreating licensor van belang zijn, afhankelijk van de beoogde kwaliteit van de wax. Vanwege de herkomst van de intake materialen (afval) zijn waarschijnlijk een aantal applicaties niet toepasbaar (cosmetica en medicijnen). De hoge prijs voor de wax maakt deze toepassing een economisch aantrekkelijker optie dan pyrolyseolie van vergelijkbare kwaliteit plastics.



## 11 Conclusie en aanbevelingen

De doelstelling van het TSE project is het aantonen van de technische en economische haalbaarheid van de bouw van een pilotinstallatie om het Beryl D-HALO proces op grotere schaal te kunnen testen en demonstreren. Dit haalbaarheidsproject wordt ingezet om verschillende haalbaarheidsvragen te beantwoorden door middel van deskresearch, marktonderzoek en risicoanalyses, wat als onderbouwing voor de besluitvorming kan dienen. In de loop van het project is de parallelle studie inzake het produceren van WAX uit afvalplastics, eveneens door middel van een pyrolyseproces, toegevoegd.

### 11.1 D-HALO

Beryl heeft voorafgaand aan de start van het TSE project middels beperkte D-HALO testen op laboratorium schaal aangetoond dat substantiële reductie van chloor mogelijk is. In deze studie zijn deze resultaten onderzocht voor toepassing op grote schaal, en zijn de voorwaarden voor een pilotinstallatie van 500 ton per jaar uitgewerkt, met als conclusie dat deze pilotinstallatie technisch haalbaar is. De randvoorwaarden zoals belemmering door evt. patenten, vergunningen, technisch ontwerp en locatie zijn allen onderzocht cq opgesteld en positief beoordeeld.

De volgende fase is het uitwerken van een FEED, detail-engineering en realisatie van de pilotinstallatie. Beryl doet de aanbeveling om dit uit te werken in samenwerking met POR, op de locatie van POR.

Het resultaat van deze pilotinstallatie voor de verwerking van 500 ton plastics per jaar moet zijn een universele oplossing die het produceren van pyrolyse olie uit mixed plastics op industriële schaal (vanaf 15.000 ton per installatie per jaar) mogelijk maakt, en die geschikt is voor verwerking in conventionele raffinaderijen en petrochemische installaties, o.a. stoomkrakers waardoor de productie van grondstoffen voor plastics werkelijk circulair wordt. Daarmee wordt de verwerking mogelijk van een bredere stroom afvalplastics, zodat het door de EU gewenste/verplichte hogere percentage recycling van afvalplastics in de toekomst haalbaar kan worden.

Als 2<sup>e</sup> belangrijk voordeel is de langere levensduur van de pyrolyse installatie te noemen indien de D-HALO installatie wordt toegepast.

### 11.2 WAX

In de studie over D-HALO en Pyrolyse bleek het mogelijk om voor een beperktere range afvalplastics (PE, PP en PS) een ander circulair proces te onderzoeken. De vorming van wax uit afvalplastics valt eveneens onder de doelstelling om de keten te sluiten, en het bleek mogelijk om dit binnen de budgettaire kaders te doen. Er is eveneens sprake van een vorm van pyrolyse proces dat sneller op te schalen is tot een commerciële installatie.

In deze studie zijn deze resultaten onderzocht voor toepassing op grote schaal, en zijn de voorwaarden voor een commerciële installatie van 11.000 ton wax per jaar uitgewerkt, met als conclusie dat deze installatietechnisch en economisch haalbaar is. De randvoorwaarden zoals belemmering door evt. patenten, vergunningen, technisch ontwerp en locatie zijn allen onderzocht cq opgesteld en positief beoordeeld. Er zijn inmiddels een beperkt aantal lab-testen verricht door POR, met als uitkomst microkristallijne wax

## OPENBARE VERSIE

De volgende fase is het testen van de halffabrikaten bij enkele geselecteerde afnemers, het uitvoeren van een serie validatietesten van ca. 100 kg per batch, en het uitwerken van een FEED, detail-engineering en realisatie van de commerciële installatie. Beryl doet de aanbeveling om dit uit te werken in samenwerking met POR, op de locatie van POR of in samenwerking met een branchepartij elders in Nederland.

Een commerciële installatie van 11.000 ton moet de productie verschillende kwaliteiten wax uit afvalplastics op industriële schaal opleveren. Zo'n installatie is schaalbaar en inzetbaar op vele locaties in Europa, waardoor de productie van grondstoffen voor vele eindmarkten werkelijk circulair wordt. De calculaties laten bovendien een productieproces zien met een bovengemiddeld resultaat (zie paragraaf 9.6).

### 11.3 CO<sub>2</sub> Reductie

Zoals in paragraaf 9 aangetoond, leiden zowel de toepassing van de D-HALO als de B-WAX technologie tot een reductie van CO<sub>2</sub>.

Daarmee wordt voldaan aan belangrijke doelstelling, en is dit mede een hoeksteen voor vervolg.

## 12 Uitvoering van het project

### 12.1 Problemen tijdens het project en oplossingen

- a. Vanwege Corona heeft een aantal partijen die betrokken zijn bij het project vertraging opgelopen. De besteedbare uren van deskundig personeel was schaars, en moest worden ingezet op een niet afgenomen aantal projecten. De oplossing bestond uit verlenging van de looptijd van het project en het oprekken van de rapportagetermijn. Ook heeft Beryl meer uren zelf besteed en de uren van derden aangepast om alsnog de doelstellingen te behalen.
- b. Het bleek tijdens de uitvoering dat de expertise die bij derden aanwezig was niet geheel een match gaf met de werkpakketten die gedefinieerd zijn. Als oplossing heeft Beryl zelf een aantal activiteiten ter hand genomen en een wijziging aangebracht in het aantal partijen dat meewerkte aan de TSE studie.

### 12.2 Wijzigingen ten opzichte van het projectplan

Er hebben zich wijzigingen voorgedaan als volgt:

- a. Verlenging van de doorlooptijd van het project;
- b. Toevoeging van de markt- en haalbaarheidsstudie naar en productie van WAX uit afvalplastics, uitgevoerd met hetzelfde budget.

### 12.3 Wijze van kennisverspreiding (Kennisoverdracht en intellectueel eigendom)

Het openbare rapport kan worden samengevat en verspreid naar meerdere partijen. Beryl staat open voor samenwerking met meerdere partners om de realisatie van zowel D-HALO en de WAX installaties vorm te geven. Beryl heeft een patentaanvraag ingediend in de VS, en zal dit vervolgens ook in de EU-27 doen. Beryl streeft een verantwoorde inzet van een of meerdere patenten met partners na, die de snelheid van implementatie van oplossingen zullen bevorderen.

Voor de PR voor het project en verdere PR-mogelijkheden zijn een aantal activiteiten mogelijk:

- a. Publicatie van het onderzoek (middels interviews) in technische en/of algemene nieuwsbladen. Voorbeeld is het interview door Beryl in Petrochem in februari 2022;
- b. Deelname aan symposia, zoals bijvoorbeeld georganiseerd door PlantOne voor start-ups;
- c. Benaderen van zowel de afvalplastic verwerkende, pyrolyseolie- en wax verwerkende industrie. Ten behoeve van dit project zijn reeds een aantal partijen benaderd. Door uitbreiding van het netwerk van contacten met potentiële partners en branche organisaties zullen zich nieuwe kansen en mogelijkheden voor samenwerking voordoen.