



Chemische recycling in het afvalbeleid



CE Delft

Committed to the Environment

Chemische recycling in het afvalbeleid

Delft, CE Delft, december 2019
(Update maart 2020: aanvullende uitleg gebruikte terminologie)

Publicatienummer: 19.190156.161

Overheidsbeleid / Afval / Afvalverwerking / Recycling / Chemie / Procestechologie

Deze notitie is opgesteld door: Geert Bergsma en Martijn Broeren

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



1 Inleiding

Al tientallen jaren is een belangrijke doelstelling van afvalbeleid om de hoeveelheid afval die gestort en verbrand wordt te verlagen door te kiezen voor meer recycling van afval. Daarbij wordt er de laatste jaren meer op gelet of deze recycling op een hoogwaardige manier gebeurt. In het recent vastgestelde derde Landelijke Afvalbeheerplan (LAP3) (RWS, 2017) zijn hiervoor drie categorieën van hoogwaardigheid opgenomen voor recycling van kunststofafval (zie Tabel 1).

Tabel 1 - Huidige indeling kunststofafvalverwerking in LAP

A	Preventie
B	Vorbereiding voor hergebruik
C1	Recycling van het oorspronkelijke functionele materiaal in een gelijke of vergelijkbare toepassing (*)
C2	Recycling van het oorspronkelijke functionele materiaal in een niet gelijke of vergelijkbare toepassing (*)
C3	Chemische recycling
D	Andere nuttige toepassing, waaronder energierugwinning;
E1	Verbranden als vorm van verwijdering;
E2	Storten of lozen

In het LAP is het Nederlandse afvalbeleid vastgelegd. Vergunningsverleners volgen de aanwijzingen in het LAP voor het stellen van eisen in vergunningen.

Bij de recycling van kunststofafvalstromen wordt er op dit moment voornamelijk gebruik gemaakt van mechanische systemen om kunststoffen te sorteren, schoon te maken en te recylen. Als de sortering een stroom monomateriaal oplevert en deze weer ingezet wordt als monomateriaal ter vervanging van primair/virginmateriaal dan hoort mechanische recycling tot de meest hoogwaardige categorie in het LAP (C1). Als dit gebeurt als mixed plastic en ingezet wordt in de bouw met dikwandige producten als beton of houtvervanger, behoort dit nu tot tweede hoogwaardigheidsklasse C2.

Naast de al langer bestaande mechanische recycling heeft een aantal bedrijven of organisaties verschillende vormen van chemische recycling ontwikkeld. Het gaat dan om technieken als (tussen haakjes ook hoe de EU indeelt naar drie groepen in (Crippa, et al., 2019)):

1. Oplossen en zuiveren van polymeren (EU: solvent-based purification)¹.
2. Depolymeriseren en weer polymeriseren (EU: depolymerisation).
3. Pyrolyse tot nafta en daarna kraken producten van monomeren en polymeriseren (EU: feedstockrecycling).
4. Vergassen van kunststof tot syngas en daarna weer kunststoffen produceren (EU: feedstockrecycling).

Op dit moment zijn al deze technieken in LAP3 ingedeeld in de minst hoogwaardige klasse C3. Wel wordt in het LAP3 vermeld dat hiervoor ook uitzonderingen gelden: chemische recycling kan de voorkeur krijgen boven recycling als materiaal "(...) wanneer zij voldoet aan de criteria om te spreken van voorkeursrecycling of wanneer op basis van een LCA van de hiërarchie kan worden afgeweken".

¹ Andere termen die gebruikt worden zijn onder andere dissolution/dissolutie, fysische recycling, solvent-based separation, solvent extraction en solvolyse.



Afbakening: Chemische recycling van kunststofafval

Deze notitie handelt over de chemische recycling van kunststofafval. Daarbij gaat het zowel om verpakkingsafval als afval van producten. Deze notitie gaat niet over de inzet van biomassa in vergelijkbare technieken (bijvoorbeeld vergassing).

Hierbij kan opgemerkt worden dat verschillende definities van chemische recycling gehanteerd worden en dat de gebruikte terminologie ook uiteenloopt. Volgens de ISO 15270:2008-norm is 'feedstockrecycling' bijvoorbeeld synoniem met chemische recycling, en vallen zowel pyrolyse, vergassing als depolymerisatie onder deze term. Verder wordt oplossen en zuiveren niet expliciet genoemd in deze norm, maar zou het onder mechanische recycling geschaard kunnen worden, aangezien de techniek de chemische structuur van het materiaal niet verandert.

Om een duidelijk onderscheid te maken tussen de technieken hanteren we de hierboven genoemde indeling van 4 technieken. Hiermee sluiten we hier aan bij de indeling zoals gehanteerd door de Europese Commissie in *A circular economy for plastics* (Crippa, et al., 2019). Concreet betekent dit dat we oplossen en zuiveren meenemen onder de noemer chemische recycling, aangezien het net als de overige technieken een nieuwe, innovatieve vorm van recycling betreft die een plaats kan krijgen in het afvalbeleid. Daarnaast gebruiken we de term feedstockrecycling om pyrolyse en vergassing aan te duiden (en zien we depolymerisatie dus niet als feedstockrecycling).

Vorzorgsprincipe en huidige indeling

Uit voorzorg worden alle vormen van chemische recycling in het huidige LAP 3 gezien als aantrekkelijker dan verbranding met energieteerugwinning en als minder aantrekkelijk dan alle vormen van mechanische recycling. Ten tijde van het vaststellen van het LAP3 waren er nog niet veel analyses van chemische recycling beschikbaar. Verder was er het signaal dat verschillende vormen van chemische recycling veel energie vergen. Op basis van het voorzorgsprincipe is toen besloten om chemische recycling voorlopig als minst gunstige vorm van recycling te beschouwen. Wel is chemische recycling hoger in de rangorde geplaatst dan energieteerugwinning. Dit betekent dus ook dat chemische recyclingprocessen die deels energieproducten leveren (bijvoorbeeld pyrolyse naar diesel) in het LAP lager gewaardeerd worden dan chemische recycling naar nieuwe kunststoffen.

Milieuanalyses van onder andere CE Delft geven echter aan dat verschillende vormen van chemische recycling milieukundig vergelijkbaar kunnen scoren met mechanische recycling. Daarnaast is materiaal uit chemische recycling kwalitatief hoogwaardig en zeer goed inzetbaar. Ook kunnen met chemische recycling vervuilingen uit het materiaal verwijderd worden. Dat roept de vraag op of het niet beter zou zijn om verschillende vormen van chemische recycling op te delen naar C1, C2 en C3 naargelang de hoogwaardigheid van recycling. In deze notitie verkennen we op basis van recente studies deze kwestie.

Deze notitie gaat dus over:

1. De plek van verschillende chemische recyclingtechnieken in de categorieën C1, C2 en C3 in het LAP. Op dit moment staat alle chemische recycling in C3. De vraag is of sommige vormen van chemische recycling eigenlijk in C1 en of C2 thuishoren.
2. De milieuscore gemeten in CO₂-reductie en energiebalans van verschillende vormen van chemische recycling.
3. De opbrengst uit chemische recycling (hoeveel % van het inputmateriaal wordt outputmateriaal?)
4. De kwaliteit van de geproduceerde materialen.

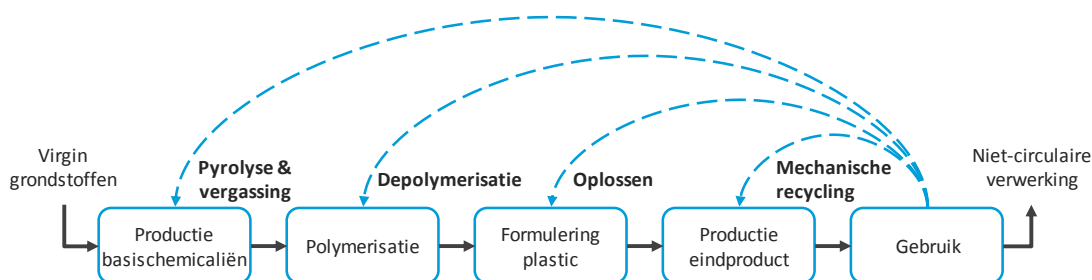


2 Wat is chemische recycling?

Chemisch recyclen is het door middel van een chemisch proces terugbrengen van kunststof naar de oorspronkelijke bouwstenen van het materiaal (polymeren, monomeren of atomen), zodat hier opnieuw kunststof of andere producten van gemaakt kunnen worden (KIDV, 2017a). Een voordeel van chemische recycling is dat grondstoffen geproduceerd kunnen worden. Hierdoor kunnen kunststofafvalstromen bijvoorbeeld opnieuw ingezet worden voor voedseltoepassingen, zoals nu ook met statiegeldflessen gebeurt. Om deze omzetting te bereiken is wel energie nodig.

Er bestaan veel verschillende varianten van chemische recycling, die op verschillende manieren gecategoriseerd kunnen worden. Het Kennisinstituut Duurzaam Verpakken (KIDV) houdt de volgende indeling aan, gebaseerd op de plek in de kunststofketen waarop het materiaal teruggebracht kan worden: oplossen, depolymerisatie, pyrolyse (kraken) en vergassing (zie Figuur 1). Een voordeel van technieken die een afvalstroom terugbrengen tot monomeren (depolymerisatie) of polymeren (solventextractie naar polymeren), is dat er weinig stappen nodig zijn om hier weer nuttige eindproducten van te maken. Technieken die een afvalstroom verder afbreken produceren meer basale bouwstenen (bijv. vergassing) die voor meer verschillende toepassingen ingezet kunnen worden. Aan de andere kant zijn er ook meer verwerkingsstappen nodig om de bouwstenen weer om te zetten tot eindproducten, wat doorgaans ook meer klimaatimpact veroorzaakt.

Figuur 1 - Varianten van chemische (en mechanische) recycling



Op basis van Crippa et al. (2019).

Chemische recycling lijkt nu over het algemeen nog wat duurder dan mechanische recycling, maar heeft voor vervuilde inputstromen of stromen met een ongewenste kleur het voordeel dat verontreinigingen en kleuren met chemische recycling makkelijker te verwijderen zijn. Daarnaast produceert chemische recycling outputs die qua kwaliteit vergelijkbaar zijn met virginmateriaal, waardoor de waarde van het eindproduct over het algemeen hoger is dan bij mechanische recycling. Wel is het zaak goed te checken hoeveel energie er nodig is voor het chemische recyclingproces en te checken hoeveel uitval van materiaal er plaatsvindt.

We geven per techniek meer toelichting:

Oplossen en zuiveren

Bij oplossen en zuiveren worden kunststoffen in een oplosmiddel (solvent) gebracht, waarna de polymeerketens teruggewonnen kunnen worden. De non-profit organisatie 'PolyStyrene Loop', een initiatief van een aantal EPS-verwerkers, recyclers en producenten, heeft het initiatief genomen voor de bouw van een pilotinstallatie waar EPS-producten worden

gerecycled en de gebruikte Broomhoudende vlamvertragers worden afgescheiden voor recycling. Dit wordt gedaan d.m.v. het CreaSolv-proces zoals ontwikkeld door Fraunhofer. Dit is een natuurkundig proces waarbij het EPS wordt opgelost in een solvent en vervolgens gescheiden wordt van andere stoffen die aanwezig zijn in de input, zoals bijvoorbeeld broom. Hierbij ontstaat PS. Momenteel wordt er in Terneuzen gewerkt aan een pilot-installatie die zich zal richten op EPS-stromen die eerder niet gerecycled werden.

Magnetische depolymerisatie

De Nederlandse startup Ioniqa heeft een techniek ontwikkeld waarbij afval-PET chemisch gedepolymeriseerd wordt onder invloed van een magnetische vloeistof. Hierbij wordt de grondstof BHET geproduceerd: PET-monomeren in kristalvorm. BHET kan vervolgens door bestaande producenten worden ingezet als grondstof in de productie van PET. In het proces worden diverse kleurstoffen en andere vervuiling in de input verwijderd, wat leidt tot een hoogwaardige grondstof die gelijk is aan de fossiele, 'virgin' grondstof voor PET. Deze techniek is, in tegenstelling tot mechanische recycling, geschikt voor bijv. PET-trays (~30 kton/jaar als afvalstroom in Nederland) die moeilijk mechanisch te recyclen zijn. Hoewel de techniek nog in ontwikkeling is, werkt Ioniqa aan de realisatie van een productiefaciliteit van 10.000 ton/jaar in 2019. Dit zou later opgeschaald worden tot 50.000 ton.

Conventionele pyrolyse

Pyrolyse is de verwarming van inputmateriaal zonder zuurstof op een temperatuur tussen de 400 en 600 °C. Hierbij kan omzetting plaatsvinden tot pyrolyseolie (o.b.v. biomassa, banden) of kerosine/dieselachtige brandstof (o.b.v. plastics en afvalolie), syngas, zouten en metalen, organische zuren en koolstof/char. De verhouding en kwaliteit van deze producten hangt af van de specifieke techniek en de samenstelling van de input. Eerste generatie pyrolyseprocessen heeft meer last van stoorstoffen zoals te veel PET en PVC dan tweede generatie. De kwaliteit van de olie of brandstof is bij tweede generatie pyrolyse vaak ook hoger.

De olie of nafta die geproduceerd wordt is geschikt om brandstof (diesel) van te maken en kan ook gebruikt worden als basismateriaal in de stoomkraker van een chemische fabriek, om uiteindelijk weer kunststoffen te maken. De meeste initiatiefnemers richten zich vooral op het maken van brandstof (diesel), omdat dit economisch aantrekkelijker is. Dit is echter geen recycling en valt in het LAP niet onder C3 maar onder D (zie Tabel 1).

Er bestaat wereldwijd een groot aantal commerciële pyrolyse-installaties. Voor de specifieke toepassing van het omzetten van plastic tot olie zijn wereldwijd momenteel 87 installaties operationeel (Ricardo Energy & Environment, 2017). Verschillende installaties richten zich specifiek op de productie van biobrandstoffen uit biomassa d.m.v. pyrolyse, of, zoals bijv. BioGreen Energy, op de verwerking van refuse-derived fuel (RDF)/SRF. De schaal varieert sterk; van 10-150 kton/jaar. Op kunststofafval van huishoudens wordt de techniek (nog) niet op grote schaal toegepast.

Geïntegreerde hydrolyse (toekomstige optie)

Geïntegreerde hydrolyse is een geavanceerde vorm van pyrolyse (derde generatie), waarbij een brandstof van hogere kwaliteit wordt geproduceerd. Het verschil met conventionele pyrolyse is dat het kraakproces plaatsvindt in de aanwezigheid van water. De temperatuur ligt ongeveer tussen de 300-600 °C.



De geïntegreerde hydrolysetechniek is beter geschikt voor wisselende heterogene input dan conventionele pyrolyse, en ook minder gevoelig voor geoxygeneerde plastics (PET). Hierdoor is hydrolyse in theorie een afvalwerkingstechniek die op een groot deel van brandbare huisvuilstromen kan worden toegepast. Niet-recyclebaar plastic afval en biomassa-afval vormen geschikte inputs. In de praktijk vinden nu vooral toepassingen plaats in niches, die zich richten op een specifieke afvalstroom zoals B-hout, slibverwerking of bermgras.

De schaal varieert sterk van 10-150 kton/jaar. De IH²-technologie van Shell is een voorbeeld van een grootschalige installatie die in ontwikkeling is voor de verwerking van biomassa en huishoudelijk afval in India. De verwachting is dat realisatie nog enkele jaren zal duren.

De outputstromen zijn olie (laag zwavelgehalte, inzetbaar als Marine Gas Oil (MGO)), syngas en een klein aandeel zouten en metalen. De geproduceerde char wordt intern verwijderd en gebruikt als energiebron. De verhouding tussen deze drie producten en de kwaliteit van het vloeibare product is sterk afhankelijk van de inputsamenstelling en de specifieke gehanteerde technologie. Dit levert in de regel betere businesscases op met biomassahoudende afvalstromen.

Lagetemperatuurvergassing

Vergassing is het verwarmen (-800-1.000 °C) van materiaal met toevoer van zuurstof. De brandstof wordt bij vergassing afgebroken tot de kleinste moleculaire bouwstenen: H₂ en CO. Deze combinatie van bouwstenen wordt syngas genoemd (van synthetisch gas). Er bestaan veel verschillende varianten van vergassing, die plaatsvinden in verschillende soorten installaties zoals bijv. wervelbedvergassing. Lagetemperatuurvergassing wordt vooral toegepast op biomassahoudende afvalstromen. Er zijn ook voorbeelden van installaties die zich richten op huishoudelijke afvalstromen, en die met name gericht zijn op de productie van energie. Het geproduceerde syngas wordt hierbij direct ingezet in een warmtekrachtkoppelingcentrale (WKK). De New Energy lagetemperatuurvergassingsinstallatie in Karratha (Australië) is hier een voorbeeld van.

Mediumtemperatuurvergassing

Mediumtemperatuurvergassing produceert een syngas van hogere kwaliteit dan bij lagere temperatuurvergassing. Verder is het proces vergelijkbaar opgebouwd. Ook hier bestaan er veel varianten: o.a. stofwolkvergassing en wervelbedvergassing. De temperatuur loopt doorgaans op tot tussen 900 en 1.650 °C. Het Europese Joint Research Center (JRC) is positief over de techniek en noemt de hoge energie-efficiëntie en de brede toepasbaarheid op verschillende soorten afval (JRC, 2016). Wel is nog wat onzeker in hoeverre gemengde huisvuilstromen gesorteerd of voorbewerkt moeten worden voor het gebruik als input voor deze techniek. Het Canadese bedrijf Enerkem past de wervelbedvergassing techniek commercieel toe in Quebec. Hier worden biobrandstoffen en biobased chemicaliën geproduceerd uit biomassahoudend gemengd huisvuil. In Nederland is een samenwerkingsverband tussen Nouryon, Van Gansewinkel, Enerkem en andere partijen opgezet voor de realisatie van een installatie in Rotterdam.



Prognoses chemische recycling

Recent hebben onder andere (McKinsey, 2019), Accenture (Elser & Ulbrich, 2017) en (Material Economics, 2018) statements en voorspellingen over chemische recycling uitgebracht.

McKinsey heeft een mondiale prognose uitgebracht. Van een huidig aandeel van 12% mechanische recycling wereldwijd en minder dan 1% back-to-monomer chemische recycling in 2016 schat McKinsey in dat mechanische recycling ongeveer gaat verdubbelen naar 22% in 2030 (met name door overheidsbeleid) en dat chemische recycling zeer sterk zal toenemen naar totaal 17% in 2030. Van deze 17% is 4% monomer recycling (depolymerisatie en oplossen) en 13% pyrolysis/liquid feedstockrecycling (McKinsey, 2019).

Accenture geeft in een studie voor CEFIC aan dat in Europa maximaal 60% van de chemische (molecuul)output opnieuw ingezet kan worden (Elser & Ulbrich, 2017). Er wordt geschat dat in Europa jaarlijks 19 Mton materiaal mechanisch gerecycled kan worden, tegenover 8 Mton via chemische recycling.

Material Economics voor Europa schat in dat in 2050 ca. 56% van de plastics die afgedankt worden mechanisch gerecycled worden, en dat van de resterende 44% ongeveer een kwart, dus 11%, chemisch gerecycled kan worden.

Naast de boodschap van deze volumes is deze tweedeling van de technieken interessant:

- monomerrecycling (depolymerisatie en oplossen);
- feedstockrecycling (pyrolyse en vergassing).

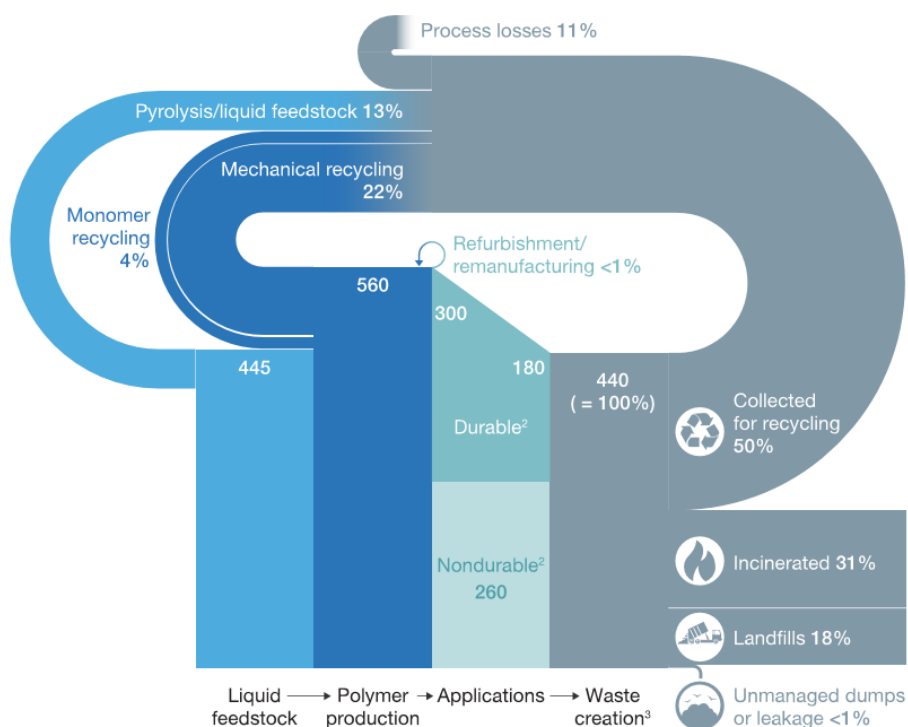
Ook McKinsey ziet chemische recycling als verschillende technieken en deelt ze in twee groepen.



Figuur 2 - Chemische recycling als aanvulling op mechanische recycling volgens McKinsey wereldwijd

Achieving a 50 percent reuse and recycling rate in 2030 would entail reshaping plastics-waste flows.

Global waste polymer flows 2030, millions of metric tons per annum¹



¹Scenario based on a multi-stakeholder push to boost recycling, regulatory measures to encourage recycling, consistent progress on technologies, and \$75-per-barrel oil price.

²Durable applications with an average lifetime >1 year will end up as waste only in later years, while nondurable applications go straight to waste.

³260 million metric tons mixed plastic waste from nondurable applications that end up as waste in same year plus 180 million metric tons of mixed plastic waste from production in previous years.

McKinsey&Company

3 Hoe scoort chemische recycling milieukundig?

In de verkenning van de kansen voor chemische recycling in Nederland (CE Delft, 2019), gemaakt in opdracht van het ministerie van EZK, is op basis van verschillende studies een overzicht gemaakt van de CO₂-emissies van verschillende vormen van chemische recycling vergeleken met het verbranden van kunststof in een AVI met energieopwekking. Zie Figuur 3.

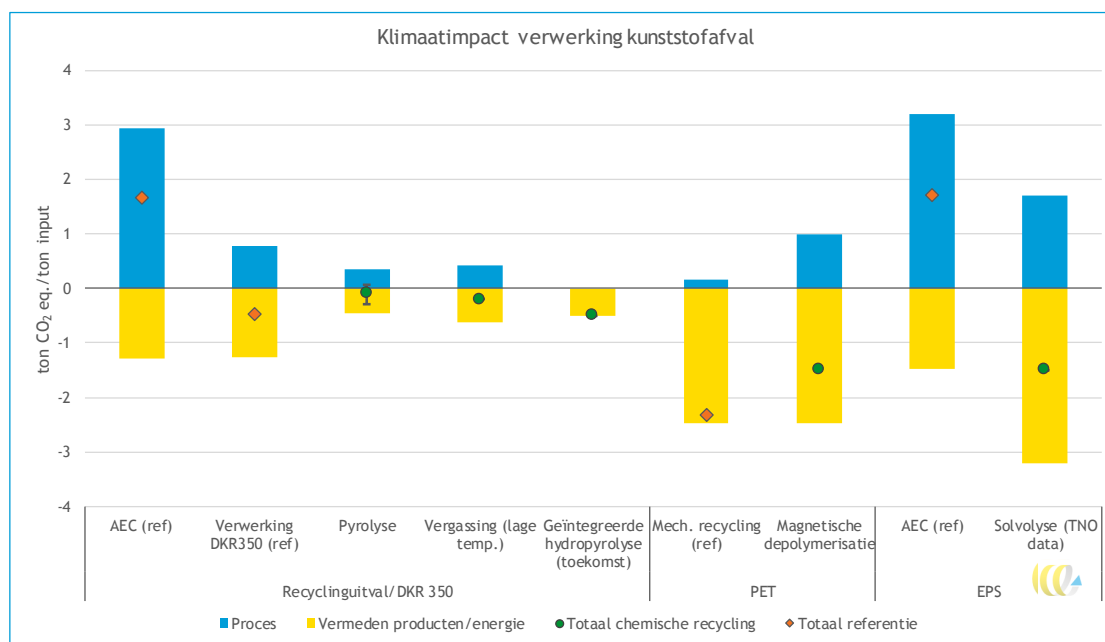
Daarbij moeten we wel vermelden dat het hier gaat om verkennende studies met voorlopige data uit verschillende bronnen. Alle technieken hebben ook varianten die beperkt verschillend scoren. Daarnaast is het zo dat de pyrolysetechnieken vooral worden toegepast om brandstoffen te produceren. De CO₂-emissie van pyrolyse voor grondstofproductie is echter vergelijkbaar.

We bespreken hierna de reductie in klimaatimpact die er grofweg met de verschillende technieken behaald kan worden per ton kunststofafval input. Verlies van materiaal in de

installatie, emissies uit de installatie en input van energie zijn in deze analyses meegenomen.

Voor de mechanische recycling en ook de verwerking van DKR 350 tot dikwandige producten is de situatie genomen zonder bijzondere verstoringen of problematische input. In de praktijk kan de score van deze techniek dus bij lastige input lager zijn. In meer of mindere mate geldt dit echter ook voor de andere opties. De scores zijn vooral nuttig om technieken onderling grof te vergelijken.

Figuur 3 - Indicatie klimaatimpact verwerkingsopties kunststofafval, ton CO₂-eq./ton input



Toelichting: Verwerking DKR350 is het maken van dikwandige bouwproducten uit mixed plastic. Solvolyse verwijst naar het oplossen van kunststof.

Op basis van bovenstaande indicatieve scores van verschillende technieken is een grove milieukundige beoordeling van technieken mogelijk. Daarbij gaan we uit van de constatering dat verschillende soorten kunststof verbranden in een gemiddelde Nederlandse AVI (figuur scoort gemiddeld kunststof en EPS) leidt tot een netto emissie van iets boven de 1,5 kg CO₂-eq. per kg kunststof (oranje stippen). Verwerking van DKR350 tot dikwandige producten, pyrolyse en vergassing scoort tussen de 0 en 0,5 kg CO₂-eq. per kg input. En mechanische recycling van monostromen als PET heeft een klimaatvoordeel van meer dan 2kg CO₂-eq. per kg afval.

Met deze indicatieve scores zijn de technieken te vergelijken met het verbranden in een AVI. Dit is vaak de referentietechniek.

Mechanische recycling monomateriaal: besparing van 2,5 à 3,5 kg CO₂-eq. per kg kunststof ten opzichte van AVI

Een mix van kunststofafval verbranden in een afvalenergiecentrale (AVI) levert bruto ongeveer 3 kg CO₂-eq.-emissie per kg kunststof. Doordat er elektriciteit en warmte geproduceerd worden in een AVI en deze fossiele elektriciteit en warmte uit kolen en gas vervangen is de netto klimaatimpact van de gemiddelde Nederlandse AVI ongeveer 1,5 kg CO₂-eq./kg kunststof. De beste vormen van mechanische recycling voorkomen de productie van kunststoffen en reduceren hierdoor rond de 2,5 kg CO₂-emissie die staat voor het voorkomen van de virginproductie van kunststoffen min een kleine impact van recycling. Een kg gunstige mechanische recycling van kunststoffen levert zo tot 4 kg CO₂-beperking van emissies op (2,5 recycling voordeel + 1,5 niet verbranding voordeel). In de praktijk is dit voordeel vaak toch wat lager door energie benodigd voor bewerking en uitval uit sortering. In de praktijk is de verlaging van CO₂-emissies van mechanische recycling per kg materiaal ongeveer tussen de 2,5 en 3,5 kg CO₂-eq. ten opzichte van het verbranden in een gemiddelde Nederlandse AVI. De prijzen van de recyclaten die hier geproduceerd worden zijn wisselend, maar over het algemeen duidelijk lager dan die van virginmateriaal. Ook wordt een groot deel van dit materiaal, wat komt uit de voedselverpakkingen na recycling, ingezet in de textielsector of als verpakking niet voor voedsel omdat het vaak niet geschikt is voor voedsel. Deze vorm van recycling wordt in het LAP gezien als C1.

Mixed plastic inzetten als dikwandig materiaal: besparing van 2 kg CO₂-eq. per kg kunststof

Bij de sortering van kunststofafval van huishoudens komt nu ongeveer 55% van het materiaal in een mixed stroom. Deze mixed stroom vervangt dikwandige producten in de bouw, in straatmeubilair en in de waterbouw. CE Delft heeft in 2011 (CE Delft, 2011) deze keten ook geanalyseerd. Het voordeel in klimaatimpact ten opzichte van verbranding is ongeveer de helft van het recyclen als monomateriaal. Wel was er naast het CO₂-voordeel ook een aanmerkelijk voordeel van minder landgebruik/biodiversiteit met name als tropisch hardhout (paaltjes) vervangen worden. Vervangen van beton/steen geeft duidelijk minder voordeel. De CO₂-emissiebeperking ten opzichte van verbranding in een AVI van deze route is ongeveer 2 kg CO₂ per kg kunststofafval. Deze vorm van recycling is nu ingedeeld in het LAP onder C2. (Om de reden dat het niet in dezelfde toepassing als oorspronkelijk wordt ingezet).

Oplossen en depolymerisatie: besparing van circa 3 kg CO₂-eq. per kg kunststof

De vormen van chemische recycling die kunststofafvalstromen niet sterk afbreken (oplossen en depolymerisatie) hebben wel meer energie nodig dan de gunstigste vormen van mechanische recycling. Deze hoeveelheid energie is echter maar beperkt hoger dan die van mechanische recycling in de praktijk. Dit leidt dan tot een CO₂-emissiereductie van circa 3 kg CO₂ per kg kunststofafval ten opzichte van inzet in een AVI. De output van deze processen levert een materiaal dat qua kwaliteit zeer vergelijkbaar is met virginmateriaal en dat ook geschikt is om weer als voedselverpakking toe te passen. De waarde van het materiaal dat geproduceerd wordt is vaak hoger dan dat uit mechanische recycling en ook de toepasbaarheid is breder. Deze vorm van recycling is nu uit voorzorg ingedeeld in het LAP onder C3. Een indeling onder C1 zou meer voor de hand liggen omdat:

- de milieuwinst ten opzichte van verbranding vergelijkbaar is met mechanische recycling als deze techniek wordt ingezet voor stromen die lastig mechanisch te recyclen zijn;
- de milieuwinst maar beperkt kleiner is ten opzichte van mechanische recycling voor stromen die ook met mechanische recycling goed te verwerken zijn;

- de inzetbaarheid van recycelaat in de oorspronkelijke toepassing beter is dan bij mechanische recycling.

Pyrolyse en vergassing: besparing van 1,0 à 1,5 kg CO₂-eq. per kg kunststof

Bij pyrolyse en vergassing wordt mixed kunststofafval verder afgebroken dan bij depolymerisatie of oplossen waardoor het materiaal dat geproduceerd wordt (syngas of nafta) minder CO₂-voordeel geeft door het vervangen van conventionele productie van syngas of nafta. Als dit door-gemodelleerd was inclusief de productie van kunststof dan was er meer energie benodigd geweest. De huidige opties komen daarmee uit op een CO₂-emissievoordeel ten opzichte van verbranden in een AVI van ongeveer 1,5 kg CO₂-eq. per kg kunststofafval. Als het afval nog een voorbewerking nodig heeft (reactie bedrijven op (CE Delft, 2019)) dan ongeveer 1,0 kg CO₂-eq. per kg kunststofafval. In de toekomst zou dit met geïntegreerde hydrolyse toe kunnen nemen naar 2. Bij deze technieken is het mogelijk om de output zowel te gebruiken voor energie als voor producten.

Op dit moment zijn deze technieken ingedeeld in het LAP onder C3. Overwogen zou kunnen worden om de ketens die weer een product maken onder C2 in te delen.

Energiescores

In de analyses van CE Delft is geen energiebalans gepresenteerd. Wel is het zo dat alle CO₂-emissies die spelen bij de berekeningen sterk energie-gerelateerd zijn. De emissies van de processen zijn vrijwel allemaal energie-gerelateerd en ook het voorkomen van CO₂-emissie van virginproductie is grotendeels energie-gerelateerd. Er is in de analyses geen CO₂-opslag of -afvang toegepast en ook geen duurzame energie. Door deze sterke correlatie tussen CO₂ en energie in alle achterliggende processen is het logisch dat ook op het gebied van fossiele energiebesparing pyrolyse en vergassing een voordeel hebben ten opzichte van de AVI en dat oplossen en depolymerisatie hierboven weer een extra voordeel hebben en vergelijkbaar zijn met mechanische recycling.

In Tabel 2 zijn bovenstaande punten samengevat. Verschillen in opbrengst van het materiaal zijn hierbij meegenomen in de CO₂-berekening.

Tabel 2 - Kenmerken verschillende vormen van chemische recycling

Techniek	CO ₂ -emissie beperking t.o.v. AVI (kg CO ₂ -eq. per kg afval)	Toepasbaarheid materiaal	Waarde materiaal	LAP recycling-categorie
Mechanische recycling monomaterialen	2,5 à 3,5	Breed maar vaak niet voor voedselverpakking	Lager dan virgin	C1
Mechanische recycling mixed plastic	Circa 2	Alleen als bouw materiaal	Ongeveer waarde nul	C2
Oplossen/depolymerisatie	Circa 3	Zeër breed, ook voedsel	Gelijk virgin	?C1 nu C3
Pyrolyse/vergassing	1,0 à 1,5	Zeër breed, ook voedsel	Gelijk virgin	?C2 nu C3

4 Chemische recycling in C1, C2 en C3 in het LAP

Op dit moment maakt het LAP onderscheid tussen drie vormen van recycling (C1, C2 en C3 in Paragraaf A.4.2) (RWS, 2017), zie Tabel 3. Chemische recycling komt daar op de derde plaats en heeft dus voorkeur boven inzet als brandstof, maar komt pas in aanmerking wanneer mechanische recycling geen optie is. Een belangrijke reden daarvoor is dat chemische recycling middels vergassen/pyrolyse veel energie kost.

Tabel 3 - Huidige indeling kunststofafvalverwerking in LAP

A	Preventie
B	Vorbereiding voor hergebruik
C1	Recycling van het oorspronkelijke functionele materiaal in een gelijke of vergelijkbare toepassing (*)
C2	Recycling van het oorspronkelijke functionele materiaal in een niet gelijke of vergelijkbare toepassing (*)
C3	Chemische recycling
D	Andere nuttige toepassing, waaronder energierecuperatie
E1	Verbranden als vorm van verwijdering
E2	Storten of lozen

Het onderscheid tussen Categorie C1 en C2 zit in of een kunststof weer terug kan naar een gelijke of vergelijkbare toepassing. Achter deze indeling zit de veronderstelling dat recycling naar een gelijke of vergelijkbare toepassing milieukundig ook gunstiger is.

Elke techniek voor chemische recycling is anders. Toch lijkt het op basis van (CE Delft, 2019) en (McKinsey, 2019) verantwoord de verschillende chemische recyclingstechnieken in te delen in twee categorieën te weten monomeerrecycling (oplossen en depolymerisatie) en feedstockrecycling (pyrolyse en vergassing).

Oplossen en depolymerisatie: back-to-monomer of alleen oplossen polymeren

Technieken die alleen polymeren oplossen en weer loslaten of het materiaal alleen afbreken tot monomeren waaruit vrij eenvoudig met een beperkte hoeveelheid energie weer polymeren gemaakt kunnen worden scoren qua CO₂-emissiebeperking t.o.v. de AVI bijna vergelijkbaar met mechanische recycling en produceren een hoogwaardige kunststof die weer terug kan naar de oorspronkelijke toepassing. In tegenstelling tot veel mechanische recycling van kunststof is het recycleat uit deze processen ook weer geschikt voor voedselverpakkingen. Op basis van deze informatie is het logisch om deze technieken te zien in de categorie met de hoogste hoogwaardigheid C1. Voor oplossen geldt dat deze techniek ook op basis van de ISO 15270-definitie van mechanische recycling (niet wezenlijk veranderen van de chemische structuur van de kunststof) tot C1 gerekend zou kunnen worden.

Pyrolyse en vergassing: wanneer ingezet voor grondstoffen

Milieukundig scoren pyrolyse en vergassing tussen mechanisch recycling en verbranding met energierecuperatie. Qua klimaatimpact zijn ze vergelijkbaar met die van mixed plastic-recycling waarbij kunststof naar andere sectoren gaat. Materiaal uit pyrolyse en vergassing kan in principe terug naar de oorspronkelijke toepassing maar wordt ook vaak als brandstof ingezet. Zelfs wanneer als voorwaarde wordt meegenomen dat de producten uit pyrolyse en vergassing weer als materiaal worden ingezet dan is het niet logisch om ook voor deze

technieken C1 te hanteren, omdat de milieuprestatie minder goed is dan de andere technieken in C1. Dit schuurt wel met de huidige definitie van C1 en C2, waarbij de indeling is gemaakt naar waar het materiaal weer ingezet wordt. Kunststofafval kan via pyrolyse immers heel goed weer als kunststof in dezelfde toepassing worden ingezet. Vaak nog beter dan mechanische recycling. Op basis van milieuprestatie en niet op basis van de inzetbaarheid is indeling in een iets minder hoogwaardige categorie echter wel logisch. Daarbij hoort dan ook wel een herdefiniëring van Categorieën C1 en C2.

Pyrolyse en vergassing voor energie (Categorie D in het LAP)

Pyrolyse van kunststof kan ook goed worden toegepast om diesel te maken als motorbrandstof. Op dit moment is dat Categorie D in het LAP. Ook die techniek geeft een betere CO₂-score dan verbranding in een AVI met energierugwinning. Deze techniek is qua CO₂-score vergelijkbaar met bijstoken in een cementoven of RDF inzetten in een energiecentrale. Deze technieken zijn allemaal geen recycling en zijn de betere vormen van energietoepassing. Een optie zou zijn ook om Categorie D in twee categorieën (D1= hoog rendement energietoepassing en D2 is gemiddeld rendement energietoepassing (AVI)) te splitsen. Dan zouden deze technieken ingedeeld kunnen worden in de D1. Vooralsnog kent het LAP alleen Categorie D.

Samenvatting indelingsadvies

In Tabel 4 hebben we het advies samengevat. Het gaat dus om een aanpassing van zowel de voorwaarden als de techniekaanduidingen. Het gaat hierbij alleen om recycling van kunststofafval.

Tabel 4 - Advies indeling kunststofafvalverwerking in LAP (rood is extra)

	Naam en voorwaarden	Voorbeelden van technieken
A	Preventie	
B	Vorbereiding voor hergebruik	
C1	Recycling van het oorspronkelijke functionele materiaal in een gelijke of vergelijkbare toepassing (*) middels mechanische recycling of middels monomeer chemische recycling	Mechanische recycling van monostromen, depolymerisatie en oplossen
C2	Recycling van het oorspronkelijke functionele materiaal in een niet gelijke of vergelijkbare toepassing (*) of met een lager milieuvoordeel ten opzichte van verbranding dan mechanische recycling middels mechanische recycling of middels feedstock chemische recycling	Mechanische recycling van mixed plastic tot producten in andere sectoren of pyrolyse of vergassing van materiaal naar materiaal
C3	Chemische recycling	
D	Andere nuttige toepassing, waaronder energierugwinning;	Chemische recycling naar energietoepassing
E1	Verbranden als vorm van verwijdering;	
E2	Storten of lozen	

Een optie is om Categorie D ook in tweeën te delen net als Categorie C en dan energietoepassing met een hoog rendement een voorkeur te geven.

5 Chemische recycling in sectorplan als minimumstandaard?

Op dit moment is chemische recycling nog in ontwikkeling en worden er demoplants geplant en gebouwd. De capaciteit is daarmee beperkt en de kosten zijn nog hoger dan andere routes. Het verplichten van chemische recycling is daarmee nog net wat te vroeg. Wel is het logisch dat dit de komende jaren snel zal veranderen nu er zoveel onderzoek gedaan wordt naar opschaling van chemische recycling. Tussen 2022 en 2025 is het zinvol om dit nogmaals te checken.

Wel is het denkbaar dat voor kunststoffen waar C1 of C2 voor geëist wordt dat de vormen van chemische recycling die onder C1 of C2 gaan vallen wel toegestaan worden.

Daarmee wordt het advies voor de minimumstandaard nu:

- voor de afvalstromen waar C1 de minimumstandaard is zou het ook toegestaan kunnen worden om monomeer chemische recycling toe te staan;
- voor de afvalstromen waar C2 de minimumstandaard is zou het ook toegestaan kunnen worden om zowel monomeer chemische recycling als feedstock chemische recycling toe te staan.

6 Recyclingadministratie en percentage recycling

Een aandachtspunt bij chemische recycling is het meten van het recyclingpercentage. De kunststoffen worden immers omgezet in andere kunststoffen. Ook worden er andere stoffen toegevoegd.

Als een kunststof via chemische recycling omgezet wordt in weer dezelfde kunststof is via een goede massabalans te bepalen hoeveel kunststof uiteindelijk gerecycled wordt.

Als een kunststof via chemische recycling omgezet wordt in een andere kunststof (bijv. PP wordt PE) dan ligt het meest voor de hand om koolstof en waterstof te volgen en hier een massabalans van te maken (beide materialen 2 maal meer H and C: C_3H_6 en C_2H_4). Dit wordt lastiger bij het materiaal PET, waarin ook zuurstof wordt opgenomen of polystyreen waar de verhouding tussen koolstof en waterstof anders is (1 op 1).

De Ellen McArthur foundation beveelt aan om voor deze vragen de mass balance approach te gebruiken (EMAF, 2018).

C1- en C2-percentages recycling optellen

In veel recyclingadministraties worden verschillende vormen van recycling gewoon 1-op-1 bij elkaar opgeteld. Omdat verschillende vormen van recycling milieukundig en qua hoogwaardigheid anders scoren is het te overwegen om bij het optellen van percentages C1-recycling en C2-recycling te gaan werken met weegfactoren. Dit zou bijvoorbeeld kunnen met de beleidsformule hoogwaardigheid, zoals ontwikkeld in het project hoogwaardige recycling (CE Delft, 2016). De C2-technieken zouden dan als 50% vergelijkbaar met C1-technieken kunnen tellen. Een combinatie van 50% C1-recycling en 40% C2-recycling zou dan gepresenteerd kunnen worden als $50\% + 0,5 \times 40\% = 70\%$ standaard recyclingpunten.



Literatuur

CE Delft, 2011. *LCA recycling van huishoudelijk kunststof verpakkingsafval*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2016. *Hoogwaardige recycling : gevat in een beleidsformule en een multicyclus LCA methodiek*. [Online]
Available at: <https://www.ce.nl/publicaties/1997/hoogwaardige-recycling>
[Geopend 2019].

CE Delft, 2019. *Verkenning chemische recycling : update 2019*, Delft: CE Delft.

Crippa, M. et al., 2019. *A circular economy for plastics : Insights from research and innovation to inform policy and funding decisions*, Brussels: European Commission.

Elser, B. & Ulbrich, M., 2017. *Taking the European chemical industry into the circular economy - Executive summary*, sl: Accenture.

EMAF, 2018. *Enabling a circular economy for chemicals with the mass balance approach : White paper*. [Online]
Available at: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Mass-Balance-White-Paper.pdf>
[Geopend 2019].

KIDV, 2017a. *Chemisch recyclen van kunststof verpakkingen - Verslag Verdiepingsbijeenkomst 9 februari 2017*, Den Haag: Stichting Kennisinstituut Duurzaam Verpakken (KIDV).

KIDV, 2017b. *Chemisch recyclen van kunststof verpakkingen*, Den Haag: Stichting Kennisinstituut Duurzaam Verpakken (KIDV).

Material Economics, 2018. *The circular economy : a powerful force for climate mitigation*, Stockholm: Material Economics.

McKinsey, 2019. *How plastic waste recycling could transform the chemical industry?*. [Online]
Available at: <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/how-plastics-waste-recycling-could-transform-the-chemical-industry>
[Geopend 2019].

Ricardo Energy & Environment, 2017. *From Waste to Resource : The changing face of the waste industry*. [Online]
Available at: <https://www.rushlightevents.com/wp-content/uploads/2017/05/Resource-Briefing-3-5-17-Mark-Terrell.pdf>
[Geopend 2019].

RWS, 2017. *LAP 3 Landelijk afvalbeheerplan 2017-2029 : Slimmer omgaan met grondstoffen*. [Online]
Available at: <https://lap3.nl/>
[Geopend 15 Januari 2018].



Stork, M., de Beer, J., Lintmeijer, N. & den Ouden, B., 2018. *Chemistry for Climate : Acting on the need for speed. Roadmap for the Dutch Chemical Industry towards 2050*, Utrecht: Ecofys.

