

Circulariteit door het vrijmaken en sorteren van materialen uit afval

Afval kan strategisch, energetisch en milieutechnisch een interessante bron zijn, als het met weinig energie of vervuiling weer tot bruikbare materialen wordt opgewerkt. Het bestaat echter uit duizenden verschillende materialen die op sterk verschillende schalen met elkaar gemengd en verbonden zijn: zelfs de meest moderne recyclingprocessen zijn technisch-economisch niet bij benadering in staat om al die materialen weer zuiver op te leveren. Een conceptuele analyse van een voorbeeld uit de recycling van plastics laat zien dat de oplossing voor dit technisch-economische probleem uit de natuurkunde en de informatietechnologie kan komen. Het geeft een beeld hoe we in de (verre) toekomst goedkope en zuivere grondstoffen op maat kunnen maken uit ons dagelijks afval.

De biosfeer is bijna perfect circulair: levende wezens recyclen materialen zoals eiwitten en DNA bijna volledig en met behoud van kwaliteit, terwijl ze, de mens uitgezonderd, ook nog lokaal winkelen en weinig energie verspillen. Het lukt daarentegen niet om onze nieuwe auto's te bouwen uit de materialen van de auto's die nu afgedankt worden. Daar zijn twee fundamenteel verschillende redenen voor. De wereldbevolking groeit, wordt welvarender en gebruikt producten met een steeds veranderende materiaalsamenstelling. De gemiddeld zestien jaar oude auto's die nu afgedankt worden komen uit een tijd waarin er minder auto's rondreden en bevatten daarom te weinig materialen om er al onze nieuwe auto's van te maken. Een relatief nieuw materiaal als lithium komt er praktisch helemaal niet in voor. De tweede reden dat circulariteit zoals in de natuur nu niet mogelijk is, is technisch-economisch van aard: recyclingtechnologieën zijn niet in staat om alle materialen uit een autowrak volledig en in hun oorspronkelijke kwaliteit terug te winnen. Het goede nieuws is

dat het totale gebruik van grondstoffen in welvarende regio's als Europa stabiliseert en verwacht wordt dat de rest van de wereld zal volgen. Innovatie zal recyclingtechnologieën steeds krachtiger maken. Circulariteit via recycling van afval lijkt dus langzamerhand dichterbij te komen. Maar kan het economisch en hoe ziet het recyclingproces van de toekomst er dan uit?

De kosten van complexiteit

Afval heeft een veel complexere samenstelling dan bijvoorbeeld erts en de schaal van recyclingprocessen is veel kleiner dan een hoogoven (zie tabel 1). Een voor de hand liggende vraag is daarom of het scheiden van honderd verschillende materialen uit een stroom van maar drie ton/uur afval niet veel duurder is dan het scheiden van drie verschillende materialen uit een stroom van honderd ton/uur erts? Als een recyclingfabriek gebruikmaakt van een traditionele lijn van fysische scheidingsapparaten, zoals magneten of drijfzinkbaden, die materialen afscheiden op basis van hun fysische eigenschappen, dan zijn er inderdaad heel veel

verschillende scheidingsapparaten nodig om een mengsel in honderd zuivere producten te scheiden en kan het economisch niet uit. Maar sorteren kan ook door deeltjes te spreiden op een sorteerband en een meting uit te voeren op elk deeltje, bijvoorbeeld door met een sensor het infraroodspectrum van het materiaal van dat deeltje te bepalen. Op basis van die meting kan een programma besluiten het deeltje wel of niet uit het mengsel te schieten (figuur 1). In principe kan een enkele sensorscheider alle honderd producten afscheiden door het mengsel telkens opnieuw met een ander programma door diezelfde scheider te voeren. Het is dan niet nodig om telkens maar één enkel materiaal af te scheiden. Dat is zelfs erg inefficiënt. Stel dat het een tijd T kost om een sensorscheider het oorspronkelijke mengsel in twee deelmengsels (uitgeschoten versus op de sorteerband achtergebleven) te laten scheiden. Als alle materialen in ongeveer dezelfde concentratie aanwezig zijn, dan zou het ongeveer vijftig T kosten om stuk

voor stuk alle honderd producten af te scheiden: gemiddeld passeert een deeltje uit het oorspronkelijke mengsel dan immers circa vijftig keer de scheider. Het blijkt voordeliger om telkens te scheiden in twee deelmengsels van ongeveer gelijke grootte. De benodigde tijd voor de volledige scheiding in honderd producten is dan als volgt uit te rekenen.

In een realistische sensorscheider levert de meting van een deeltje een van drie resultaten op:

1. Het deeltje is van een materiaal dat niet uitgeschoten moet worden.
2. Het deeltje is van een materiaal dat uitgeschoten moeten worden, maar het overlapt (ligt deels op of onder) een deeltje van een materiaal dat niet uitgeschoten moet worden. Uitschieten geeft een gerede kans dat beide worden uitgeschoten.
3. Het deeltje is van een materiaal dat uitgeschoten moet worden en het ligt voldoende vrij van deeltjes die niet uitgeschoten moeten worden om zonder problemen te worden uitgeschoten.

In het tweede geval wordt het deeltje niet uitgeschoten en vervuult het het op de band achtergebleven product. De kans ϵ dat dit gebeurt met een deeltje dat uitgeschoten moet worden hangt af van hoe dicht de deeltjes op de sorteerbands gepakt liggen. Stel dat de totale verwerkingstijd voor een mengsel van n verschillende materialen gelijk is aan

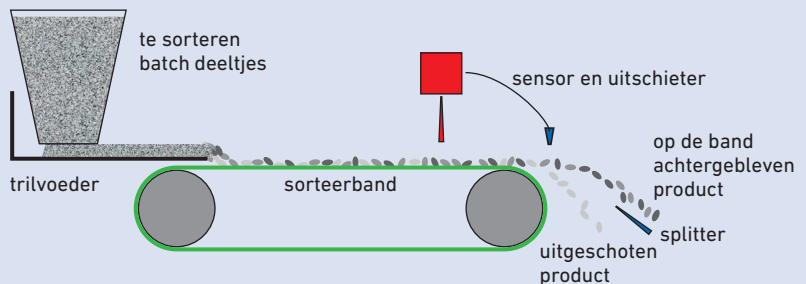
$$K(C_1, \dots, C_n)T;$$

C_i is de fractie van materiaal i ,

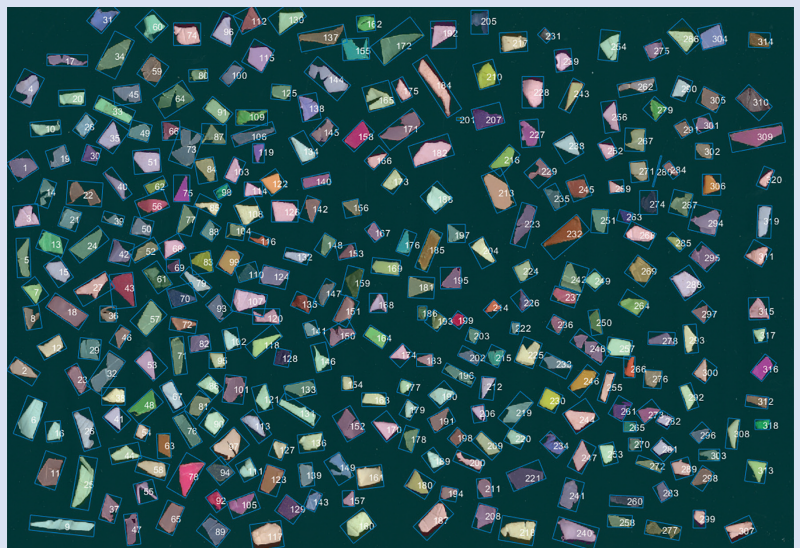
$$\sum_{i=1}^n C_i = 1$$

waarin T de tijd is die nodig is om het mengsel één keer over de scheider te voeren en $K(C_1, \dots, C_n)$ het gemiddelde aantal keren dat een deeltje de scheider passeert voordat de scheiding in n zuivere producten voltooid is. De totale verwerkingstijd voldoet dan aan de volgende recursieve relatie:

Verwerkingstijd van het originele mengsel = Verwerkingstijd voor één scheidingsstap (T) + Verwerkingstijd



Figuur 1. Boven: fysische scheiding van plastic flakes in vijf verschillende typen op basis van hun dichtheid in een magnetische nanovloeistof in een continue proceslijn vergt een grote investering in een complex netwerk van scheidingsstappen. Onder: Door batchgewijs te scheiden kan een enkele sensorscheider een mengsel in een veel groter aantal soorten scheiden door in een serie van processtappen voor elke stap de besturing aan te passen.



Figuur 2. Flakes van een Roemeense plasticrecyclinginstallatie. Van elk van de flakes werd het oppervlak en de omtrek bepaald om de vormfactor te berekenen, zodat het overlappendrag bij een willekeurige spreiding over de sorteerbands kan worden berekend.

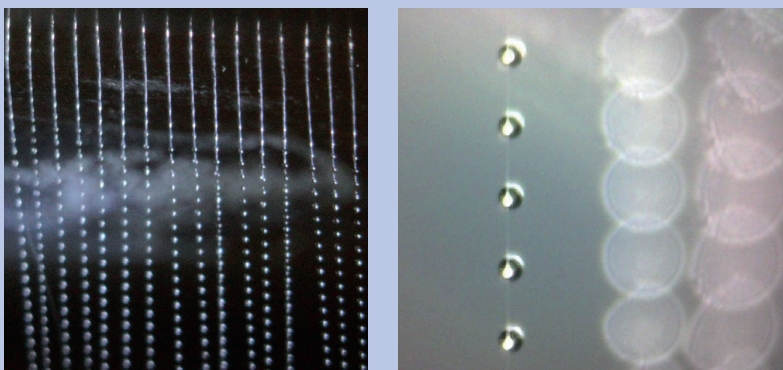
kostenfactor	afval	erts
schaal van processen	3-100 ton/uur	100-1000 ton/uur
energieverbruik in % van de energie-inhoud van het materiaal	10-30%	100%
materiaalcomplexiteit	5-100 verschillende materialen	2-3 verschillende materialen

Tabel 1. Globale kengetallen van recycling- en ertsverwerkingsprocessen ter illustratie van de complexiteit van recycling.

verpakking	merk	ID	merk	ID	merk	ID
hardware	Gamma	PP1.1	Sani- vesk	PP1.2	Top Tools	PP1.3
yoghurt	Albert Heijn	PP2.2	Nestlé	PP2.2	Jumbo	PP2.3
koekjes	Leev	PP3.1	Lotus Bakeries	PP3.2	RD Plas- tics	PP3.3

herkend als verpakking										
	PP	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
spectra verpakking:	1.1	95.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	1.2	0.0%	95.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.7%
	1.3	0.0%	0.0%	95.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	2.1	0.0%	0.0%	0.0%	95.1%	26.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	2.2	0.0%	0.0%	0.0%	7.5%	95.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	2.3	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	94.6%	0.0%	0.0%	0.0%
	3.1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	95.4%	2.1%	0.0%
	3.2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	7.7%	95.4%	0.8%
	3.3	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	95.3%

Tabel 2. Herkeningsmatrix: de kans op herkenning van een plastic flake van een verpakking als een flake van dezelfde of een andere verpakking aan de hand van het NIR-spectrum van 4 mm² schoongewassen plastic oppervlak.



Figuur 3. Foto van een aantal van de 3200 dropletjets. De druppels hebben een diameter van zeventig micron.

voor het op de band achtergebleven product + Verwerkingstijd voor het uitgeschoten product
Oftewel:

$$K(C_1, \dots, C_n) T = T + \frac{T}{2} K(2C_1, \dots, 2C_m, 2\epsilon C_{m+1}, \dots, 2\epsilon C_n) + \frac{T}{2} K(0, \dots, 0, 2(1-\epsilon)C_{m+1}, \dots, 2(1-\epsilon)C_{m+n})$$

Hier is m zo gekozen dat de twee producten van ongeveer gelijke grootte zijn, en dus allebei de halve verwerkingstijd ($T/2$) hebben van het originele mengsel, terwijl de concentraties van de materialen die in de producten terechtkomen verdubbelen ten opzichte van hun concentraties in het originele mengsel.

De oplossing van de vergelijking is:

$$K(C_1, \dots, C_n) T = F(\epsilon) T \sum_{i=1}^n C_i \log\left(\frac{1}{C_i}\right)$$

$$F(\epsilon) = \frac{2(1-\epsilon)}{2(1-\epsilon) + \epsilon^2 \log(\epsilon) + (1-\epsilon)^2 \log(1-\epsilon)}$$

De tijd voor het sensorscheiden in 100 verschillende zuivere materialen met elk een concentratie van 0,01 kg/kg is dus niet tientallen keren maar slechts een factor 4,2 groter dan voor de scheiding van drie materialen met concentraties 0,33 kg/kg. Daarentegen lopen de kosten snel op als een belangrijk deel van de deeltjes overlapt op de band. Als 15% van de deeltjes niet uitgeschoten kan worden omdat die deeltjes boven op of onder deeltjes van het andere product liggen dan kost de scheiding 56% meer tijd: $F(0,15) = 1,56$. Een voorbeeld uit de recycling van vaste plastic verpakkingen laat zien dat overlap al bij lage bandbedekking een probleem vormt.

Plastic

In de grote steden worden plastic verpakkingen uit het huishoudelijk afval afgescheiden met nabij-infrarood (NIR)-sensoren en luchtventielen. De stroom plastic verpakkingen wordt vervolgens in hoofdklassen (poly-

etheen, polypropreen, polystyreen, PET) gesorteerd en dan zo goed mogelijk verwerkt tot nieuwe producten. Helaas laat de zuiverheid van de gesorteerde stromen veel te wensen over, en eigenlijk is zelfs een perfecte scheiding in hoofdklassen niet voldoende om weer hoogwaardige producten te kunnen maken. Om te vermijden dat er dure en energievretende chemische processen nodig zijn waarbij het afval tot zuivere monomeren wordt teruggebracht, zou elke hoofdklasse ook nog op kleur, viscositeit en additieven gescheiden moeten worden: in honderden soorten dus. Het liefst zouden we willen dat elke soort plastic weer teruggaat naar de oorspronkelijke toepassing. Een deel van de daarvoor benodigde technologie is beschikbaar. Vaste verpakkingen, zoals shampooflessen en yoghurtbekers, kunnen tot flakes worden gesneden en gewassen, waarna een geavanceerde NIR-RGB-sensor het precieze polymeertype en de precieze kleur van de flakes bepaalt. Verrassend genoeg bevat het spectrum van 4 mm² schoongewassen plasticoppervlak al voldoende informatie om twee witte polypropreen yoghurtbekertjes van verschillende merken te onderscheiden met behulp van NIR-spectroscopie (zie tabel 2). NIR-sensoren kunnen dus minieme verschillen tussen polymeren of hun additieven waarnemen.

Om een succesvolle, goedkope en energiezuinige technologie te bouwen moeten zulke krachtige sensoren gekoppeld worden aan een methode om flakes zonder al te veel overlap op een band te spreiden en dan heel precies de flakes van de geselecteerde materialen uit te stoten. Dat laatste is nog een onopgelost probleem. Als flakes lukraak over een groot bandoppervlak van A m² gespreid worden is de kans dat twee (convex-gevormde) flakes, met oppervlakken a_0 en a_i en omtrek lengtes p_0 en p_i , elkaar overlappen gelijk aan

$$R_{0,1} = \frac{a_0 + a_1 + p_0 p_1 / 2\pi}{A}.$$

Dus de kans dat een flake (o) niet overlapt met een van N andere flakes op het bandoppervlak is:

$$1 - \epsilon = \prod_{i=1}^N (1 - R_{0,i}) \cong e^{-N \frac{a_0 + \bar{a} + \frac{p_0 \bar{p}}{2\pi}}{A}};$$

$$\bar{a} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i; \quad \bar{p} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i.$$

Voor een typische flake (o), met oppervlak \bar{a} en omtrek \bar{p} , is de overlapskans

$$\epsilon = 1 - e^{-2\alpha(1+s)};$$

$$\alpha = \frac{N\bar{a}}{A} \text{ (bandbedekking);}$$

$$s = \frac{\bar{p}^2}{4\pi\bar{a}} \text{ (vormfactor flakes).}$$

Voor de polyolefine flakes van figuur 2, die uit een plasticrecyclinginstallatie in Roemenië komen, is de vormfactor gelijk aan 1,22. Zelfs als 15% van de flakes die uitgeschoten moeten worden mag overlappen met flakes die niet uitgeschoten moeten worden, kan niet meer dan 8% van het sorteerbandooppervlak met het voedingsmengsel worden bedekt. Dat is een erg teleurstellend resultaat. Het betekent dat bij een (standaard) lukrake voeding van een stroom flakes op een sorteerband, de bandbedekking, en dus de doorzet, te laag zullen zijn voor een economische toepassing. Een commercieel succesvolle technologie om plastics via energiezuinige sortering in circa honderd producten te recyclen vereist een doorzet van circa 10.000 deeltjes per seconde. Het onderzoek richt zich daarom op een methode om flakes dicht op elkaar en toch grotendeels los van elkaar neer te leggen.

Ook het precies en zeker uitschieten van kleine deeltjes is niet triviaal. Bij de TU Delft wordt daarvoor gekeken naar jets van fijne druppels, zoals die door inkjetprinters worden gemaakt. In een recent NWO-project is een array gebouwd die 3200 jets van elk 120.000 druppels per seconde afschiet. De jets hebben een onderlinge afstand van 250 micron (zie figuur 3). Met zulke jetarrays zouden plastic flakes of andere kleine deeltjes met hoge doorzet nauwkeurig uit hun baan geschoten

kunnen worden als ze van de sorteerband stromen.

Het realiseren van circulaire vaste plastic verpakkingen wordt algemeen gezien als een van de meest haalbare doelen voor recycling op de korte termijn. Het besturen van zo'n innovatief recyclingproces zal geautomatiseerd zijn, omdat mensen niet in staat zijn om de continue technisch-economische optimalisatie van het scheiden van honderden productkwaliteiten met steeds wisselende procesparameters uit de aangeboden afvalsamenstellingen uit te voeren. Het voorgaande laat zien dat ook de opschaling van manipulatie van kleine deeltjes voor een ideale bandbedekking en een voorspelbare en nauwkeurige uitstoot van een deelmengsel nog onopgeloste problemen zijn. Echter, ten opzichte van andere materialen zijn de vaste plastic verpakkingen het gemakkelijkst circulair te maken. In tegenstelling tot auto's worden plastic verpakkingen zo snel afgedankt dat de hoeveelheid en de samenstelling van de materialen in het plastic afval praktisch gelijk zijn aan die van de productie van nieuwe verpakkingen. De verschillende typen polymeren laten zich makkelijk van elkaar vrijmaken door het afval in circa 5-10 mm grote flakes te snijden en de flakes zijn onderling niet heel verschillend van maat en vorm. Dat maakt het relatief makkelijk om de polymeertypes met een sensor te herkennen en de deeltjes voorspelbaar uit te schieten. Het is daarmee een ideaal voorbeeld voor de ontwikkeling van een echt circulaire technologie.

Peter Rem is hoogleraar bij de TU Delft in het veld van grondstoffen en recycling. De leerstoel heeft spin-outs voortgebracht die met nieuwe technologieën wereldwijd grondstoffen economisch terugwinnen uit afval.

P.C.Rem@tudelft.nl

REFERENTIES

- 1 J.B. Dahmus en T.G. Gutowski, What Gets Recycled: An Information Theory Based Model for Product Recycling, *Environ. Sci. Technol.* **41**, 7543-7550 (2007).
- 2 P. Wen, G. Lohlefink en P. Rem, Non-overlapping coverage in random feeding, *Powder Technology* **385**, 50-59 (2021).
- 3 Y. van Engelshoven, P. Wen, M. Bakker, R. Balckenende en P. Rem, An Innovative Route to Circular Rigid Plastics, *Sustainability* **11**, 6284 (2019).