



Circulaire 3D prints

Is het technisch mogelijk en financieel rendabel om end-of-life 3D prints te recyclen tot nieuw filament en zo de keten te sluiten?





Index

1. Details van het project
 - a. Projectnummer
 - b. Titel van het project
 - c. Aanvrager
 - d. Projectperiode
2. Inhoudelijk eindverslag
 - a. Samenvatting
 - b. Inleiding
 - c. Doelstelling
 - d. Werkwijze
 - i. Technische haalbaarheid
 - ii. Economische haalbaarheid
 - e. Resultaten
 - i. Projectcoördinatie
 - ii. Levenscyclusanalyse
 - iii. Andere mogelijkheden
 - f. Bespreking en risicoanalyse
 - g. Conclusie en aanbevelingen
3. Uitvoering van het project
 - a. Problemen die zich tijdens het project hebben voorgedaan en hoe deze zijn opgelost
 - b. Verklaring van wijzigingen ten opzichte van het projectplan
 - c. Verklaring van verschillen tussen begroting en werkelijke kosten
 - d. Toelichting methode van kennisverspreiding
 - e. Uitleg over PR-project en verdere PR-mogelijkheden



Details van het project

Projectnummer: TESN121051

Aanvraag aan: Ministerie van Economische Zaken & Klimaat

Titel van het project: Circulaire 3D prints

Aanvrager: Reflow BV

Projectperiode: 1 november 2021 - 31 oktober 2022

A) Samenvatting

De 3D-printindustrie is een snelgroeende markt met een verwachte marktwaarde van 34,8 miljard USD in 2026. Helaas werken de meeste 3D-printers op materialen die niet duurzaam en/of biologisch afbreekbaar zijn. De meest gebruikte materialen voor 3D-printers zijn thermoplastische polymeren. In theorie kunnen de meeste van deze polymeren meerdere keren worden gerecycled, wat een impact zou hebben op de plasticvervuiling en de uitstoot van broeikasgassen, terwijl klanten duurzame eindproducten kunnen maken.

Reflow is een bedrijf dat gespecialiseerd is in de productie van hoogwaardig 3D-printfilament van gerecycleerde polymeren. Dit verhoogt de duurzaamheid, maar door recycling daalt ook het moleculaire gewicht van de polymeerketens. Reflow heeft uitgebreid onderzoek gedaan naar de afbraak en de neveneffecten van de afbraak van polymeren na recycling. Zij gebruiken deze kennis om de kwaliteit van het filament te verbeteren. Dit is een belangrijke factor omdat gerecycled materiaal van lage kwaliteit door de meeste consumenten niet zal worden gekocht, omdat het eenvoudigweg niet presteert en dus weinig invloed heeft op de duurzaamheid.

In een poging om de duurzaamheid verder te vergroten, is Reflow bezig met een interne recyclinginstallatie om hun product te recyclen nadat het door hun consumenten is weggegooid. Typische 3D print polymeren kunnen meestal 4-6 keer gerecycled worden zonder dat de thermische en mechanische eigenschappen zodanig afnemen dat het niet meer te verwerken is tot hoogwaardig 3D print filament. Er zijn ook verschillende manieren om de kwaliteit van een product na recycling te verhogen. Het toevoegen van vezels in een proces dat bekend staat als compounding, is een van die mogelijkheden.

Alle afgedankte 3D-prints die naar Reflow worden gestuurd om te worden gerecycled, moeten worden gesorteerd, onderzocht en gewassen voordat ze naar behoren kunnen worden gerecycled. Het sorteren zorgt ervoor dat elk polymeer alleen met dat specifieke polymeer wordt gemengd. Als 2 verschillende soorten polymeren worden gemengd, moeten ze verder worden bewerkt en moeten er additieven zoals koppelmiddelen worden toegevoegd, of zal het product van slechte kwaliteit zijn. Onderzoek van de afgedankte 3D-prints zal ervoor zorgen dat alleen materialen die niet te ver zijn afgebroken in de recyclingcirkel terechtkomen. Het zal ook helpen bij het sorteren van prints die zo vuil zijn dat ze niet meer goed kunnen worden gewassen. De was-stap zal helpen bij het reinigen van de 3D-prints om ervoor te zorgen dat er geen vuil of andere onzuiverheden met het product worden vermengd, omdat dit ook de kwaliteit van het product sterk zou verminderen.

Nadat al deze stappen goed zijn uitgevoerd gelooft Reflow dat het hoogwaardige producten kan maken van de 3D-prints van zijn eigen consumenten. Dit is de eerste stap in het opbouwen van het recycling ecosysteem in de 3D print industrie en het volledig circulair maken van de materialen.

B) Inleiding

In grote lijnen zijn er 3 kerntypes van 3D-printtechnologie: Selective Laser Sintering (SLS), Fused Deposition Modeling (FDM) en Stereolithography (SLA).

In het Selective Laser Sintering (SLS) proces wordt het kunststofpoeder gesmolten en afgezet in de 3D-geometrie. Stereolithography (SLA) maakt gebruik van polymerisatiereacties om objecten te maken. Aangezien het polymeer in de polymerisatiereactie wordt uitgehard/gekruist, zijn de thermo hardende kunststoffen niet geschikt voor herbewerking. Fused Deposition Modeling (FDM) is de meest gebruikte 3D-printtechnologie vanwege de lage installatiekosten, de veelzijdige gebruiksmogelijkheden en de volwassen markt en gebruikersondersteuning. Het heeft ook het meeste potentieel voor volledig circulaire additieve productie.

Fused deposition modeling (FDM) is een op smelten gebaseerd 3D printproces. Bij dit proces worden materialen gesmolten en geëxtrudeerd door een verwarmd mondstuk. Vervolgens wordt de smelt afgezet op de vorige afzetting om een nieuwe laag te vormen en worden gestapelde lagen samengesmolten tot 3D-objecten. Grondstoffen zijn thermoplasten, meestal in de vorm van filamenten of pellets. Voor industriële FDM-printers zijn grondstoffen in de vorm van pellets gebruikelijker, omdat die goedkoper zijn dan filamenten. Voor desktopprinters zijn filamenten gebruikelijker en kunnen ze zorgen voor een consistente materiaaltoevoer.

Thermoplastische grondstoffen voor FDM printen zijn over het algemeen amorf of semi-kristallijne kunststoffen met een lage kristallisatiesnelheid. Daarom is er tijdens de afzetting van gesmolten kunststof en het afkoelingsproces minder vormverandering door het kristallisatieproces en dus minder vervorming van de prints. Voorbeelden van op de markt verkrijgbare amorf FDM grondstoffen zijn Poly-(ethyleentereftalic)-glycol (PETG) en Poly-(acrylonitril-butadien-styreen (ABS), semi-kristallijne grondstoffen zoals Poly-(lactide) (PLA). Recentelijk zijn meer semi-kristallijne engineering polymeren op de markt gebracht omdat deze materialen uitstekende milieubestendigheid, mechanische eigenschappen zoals hoge slagvastheid en taaiheid, en aanpasbare materiaaleigenschappen hebben. Door de geometrische verandering tijdens de kristallisatie veroorzaken deze materialen echter ook ernstige vervorming en slechtere hechting van de lagen tijdens het 3D-printen. Additieven om vervorming tegen te gaan en vulstoffen om de geometrie van het materiaal stabiel te houden, worden gewoonlijk aan deze technische polymeren toegevoegd om grondstoffen voor 3D-printen te leveren.

Er is ook een opkomende trend om continue vezelversterking toe te passen bij 3D-printen. Er zijn twee benaderingen: De eerste is eenvoudig, namelijk het produceren van een continu vezel 3D print filament en dit gebruiken als grondstof voor de printer om te printen. Omdat vezeldispersie en bevochtiging kritisch zijn, is dit type continue 3D printtechnologie minder gangbaar. Het tweede type continue vezel 3D printen is een dual-nozzle 3D printer. Deze dual-nozzle 3D printer neemt een plastic matrix filament en een continue vezeldraad als grondstof. Tijdens het 3D printen worden de vezeldraad en de matrix in de spuitmond van de printer gemengd tot een continue vezelversterkte composiet. Het tweede type continue 3D-printtechnologie is meer op de markt beschikbaar. De printerfabrikant Markforged is hierin marktleider.

Hoewel de huidige economie onlosmakelijk verbonden is met het gebruik van kunststoffen, kunnen de meeste kunststoffen niet worden afgebroken in de natuurlijke omgeving, wat leidt tot opeenhoping van kunststoffen en vervuiling. Vergeleken met de verwijdering van kunststofafval door storting of verbranding voor energierugwinning, creëert de recycling van kunststof een duurzame kringloopeconomie, waardoor nieuwe uitputting van fossiele



brandstoffen en energie voor de productie van nieuw kunststofafval wordt voorkomen.

C) Doelstelling

Het doel van dit project is om de technische en economische haalbaarheid te onderzoeken van de ontwikkeling van een innovatief proces om 3D-prints circulair te maken. Reflow maakt een blauwdruk om end-of-life 3D prints te verzamelen en te recyclen tot nieuwe printfilamenten die steeds opnieuw gebruikt kunnen worden in productietoepassingen. Bij een positieve beoordeling van de haalbaarheid zal Reflow een proefproject uitvoeren dat gericht is op het opzetten van een proces om 3D-prints om te zetten in nieuw filament van hoge kwaliteit.

In vergelijking met de thermische en chemische recyclingroutes zijn er voor mechanische recycling minder machines nodig, zijn de installatiekosten lager en is het minder energie-intensief. Daarom zal Reflow zich richten op het mechanische recyclingproces als de primaire recyclingmethode voor 3D-printobjecten voor eindgebruik. Het mechanische recyclingproces hersmelt de teruggewonnen en gesorteerde kunststoffen en vormt ze vervolgens om tot extrudeerbare pellets. Kunststoffen ondergaan het thermo-mechanische recyclingproces, dat bestaat uit het inzamelen van gebruikte kunststoffen, sorteren, schoonmaken, malen, extruderen en pelletiseren.

D) Werkwijze

De haalbaarheid van het project is geëvalueerd vanuit zowel technisch als economisch perspectief. Deze twee perspectieven vormen de basis waarop Reflow de volgende stap kan zetten naar de commercialisering van een continu circulair productiemodel.

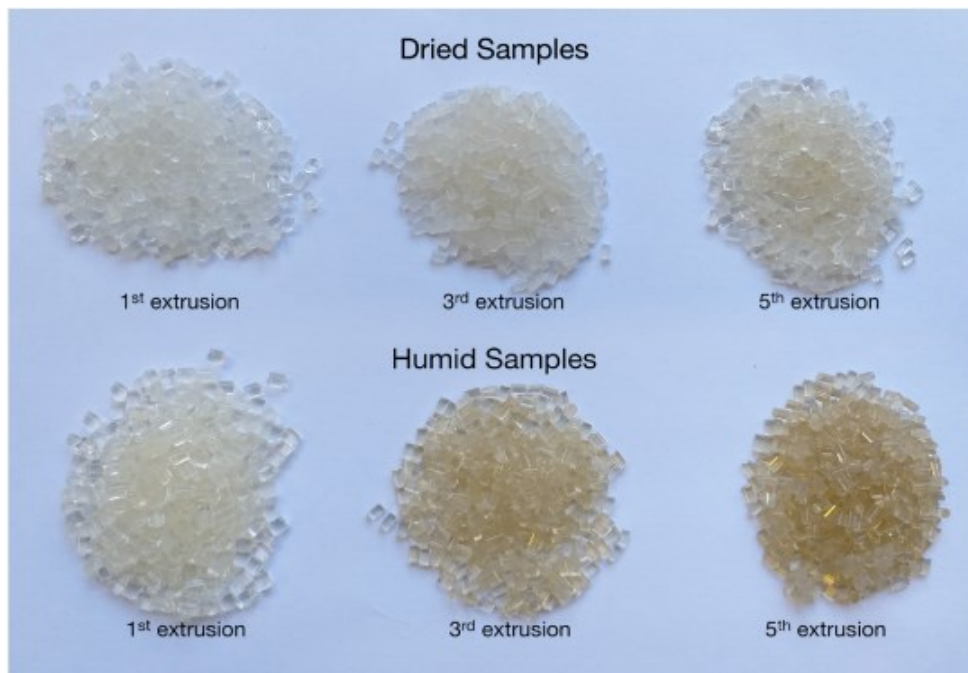
ij) Technische haalbaarheid

Thermoplasten die opnieuw kunnen worden verwerkt, d.w.z. die kunnen worden gesmolten en omgevormd van een harde tot een "glasachtige" toestand, kunnen ook mechanisch worden gerecycleerd. Het meest gebruikelijke mechanische recyclingproces op post-consumptieniveau is echter doorgaans beperkt tot poly(ethyleentereftalaat) (PET) drinkflessen en polyolefinen zoals poly(propyleen) (PP) en poly(ethyleen) PE die gewoonlijk in de verpakkingindustrie worden gebruikt. Andere post-consumptie kunststoffen van verschillende materiaalsoorten worden vermengd met andere verontreinigingen (metaaldeeltjes, vuil en huishoudelijk afval). Voor deze kunststofafvalstoffen is het mechanische recyclingproces een uitdaging, waardoor de kwaliteit van de gerecycleerde stroom vaak niet voor productieve doeleinden kan worden gebruikt en vaak op een stortplaats terecht komt.

Wat de recycling van 3D-geprinte voorwerpen betreft, is een schone aanvoer van homogeen materiaal cruciaal om een goede kandidaat voor herverwerking te zijn. Zo zijn geloste PLA-prints die gescheiden zijn van de rest van de materialen een goede kandidaat voor recycling, maar ze kunnen niet samen met ABS-prints worden gerecycleerd. Materialen van verschillende kwaliteiten moeten soms ook worden gescheiden. Sommige PLA-materialen op de markt hebben bijvoorbeeld speciale toevoegingen zoals glasvezel. De toevoeging van glasvezel is gewoonlijk hoog (10-30 gewichtsprocent) en kan dus niet worden gerecycled als normaal PLA-materiaal. De reden voor het sorteren van kunststoffen is dat verschillende soorten kunststoffen of onzuiverheden doorgaans niet mengbaar zijn met de matrixkunststof, waardoor gerecycled materiaal met minder goede eigenschappen ontstaat.

Het mechanische recyclingproces heeft echter beperkte kringlopen omdat kunststof een thermomechanisch proces ondergaat en afbreekt. De afbraak omvat ketenscheuren, oxidatie, hydrolyse en door radicalen veroorzaakte ketenvernetting. Bijgevolg wordt het molecuulgewicht van het recyclaat verminderd en de molecuulgewichtsverdeling verbreed, zodat het recyclaat slechtere mechanische eigenschappen heeft (bijvoorbeeld minder slagvast en minder sterk), verkleurt en een ander verwerkingsvenster heeft dan de nieuwe soorten.

In het geval van PLA, het meest beschikbare 3D-printmateriaal op de markt, daalt het molecuulgewicht van 289.000 g/mol naar 154.000 g/mol na 5 keer mechanische recycling en daalt de impactenergie van 3,6 kJ/m² naar 2,4 kJ/m² [1]. Indien tijdens het recyclingproces vocht aanwezig is, treden extra hydrolysereacties op die splitsing van de eind- of tussenketens veroorzaken en de zuurgraad van het polymeer verhogen. Ook de ketenlengte en het molecuulgewicht van het polymeer worden sneller afgebroken dan bij recycling in een gedroogde omgeving. Vergeleken met de gedroogde situatie heeft recyclaat uit een vochtig proces meer last van verkleuring, zoals te zien is in de vergelijking in figuur 2.3.1.1-1. Daarom zou de aanbevolen recyclingcirkel voor PLA niet meer dan 5 keer mogen zijn in vochtvrije omstandigheden.



Figuur 2.3.1.1-1. Verkleuringseffect van PLA-recyclaat onder verschillende recyclingcirkels

Amorfe rPETG wordt grotendeels geproduceerd door Reflow en wordt gebruikt voor groot formaat printen. Vidakis et al. [2] bestudeerden de recycleerbaarheid van PETG van 6 opeenvolgende 3D-print- en recyclageprocessen. Hun resultaten toonden aan dat wanneer PETG 3-4 keer wordt gerecycled, het materiaal harder en brozer wordt. Het materiaal wordt ook kneedbaarder en degradeert meer tijdens de 5e en de 6e recyclingronde. Dit resultaat suggereert dat PETG 4 tot 6 keer kan worden gerecycled.

Om kunststofdegradatie als gevolg van de thermische en mechanische factoren tijdens de recycling tegen te gaan, worden verschillende additieven aan het recyclaat toegevoegd om het gedrag van het materiaal bij hoge temperaturen tijdens het recyclingproces te stabiliseren en zo degradatie te voorkomen en/of de materiaaleigenschappen te verbeteren. Ingedeeld volgens de additievenmechanismen zijn er sterk vertakte fysische crosslinkers [3] en rubberachtige additieven [4] om de materiaaleigenschappen van de gerecycleerde kunststoffen fysisch te verbeteren. Soms worden ook nieuwe kunststoffen in porties

toegevoegd om de eigenschappen van het recycalaat te verbeteren. Andere additieven reageren tijdens het extrusie proces van de recycling om dit proces te stabiliseren en te verbeteren. Voorbeelden zijn radicaalvangers [3], peroxideketenverlengers[5, 6], anti-verkleuring en anti-geurstoffen.

Met korte vezels versterkte thermoplastische composieten (SFRC) en met deeltjes gevulde thermoplastische composieten (PFTC) worden steeds gebruikelijker in de 3D-printindustrie. Voorbeelden hiervan zijn engineering-grade PP glasvezelgevuuld filament en deeltjesgevuuld mat PLA filament. Reflow heeft net een rPP x glasvezelcomposiet gelanceerd, waarbij de 25,5% glasvezel de eigenschappen van de gerecycleerde kunststof, afkomstig van teruggewonnen visnetten, versterkt. Dit is een goede illustratie van hoe versterking de levensduur van afgebroken polymeren kan verlengen.

Versterkende vezels kunnen zowel anorganisch als organisch zijn. Algemeen gebruikte anorganische vezels zijn glas en koolstof, terwijl organische vezels meestal bestaan uit aramide en natuurlijk hout van verschillende oorsprong. Pigmenten en deeltjesadditieven zoals talk hebben een lage volumebreuk in de polymeermatrix, zodat terugwinning van die additieven niet praktisch is. In de meeste gevallen worden gebruikte PFTC's gedeeltelijk teruggewonnen in de nieuwe productielijn van dezelfde kwaliteit.

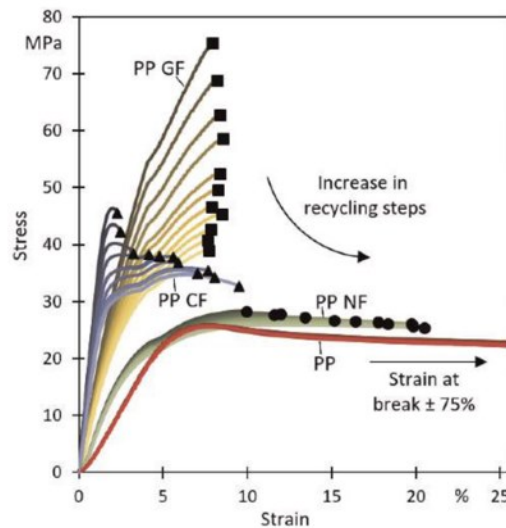
Korte vezels kunnen worden teruggewonnen uit SFRC's en opnieuw worden gebruikt als gerecycleerde vezels. Zowel gerecycleerde koolstofvezels (rCF) als gerecycleerde glasvezels (rGF) kunnen worden verkregen uit kunststofcomposieten met verschillende methoden, zoals pyrolyse, pyrovergassing, solvolyse en microgolftthermolyseproces. [7] Niettemin is het recyclen van plantaardige vezels een uitdaging, omdat plantenvezels (bijvoorbeeld hennep, vlas en bamboe) vergelijkbare thermische afbraaktemperaturen hebben als de kunststof matrix.

Pyrolyse-recycling is de meest gebruikelijke methode in de huidige recyclingindustrie. Tijdens het pyrolyseproces worden gerecycleerde vezels verkregen door de kunststofmatrix van SFRCs te verwijderen met de combinatie van het ontledingsproces onder hoge druk en bij hoge temperatuur. Om de compatibiliteit tussen de gerecycleerde vezels en de kunststof matrix te verbeteren, worden de gerecycleerde vezels normaal gezien gecoat met een laagje lijm. Dit proces is echter kostbaar en daarom zijn de meeste onderzoeken alleen gericht op de terugwinning van koolstofvezels. Gerecycleerde koolstofvezels zijn compatibel met de maagdelijke kwaliteit, die een derde goedkoper is dan de maagdelijke kwaliteit en meer dan 90% mechanische integriteit behoudt.[8]

Het mechanisch vermalen van thermoplasten van zowel SFRC als PFTC tot korrels is ook een gebruikelijke recyclingmethode in de polymeerindustrie. Mechanische recycling bestaat uit het breken of versnipperen van een onderdeel, gevolgd door het fijnmalen tot kleinere stukjes. Deze stukjes worden dan gedeeltelijk toegevoegd aan het fabricageproces om nieuwe composieten te produceren. Tijdens het maalproces worden de vezels echter ingekort en hun verdeling verbreed. De degradatie van vezels tast de mechanische eigenschappen van de STRC's aan, zodat er een recyclagelimiet is.

In het onderzoek van Evens et al. [9] wordt de mechanische recycleerbaarheid van glasvezel (GF), koolstofvezel (CF) en natuurlijke vlasvezel (NF) vergeleken in 10 opeenvolgende spuitgiet- en opwerkingsprocessen. Het onderzoek concludeerde dat: Ten eerste kunnen GF-, NF- en CF-composieten tot 5 keer worden gerecycled binnen het aanvaardbare niveau; Ten tweede is de recycleerbaarheid beperkt vanwege de degradatie van de polymeermatrix en de vezellengte tijdens het recyclingproces; Ten derde ondervinden GF-composieten na meervoudige recycling drastische degradatie, waardoor de GF-composieten het minst recyclebaar zijn. De trek-rek curve van de studie is weergegeven in figuur 2.3.1.2.-1. Het basis-PP-materiaal is stabiel binnen deze 10 cirkels en vertoont een soortgelijke trekspanning-rek eigenschap. Daarom dient het basis-PP als een goede benchmark voor de studie van de recycleerbaarheid van de vezels. Bij de vlas-SFRC's en hun recycalaten is de mechanische

versterking marginaal en de degradatie beperkt met slechts een toename van de breukrekwaarde. Dit wijst erop dat de PP natuurvezelcomposiet meerdere malen kan worden gerecycleerd. Voor koolstofvezel vertoont de rek bij breuk na 10 opeenvolgende recyclage- en spuitgietstappen dezelfde stijgende tendens als bij de vlascomposiet, terwijl de treksterkte en de modulus afnemen. In de spanning-rekcurve vertoont PPCF een brosse naar taaie overgang, wat een verbetering van de taaigheid van PPGF impliceert.



Figuur 2.3.1.2-1. De spanning-rekdiagrammen in functie van de recyclagevolgorde voor PP koolstofvezel (PPCF in een zwart driehoeksymbool), PP glasvezel (PPGF in een zwart vierkant symbool), PP natuurlijke vlasvezel (PPNF in een zwart cirkelsymbool), en PP (in een rode lijn).

Er zijn twee recyclingstrategieën voor continue vezel versterkte composieten. Ten eerste, mechanische recycling waarbij continue vezelcomposiet wordt vermalen tot lange vezel versterkte composiet en vervolgens tot korte vezel versterkte composiet, en tenslotte tot poeder versterkte kunststoffen. [13] Deze recycling methode offert het vezelversterkende effect op en de plastic matrix degradatie kan slechte versterking van de vezel veroorzaken. In de tweede plaats is een veelbelovende recyclingroute het zelf recyclen van continue vezels. Tian et al [14] onderzochten het proces van herverwerking van continue koolstofvezelversterkte PLA composiet in 3D printen. Zij slaagden erin de 3D-geprinte objecten om te vormen tot continue koolstofvezel prepreg filament en gebruikten dit filament vervolgens voor 3D-printen. Gerecycleerde 3D prints van continue koolstofvezels vertoonden een verbeterde laagbindingssterkte van 25%. Dit recyclingproces vindt echter op experimentele schaal plaats en de gerecyclede voorwerpen moeten een eenvoudige geometrie hebben.

Kortom, korte vezel versterkt 3D print filament heeft een aanvaardbare recycleerbaarheid, maar pigmenten en additieven kunnen deze eigenschap belemmeren door de afbraaksnelheid van het recyclaat te versnellen. Vergeleken met de terugwinning van natuurlijke vezels en glasvezel is alleen de extractie van de koolstofvezel uit SFRC's het meest praktische proces. Vezelcomposieten zijn echter geschikt voor mechanische recycling via het maal- en recyclingproces. De recyclingcirkels kunnen tot 5 keer oplopen. Men kan ook verwachten dat het recyclaat lagere mechanische eigenschappen heeft door vezeldegradatie en inferieure vezel-matrix binding, tenzij dit wordt gecompenseerd met specifieke additieven.



Sorteren van kunststoffen in een kleinschalige gedecentraliseerde structuur

Mechanische recycling van post-consument kunststoffen wordt steeds meer gepromoot als middel om tot een circulaire economie te komen met minder afvalproductie en energie-uitputting. Dit recyclingproces zet afvalkunststoffen om in een secundair materiaal dat kan worden teruggevoerd in het productiesysteem om het gebruik van nieuwe kunststoffen te vervangen of te verminderen.

Het mechanische recyclingproces omvat inzameling, sortering en voorbehandeling, ontsmetting en herverwerking van gesorteerde materialen. Aangezien de post-consument kunststoffen die op verschillende plaatsen worden ingezameld een mengsel zijn van verschillende soorten kunststoffen en andere verontreinigingen (metaal, pigment en afval van andere bronnen), beperken deze mengsels de productie van hoogwaardige en homogene materialen omdat deze mengsels de mechanische eigenschappen aantasten. Daarom is het sorteren en voorbehandelen van kunststoffen van cruciaal belang voor het behoud van de kwaliteit van gerecycleerde materialen. [15]

Zoals blijkt uit een onderzoek [16] naar het huidige Nederlandse recyclingsysteem voor plastic verpakkingsafval na consumptie, kan het plastic afval worden gesorteerd en gecategoriseerd volgens materiaalsoorten als poly(ethyleentereftalaat) (PET), poly(ethyleen) (PE), poly(propyleen) (PP), film en mix. De categorie film bevat zowel PP- als PE-folie en de mix omvat gepigmenteerde PET, gelamineerde verpakkingen en andere onscheidbare materialen. Biobased PLA-plastic kan niet worden gerecycleerd omdat het door de huidige sorteermachine niet kan worden herkend. Bovendien is PETG, dat in de 3D-printindustrie wordt gebruikt, onverenigbaar met PET en moet het apart worden gerecycleerd. Daarom is het jammer dat de meeste 3D-geprinte materialen zoals PLA en PETG ongeschikt zijn voor de huidige mechanische recyclinginstallaties. Dit pleit echter wel voor kleinschalige decentrale sorteer- en recyclingfaciliteiten voor 3D-geprinte producten.

Technieken

De meest eenvoudige sorteermethode is handmatige sortering op basis van visuele identificatie door operators. Dit proces is echter tijdrovend en arbeidsintensief en daarom alleen geschikt voor het scheiden van omvangrijke kunststoffen. Automatische sorteertechnieken op basis van nabij-infraroodstralen (NIR) zijn veelbelovende alternatieven. Elk uniek polymeer reflecteert zijn unieke spectrum bij blootstelling aan nabij-infrarode lichtgolven, die op hun beurt worden gebruikt voor het sorteren van het materiaal. Met deze methode kunnen echter geen donkergekleurde kunststoffen worden geïdentificeerd, zoals met carbonzwart gepigmenteerde kunststoffen.[17] Daarom wordt de NIR-sortering vaak gekoppeld aan een fysische sorteermachine, zoals een zink-drijf-proces of een hydro-cycloon-proces.[17] Zo wordt de kunststof van het PET-type gescheiden van de polyolefinen (PP en PE) door het zink-drijf-proces, aangezien de polyolefinen bovenop de scheidende vloeistof drijven. Verder zijn er anorganische fluorescerende markers[18] die aan basismaterialen kunnen worden toegevoegd om te helpen bij het sorteren van verschillende kunststoffen en die op industriële schaal zijn toegepast bij de recycling van verpakkingen.

Het sorteren en recyclen van post-consumer 3D prints is cruciaal om de 3D printing industrie meer circulair te maken. Omdat verschillende soorten 3D-printmaterialen en verschillende fabrikanten verschillende additieven in hun 3D-printmaterialen hebben, is het belangrijk om post-consumer 3D-prints te sorteren op materiaalsoort en fabrikant.

Uitvoering

Reflow heeft momenteel een portefeuille van gerecycleerd 3D-printmateriaal bestaande uit rPPGF, rPA6, rPACF, rPMMA, rPETG, rPLA en mat rPLA. Zoals eerder vermeld, zijn al deze thermoplasten en hun composieten slechts een beperkt aantal cycli recyclebaar voordat er



diepgaande degradatie optreedt. Een goed sorteer- en recyclingproces kan de 3D-prints voor eindgebruik omzetten in waardevolle grondstoffen voor Reflow en kan mogelijk een winstgevend recyclinggedrag creëren voor de eindgebruikers.

Reflow-eindgebruikers kunnen in hun print lab worden aangemeld voor het recyclingproces na het printen. Van de Reflow-materialen zijn er niet-gepigmenteerde materialen zoals rPMMA, rPETG en rPLA die geen additieven bevatten. Het recyclingproces van deze kunststoffen is eenvoudig en daarom kunnen Reflow-eindgebruikers ze in het sorteer- en recyclingproces opnemen. Eindgebruikers zouden Reflow-materialen moeten scheiden van andere fabrikanten om mogelijke verontreiniging door additieven te elimineren. Voor composieten en gepigmenteerde materialen in de portefeuille vereist het recyclingmechanisme meer stappen. De eindgebruiker zal eerst de materialen moeten scheiden op basis van het gekochte product. Deze scheiding kan ook worden uitgevoerd in Reflow-faciliteiten na de aanschaf van de nodige apparatuur.

Afhankelijk van de omvang van de eindgebruikers zijn er twee recyclingsscenario's:

Scenario 1: Eindgebruikers met een kleine kwantiteit van Reflow-materiaal

In dit scenario hebben de eindgebruikers een beperkte hoeveelheid Reflow-filament en kopen zij waarschijnlijk ook filament van andere fabrikanten. Eindgebruikers moeten de prints eerst scheiden op kleur en vervolgens op materiaaltype. Vervolgens kunnen ze deze naar Reflow sturen voor het reinigings- en recyclingproces.

Scenario 2: Eindgebruikers met een grote kwantiteit van Reflow-materiaal

We hebben ook partners die grote hoeveelheden Reflow-pellets en filament gebruiken voor hun productie. Zij kunnen de afvalprints sorteren en comprimeren per materiaaltype en kleur en ze vervolgens terugsturen naar Reflow. Hun afvalinzameling is schoon en minder vervuild door de stromen van andere fabrikanten. Deze groep gebruikers kan ook hun afval versnipperen en de afvalvlokken terugsturen naar Reflow als zij het materiaal sorteren volgens de handleiding van Reflow. Aangezien deze groep een grotere hoeveelheid materiaal gebruikt, zijn zij goede alpha testers voor het project. Reflow zal de materiaalinput onderzoeken en het afval recycleren met de hulp van recyclers.

Reflow ontvangt kunststofafval van deze twee gebruikersgroepen en voert vervolgens materiaalinspecties uit om de kwaliteit van het sorteerproces te waarborgen. Aangezien 3D-printafval na gebruik wordt blootgesteld aan verschillende gebruikssituaties en veroudering, kan het afval schadelijke materiaaldegradatie vertonen. Reflow moet daarom recyclagebenchmarks en materiaalnamecriteria opstellen om te bepalen welke teruggewonnen kunststoffen samen kunnen worden gerecycleerd.

Kwaliteitstesten en materiaalevaluatie

Zoals vermeld in het vorige deel, kunnen klanten weliswaar helpen bij het sorteren van kunststofafval, maar post-consumpt 3D-printafval kan nog steeds een mengsel zijn van verschillende materiaalsoorten en kleuren. Het ingezamelde kunststofafval kan ook onzuiverheden bevatten die door de gebruiksdoeleinden zijn toegevoegd of materiaaldegradatie door zonlicht en UV-degradatie. Daarom moeten de gesorteerde materialen worden geëvalueerd. Omdat kunststoffen een beperkte recyclagecyclus hebben en elk hergebruik de eigenschappen van de recyclaten aantast, moeten wij bovendien kunststofafval met verschillende thermische voorgeschiedenis scheiden en de grens van de recyclagetijd bepalen.

Op basis van onderzoek naar materiaaldegradatie wordt het volgende ontwerp voorgesteld voor het recyclingproces van afgedankte 3D-prints.



Stap 1. Visuele controle

Deze stap is bedoeld om sterk vervuilde kunststoffen uit de afvalinvoer te filteren. Afvalprints met een slechte geur, een mengsel van verschillende kleuren en/of vervaagde kleuren moeten worden gescheiden in verschillende categorieën materialen.

Stap 2. Near-infrared (NIR) en and Dynamic Scanning Calorimetry (DSC)

NIR-detectie is een doeltreffend instrument om de samenstelling van het door verschillende eindgebruikers ingezamelde bulkafval te bepalen. Omdat elk materiaal een uniek spectrum heeft, kan de NIR-detectie meer inzicht verschaffen als de visuele sortering effectief is. Donker gepigmenteerd plastic afval kan echter NIR-detectiefouten veroorzaken. Een nauwkeuriger Differential Scanning Calorimetry-test kan het thermische verschil van verschillende materialen meten om te helpen bij het sorteren. Van kunststofmengsels kunnen afzonderlijke categorieën worden gemaakt die samen kunnen worden gerecycleerd.

Stap 3. Schoonmaken en versnipperen op laboratoriumschaal

In deze stap worden 3 kunststofmonsters verzameld op willekeurige plaatsen van het ingezamelde afval. Drie willekeurige monsterverzamelingen uit dezelfde inzamelbatch moeten representatief zijn voor de hele kwaliteit van het kunststofafval. De verzamelde monsters worden vervolgens gereinigd met een mengsel van alcohol en water om oppervlakteverontreiniging te verwijderen. Vervolgens worden de monsters gedroogd om overtollig vocht te verwijderen. Na deze stap worden de monsters van het kunststofafval versnipperd tot vlokken voor verdere tests.

Stap 4. Vocht en Melt Flow Index (MFI) inspectie

De vochtigheidstest is bedoeld om het vochtgehalte in de versnipperde vlokken vast te stellen, zodat kan worden beoordeeld of het droogproces voltooid is. Bovendien kan vocht dat in gerecycleerde materialen achterblijft, hydrolysedegradatie van de kunststoffen veroorzaken, zodat het vochtgehalte voor elk materiaal onder het voorgestelde niveau moet liggen voordat het opnieuw wordt verwerkt. De Reflow vochtigheidstest is gebaseerd op een halogeen-licht vochttester.

Ligt het vochtgehalte onder de aanbevolen waarde, dan zijn de vlokken geschikt voor materiaalinspectie. De MFI-waarde wordt gemeten door de MFI-machine bij Reflow. Bij de eerste inspectie wordt de MFI-waarde van de herwonnen vlokken geëvalueerd. Reflow maakt voor elk materiaal de benchmark MFI na verschillende recyclingcirkels en genereert een MFI-venster waarbinnen het recycleert nog geschikt is voor extrusie. Als het ingezamelde materiaal een hoge MFI-waarde heeft buiten het aanvaardbare venster, dan wordt de ingezamelde partij geïsoleerd.

Stap 5. Voorbereiding van ISO-standaardtestmonsters

Als de teruggewonnen vlokken een aanvaardbare MFI-waarde hebben, is de volgende stap het voorbereiden van monsters voor mechanische evaluatie. Reflow heeft een hydraulische warmpersmachine en ISO-modellen nodig voor de monstervoorbereiding. De monstervlokken worden verwarmd tot boven het smeltpunt of de verwekingstemperatuur en vervolgens onder druk (10 MPa) in ISO-modellen geperst. De ISO-modellen omvatten ISO 527 trekhuizen en staven voor buig- en botsproeven. De monstervoorbereiding met hete pers is een snelle manier om testmonsters voor te bereiden met minder benodigde hoeveelheid plastic.

Stap 6. Evaluatie van de mechanische eigenschappen van kunststofafval na consumptie

Recyclaten hebben een dalende trend in slagvastheid en inferieure materiaaleigenschappen, waardoor deze materialen slechts in beperkte mate gerecycled kunnen worden. Daarom zal Reflow de mechanische eigenschappen van recyclaten na elke recyclagecirkel evalueren en criteria opstellen om de inputafvalstromen die niet geschikt zijn voor recycling te screenen. Reflow beschikt over een universele mechanische tester (UTM) voor trek-, buig- en drukwaarden. Reflow beschikt over een impacttester voor het bepalen van de impactwaarde. Kunststofafval waarvan de mechanische eigenschappen niet

voldoen aan de mechanische criteria, worden eerst gecompoundeerd in de compoundingstap.

Stap 6B. Voorwaardelijke Compounding stap

Als de mechanische eigenschappen niet aan de criteria voldoen, moet de compounding worden uitgevoerd op een dubbelschroefsextruder. Tweeschroefsextruders zullen in staat zijn de additieven die nodig zijn om deze waarden weer te verhogen, goed te mengen. Het zullen vooral vezels zijn die aan de kunststof worden toegevoegd. Hierdoor gaan de trek- en buigsterkte omhoog, maar wordt het materiaal ook brozer. Door ook een beetje impact modifier toe te voegen kun je dit gedrag tegengaan.

Stap 7. Sorteren en classificeren van ingezameld kunststofafval

Op basis van eerdere visuele, materiaalsamenstellingen, MFI en mechanische tests kan Reflow kunststofafval uitsluiten dat niet geschikt is voor recycling en waarden verkrijgen voor elke teruggewonnen partij. Op basis van de MFI- en mechanische benchmarkwaarden kan Reflow recyclaten scheiden in 1e gerecycleerd, 2e gerecycleerd, etc. - tot 5 recyclagetijden. Reflow zal hetzelfde materiaal met dezelfde verwerkingsgeschiedenis samen inzamelen. Als het bulk kunststofafval een hoge zuiverheidsgraad heeft (weinig stofvervuiling en éénkleurige bron) en als het afval nog niet eerder gerecycleerd werd, kan het gerecycleerd worden op de Reflow site. Anders wordt het afval verscheept naar een lokale kunststofrecycler in het recyclagenetwerk van Reflow.

Stap 8. Versnipperen, schoonmaken en drogen van de partijen

Na het sorteren van het post-consumptie drukafval is de volgende stap het versnipperen van de omvangrijke prints in vlokken. Er zijn twee shredderstappen: De eerste stap is het gebruik van een tegenkamhakselaar om het grove afval te verkleinen tot vlokken van minder dan 300 mm[19]. Vervolgens worden de vlokken met behulp van een eenassige hakselaar versnipperd tot vlokken van minder dan 60 mm[19], die geschikt zijn als grondstof voor pelletisering. De eerste versnipperingsstap kan worden overgeslagen voor prints die via desktopprinters worden verzameld. Afbeeldingen van deze twee typen shredders zijn opgenomen in de figuren 2.3.1.5-1 en 2.3.1.5-2.



Figuur 2.3.1.5-1. Tegenkamhakselaar



Figuur 2.3.1.5-2. Eenassige versnipperaar



Na het versnipperen van de schone herwonnen afvalprints kan Reflow de interne reinigingslijn gebruiken om stof en andere onzuiverheden die op de vlokken achterblijven te verwijderen. Hiervoor volstaan een ultrasone reiniger en een warmwaterbad. Ultrasone reinigers gebruiken ultrageluid (golven van 20-40 kHz) om de materialen en het reinigingsmiddel in trilling te brengen. Aan de reiniger kunnen verschillende vloeistoffen worden toegevoegd. Wanneer een vloeistof door de trillingen in beweging wordt gebracht, ontstaan kleine belletjes rond het oppervlak van de te reinigen materialen. Deze belletjes vernietigen de adsorptie-eigenschap van het vuil op de materialen. Met behulp van met opgeloste zuurstof oververzadigd water kan het vuil worden afgewassen zonder dat er chemicaliën nodig zijn.[20] Gereinigde schilfers worden bij Reflow gedroogd door een droogtrommel die centrifugerende kracht en warmtestroom toepast om de vlokken continu en efficiënt te drogen. De gedroogde vlokken zijn klaar voor compounding, pelletisering en single-screw extrusie om gerecycled 3D print filament te produceren.

Stap 9. Recycling van hoogzuiver 3D-printafval bij Reflow

Reflow versnipperd het afval in vlokken en wast het stof uit het oppervlak. Daarna worden de vlokken gedroogd om het vocht te verwijderen en gedeeltelijk in de Reflow-productielijn ingevoerd. Reflow zal de extrusielijn opzetten die beschikbaar is voor inhomogene vlokken om gerecycleerde 3D-printingfilamenten te produceren. De extrusielijn vereist de extractie van vluchtige stoffen en produceert bubbelvrije filamenten uit vlokken. Ondertussen zal Reflow evalueren welk deel van elk materiaal opnieuw kan worden toegevoegd aan de filamentproductielijn.

Alternatieve stap. Recycling van 3D-printafval op een lokale recyclinglocatie.

Recollect kunststofafval dat niet geschikt is voor directe extrusie in de Reflow site zal worden versnipperd tot vlokken en verzonden naar een lokale recycler. De lokale recycler zal additieven toevoegen om de kwaliteit van het recyclaat te behouden en de vlokken tot pellets te pelletiseren. Reflow ontvangt de pellets en extrudeert ze tot filamenten.

Aanvullende apparatuur voor sortering en kwaliteitscontrole omvat 1. NIR-handdetector 2. DSC om verschillende materialen te sorteren 3. Shredder om plastic prints in vlokken te breken 4. 5. Hydraulische warmpers en ISO modellen voor monstervoorbereiding voor de mechanische test 6. Impact tests om de mechanische eigenschappen van recyclaten te bepalen 7. Doseer- en extrusieapparatuur voor het opnieuw extruderen van gerecyclede vlokken 8. Twin-screw extruder voor in house compounding 9. Verpakkingsapparatuur voor vlokken voor levering aan de lokale recycler.

Samenstellingseisen en verschillende additieven om de productkwaliteit te verhogen

Gerecycleerde kunststoffen met een verschillende recyclagegeschiedenis hebben een verschillend viscositeits- en smeltgedrag als gevolg van de afbraak van kunststof tijdens de recyclage. Bovendien kunnen door klanten en Reflow gesorteerde kunststoffen nog steeds kunststofverontreinigingen bevatten. Die kleine verontreinigingen kunnen van hetzelfde type kunststof zijn, maar van verschillende kwaliteiten of verschillende kunststoffen. Directe extrusie van de verontreinigde kunststoffen kan leiden tot versnelde materiaaldegradatie en inferieure materiaaleigenschappen. De reden voor recyclaten van lage kwaliteit is dat de meeste kunststoffen niet compatibel zijn, zodat de interface-adhesie tussen de verontreiniging en de bulkkunststof zwak is, wat leidt tot een lage spanning-rekoverdracht. Daarom zijn extra additieven en een mengstap nodig om homogene recyclaten te verkrijgen die geschikt zijn voor gesloten kringlooprecycling in de 3D-printindustrie.

De additieven voor mechanische recycling kunnen per functie in 3 types worden ingedeeld[21]: 1. Thermische stabilisator om kunststoffen te beschermen tegen thermomechanische degradaties. Een voorbeeld is een thermische stabilisator bij PP-recycling. 2. Compatibilisator om de mengbaarheid in kunststofmengsels te verbeteren en koppelmiddel om het bevochtigen van vulstoffen in een kunststofmatrix te verbeteren. Maleïnezuuranhydridecopolymeer wordt gewoonlijk gebruikt als compatibilisator. 3. Andere

additieven om de materiaaleigenschappen van recyclaten te verbeteren. Voorbeelden zijn ketenverlengers om het moleculaire gewicht van gerecycleerd PLA te verbeteren en talk om de mechanische sterkte van gerecycleerd PP te verbeteren.

Reactieve extrusie is de methode om de reactie van additieven met de matrixkunststof op gang te brengen en de dispersie en distributie van additieven in de matrix te verbeteren. Hoewel zowel enkelschroefs- als dubbelschroefsextruders als continue materiaalstroomreactoren voor reactieve extrusie zijn gerapporteerd, is de dubbelschroefsextruder in de industrie overheersend. De enkelschroefsextruder heeft 3 functionele zones: materiaaltoevoerzone, overgangzone en smeltdoseerzone en de extruder verwerkt de kunststof op basis van verwarming en wrijvingskracht. Een enkelschroefsextruder kan echter slechts beperkt materiaal mengen en kan niet omgaan met vluchtige emissies in het extrusieproces. Het tweeschroefextrusiesysteem is ontwikkeld op basis van de enkelschroefsextruder. Er zijn twee typen van tweeschroefextrusie: intermeshing tweeschroefsextruders met twee symmetrische schroeven en non-intermeshing typen. Afhankelijk van de draairichting van de schroeven zijn er co-roterende en contraroterende types. Een tweeschroefsextruder kan grondstoffen in verschillende vormen verwerken (bv. pellets, vlokken of poeder) en heeft betere meng-, ontluuchtungs-, reactie- en zelfreinigende functies dan de enkelschroefsextruder.

De tweeschroefsextruder met co-rotating intermeshing schroefgeometrie is het meest voorkomende extrudertype in de industrie en is geschikt voor de reactieve extrusie van gerecycleerde kunststoffen met additieven.[22] Doordat de schroeven in dezelfde richting draaien, wordt het materiaal van de ene schroef naar de andere overgebracht en ondergaat het een constante menging. Bovendien creëert de intensieve en constante vernieuwing van het schroefoppervlak favoriete ontgassingsomstandigheden om afgebroken vluchtige stoffen te verwijderen. Het modulaire ontwerp en de montage van de schroef- en vatsecties van de tweeschroefsextruder, samen met de speciale voedings- en ontluuchtungspoorten, bieden voldoende flexibiliteit voor elk type materiaalrecycling. Drie soorten schroefelementen worden algemeen gebruikt in co-rotating intermeshing dubbelschroefextruders: kneedblokken, mengtandwielen en transportschroefelementen. Kneedblokken worden gebruikt om vaste additieven te verspreiden en de kunststoffen gedeeltelijk te smelten. Mengtoestellen zorgen voor de verdere verspreiding van fijne deeltjes additief en homogeniseren de plastic smelt en additieven. De transportschroef transporteert de kunststof door de extruder.

Het vereiste van een co-roterende dubbele schroef hangt grotendeels af van de materialen die worden verwerkt. Bij de recycling van vezelcomposieten moet men, om breuk van broze vezels en de daaruit voortvloeiende verzwakking van de composieten te voorkomen, mingelementen met hoge schuifspanning uitsluiten. Terugmengende schroefelementen die een lange verblijftijd van de vezels en een vezeldistributieve menging bevorderen, worden meer aanbevolen. Deze gebruikt bovendien een stroomafwaartse zij-invoer voor extra vezeltoevoeging op een vatpositie waar het polymeer al gesmolten is en gebruikt een ontluuchtungspoort stroomafwaarts van de invoerpositie om vocht in de vezels af te zuigen. Voor het toevoegen van poederadditieven zijn mingelementen met hoge schuifsterkte nodig om poederagglomeraties af te breken en uniforme mengsels te produceren. Voor een nauwkeurige dosering van pigmenten en additieven in masterbatchvorm zijn gravimetrische doseereenheden nodig voor de tweeschroefsextruder.

Welke apparatuur en proceswijzigingen zijn nodig in de extrusielijn om de toevoeging van meervoudig gerecyclede materialen mogelijk te maken? Wat zijn mogelijke recepten voor 3D printen, waarbij (deels) multi-gerecyclede materialen worden gebruikt?

Reflow beschikt momenteel over drie extrusielijnen voor de productie van 3D-printfilament. De basiskunststoffen zijn in pelletvorm en de additieven in masterbatchvorm om een consistente materiaaltoevoer te garanderen. Aangezien de versnipperde vlokken van Reflow

verschillende vormen hebben en de werkelijke dichtheid van de vlokken varieert, zijn directe vlokdosering en extrusie problematisch.[23] Daarom is het noodzakelijk om vlokken om te zetten in pellets en vervolgens pellets te gebruiken voor de productie van gerecycleerd filament.

Zoals vermeld in het vorige hoofdstuk, wordt een co-rotating intermeshing tweeschroefsextruder algemeen gebruikt in de industrie voor de reactieve samenstelling van recyclaten en het modulaire ontwerp van de schroef kan zich aanpassen aan verschillende materiaaltoevoeren. Hoogwaardige teruggewonnen vlokken op de Reflow site kunnen door deze apparatuur gepelletiseerd worden tot homogeen recycalaat. Deze tweeschroefextrusielijn is uitgerust met een ontgassingspoort die verbonden is met een vacuümpomp om vluchtige stoffen en vocht uit de plastic smelt te halen, anders bevat het recycalaat luchtballen. De tweeschroefextruder moet ook een zeefwisselaar bij de kop installeren die verontreinigingen filtert en de stroomkanalen optimaliseert. Aan het einde van de dubbelschroefextruder bevindt zich een granulatiekop met een speciaal ontwerp om de stroom te maximaliseren en een "dood punt" te voorkomen waar het materiaal zou kunnen blijven staan en verbranden.

Vlokken en additieven worden samengesteld in de tweeschroefsextruder en de extrudaatdraden worden afgekoeld door een waterbad en gepelletiseerd tot 3 mm pellets door een pelletizer. De pellets kunnen worden geïntegreerd in Reflow enkelschroefextrusielijnen om de uiteindelijke filamentproducten te produceren. Omdat post-consumer recyclaten meer kans hebben op vervuiling, moeten er in de productielijn klontdetectie- en kleurvariatiedetectie-eenheden worden ingebouwd om de kwaliteit van het filament te controleren. De klontdetectiesensor past infrarood licht toe in 3 assen om abnormale halsvorming en oneffenheden in het filament te detecteren. Kleurdetectiesensoren kunnen worden gebaseerd op het CIE Lab-kleurensysteem om te detecteren of het filament onaanvaardbare kleurvariatie vertoont.

Beperkt door de kwaliteit van het recycalaat, kunnen de gerecycleerde pellets worden gemengd met die van anderen om kwaliteitsfilamenten voor 3D-printing te maken. Hier zijn enkele algemene recepten.

Recept 1. Hoogwaardig recycalaat bij Reflow

Het teruggewonnen grote volume volumineuze prints van de Reflow-partner heeft een consistente bron en minder vervuiling. Als deze prints niet eerder zijn gerecycled, kan Reflow met deze input tweemaal gerecycled filament produceren. Er kan echter kleurvervuiling in het recycalaat zitten, dus deze categorie recycalaat is niet geschikt voor natuurlijke of lichtgekleurde filamentproducten.

Recept 2. Recycalaat van lage kwaliteit uit Reflow recycler

Gerecyclede pellets uit de Reflow recycler bevatten herwonnen prints met verschillende recyclingcirkels en milieuveroudering, waardoor de mechanische eigenschappen sterker achteruitgaan. Daarom is dit type recycalaat niet geschikt voor directe filament extrusie. Reflow zal de mogelijke mengsels met 1st recycalaat en de mengverhouding onderzoeken. Additieven zoals talk en glasvezels worden mogelijk gemengd met het recycalaat om aanvaardbare 3D print filamenten te produceren. Aangezien de recycler donkere pigmenten gebruikt om de kleurconsistentie te behouden, heeft Reflow weinig kans om de uiteindelijke kleur van het filament te veranderen.

Een andere belangrijke vraag die moet worden beantwoord bij de ontwikkeling van een duurzaam materiaal dat aan de bron kan worden getraceerd, is hoe ISO-normen/certificering voor deze processen kunnen worden opgenomen om de kwaliteit en de kwaliteit na consumptie in de productiecertificering te waarborgen?

Zoals vermeld in punt 2.3.1.1. heeft het mechanische recyclingproces beperkte kringlopen omdat het de kunststoffen aantast. Daarom is een zeer belangrijke stap in het recyclingproces het universeel testen van de gerecycleerde kunststoffen om ze aan de juiste normen te laten voldoen. Deze universele tests zijn de tests van de Internationale Organisatie voor Normalisatie (ISO) en kunnen worden uitgevoerd om de thermische, mechanische en reologische eigenschappen van kunststoffen te meten. Op deze manier kunnen alle belangrijke eigenschappen van gerecycled plastic wereldwijd worden vergeleken.

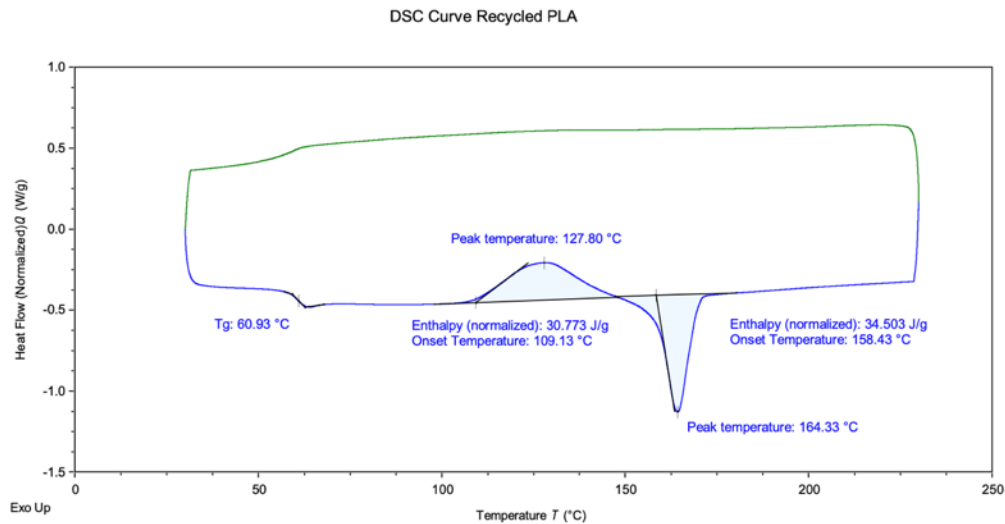
Thermische tests

Thermische tests bestaan meestal uit Thermische GraviMetrical analyse (TGA) en differentiële scanning calorimetrie (DSC). TGA wordt gebruikt om te bepalen bij welke temperatuur een kunststof wordt afgebroken. Het maakt gebruik van een weegschaal om voortdurend de massa van een kunststofmonster te meten terwijl het langzaam wordt verhit tot een vooraf bepaalde temperatuur. Het gewicht van het monster wordt geprojecteerd op de y-as van een grafiek en de temperatuur op de x-as. De TGA-curve toont het verband tussen het gewichtsverlies van het monster en een stijging van de temperatuur, wat de thermische stabiliteit van de kunststof van het monster weergeeft. Een hoge degradatietemperatuur heeft de voorkeur omdat die een groot deel van de thermische stabiliteit van de kunststof bepaalt.

DSC kan de smelttemperatuur, de kristallisatietemperatuur en de glasovergangstemperatuur van een kunststof bepalen. De meeste DSC-machines gebruiken de warmteflux om de veranderingen in de warmtestroom te berekenen. Een heat-flux DSC heeft twee oventjes waarin de monsters worden geplaatst. Eén oven bevat het kunststofmonster en de andere bevat referentiemateriaal. Beide ovens worden verwarmd met dezelfde temperatuurgradiënt en het verschil in warmtestroom wordt gemeten met behulp van temperatuursensoren. Wanneer een semi-kristallijne kunststof, bijvoorbeeld PLA en PP, wordt verwarmd, zal het eerst zijn glasovergangstoestand bereiken (als die nog niet is bereikt), vervolgens de kristallisatietemperatuur en tenslotte de smelttemperatuur. De DSC-curve voor Reflow PLA is weergegeven in figuur 2.3.1.8-1.

Indien de kunststoffen volledig amorf zijn, bijvoorbeeld PETG-materiaal, geeft de DSC-curve alleen de glasovergangstemperatuur weer, aangezien er geen kristallisatie/smelten optreedt. In alle verschillende temperatuurstadia zal de gemeten warmtestroom verschillen van het referentiemateriaal en dit verschil bij die bepaalde temperatuur wordt genoteerd.

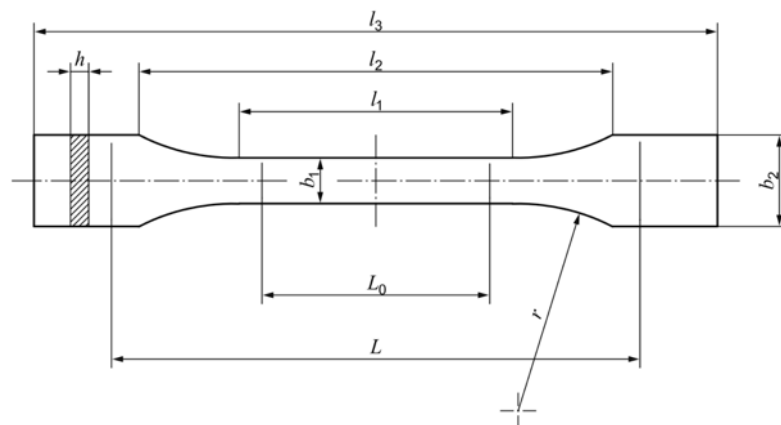
Gerecycleerde kunststoffen ondergaan thermische en mechanische degradatie en vertonen dus verschuivingen in die temperaturen. TGA toont de thermische stabiliteit van gerecycleerde materialen en DSC laat zien of er andere kunststofverontreinigingen zijn en welke additieven er in recyclaten zijn gebruikt. De thermische gegevens geven inzicht in de verandering van de samenstelling van recyclaten.



Figuur 2.3.1.8-1. DSC-curve van Reflow gerecycleerd PLA

Mechanische tests

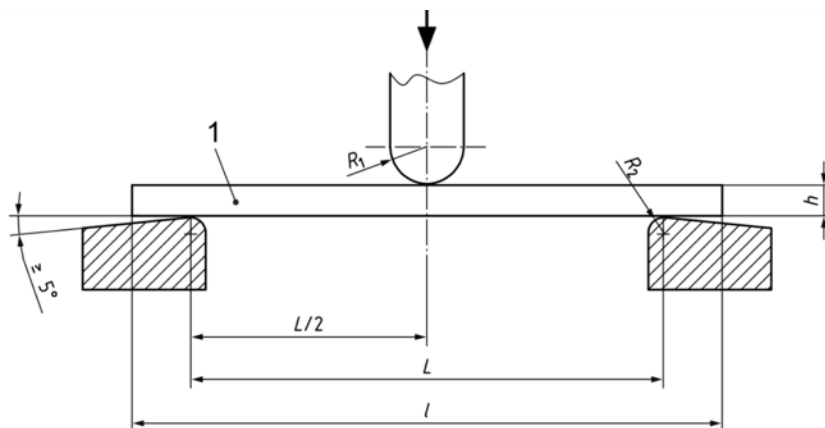
Na elke recyclagecyclus zouden alle kunststoffen minder "sterk" zijn. Daarom is het uiterst belangrijk de mechanische eigenschappen van gerecycleerde kunststoffen te meten. Mechanische tests bestaan gewoonlijk uit trek-, buig-, druk- en slagproeven. Trek-, buig- en drukproeven kunnen worden uitgevoerd met behulp van een universele testmachine (UTM). Trekproeven meten de treksterkte, de rek en de trekmodulus van een kunststof, ook bekend als de trek-/reksterkte van een kunststof. Om deze tests volgens ISO-normen uit te voeren, moeten de in figuur 2.3.1.8-2 afgebeelde trekhondenbotjes worden gemaakt van gerecycleerde kunststoffen. Deze hondenbotten kunnen worden spuit gegoten of 3D-geprint. Uiteraard hebben 3D-geprinte hondenbotten lagere mechanische eigenschappen dan spuit gegoten hondenbotten. Daarom moeten de door 3D-printing bereide hondenbotten worden gespecificeerd en komen de waarden niet overeen met die van spuitgietwerk.



Figuur 2.3.1.8-2 Illustratie van ISO 527-1 B type trekhondenbotten

Het hondenbot wordt aan beide uiteinden vastgehouden door UTM, die er in de lengterichting aan begint te trekken totdat het bot breekt. De vaste kracht wordt uitgeoefend op het hondenbot en de vervorming wordt geregistreerd en vertaald in een trek-spanningskromme. Uit deze kromme kunnen de treksterkte, de rek en de trekmodulus worden afgeleid. De treksterkte wordt gewoonlijk weergegeven als de uiterste treksterkte en geeft aan hoeveel spanning een kunststof kan verdragen voordat hij breekt. De rek geeft aan hoe ver een kunststof kan uitrekken voordat hij breekt en wordt uitgedrukt in percentage. Een combinatie van hoge rek en uiteindelijke treksterkte resulteert in zeer taaie kunststoffen en zijn daarom zeer belangrijke resultaten om de kwaliteit en post-consumptie kwaliteit van de kunststoffen te waarborgen. De trekmodulus (ook wel young's modulus genoemd) meet de stijfheid van een kunststof. Deze wordt berekend door de hoeveelheid spanning te delen door de hoeveelheid rek wanneer de kunststof wordt uitgerekt in het elastische vervormingsgebied van de kunststof. Kunststof dat al 5 keer is gerecycleerd, wordt door de consument vaak als „zwak” bestempeld. Spanningseigenschappen kunnen een betere indicatie geven van de werkelijke sterkte van gerecycleerde kunststoffen. Consumenten kunnen deze cijfers vergelijken met de cijfers van kunststoffen die zij reeds gebruiken en zullen snel beseffen dat sommige gerecycleerde kunststoffen helemaal niet zwak zijn.

Buigtests meten de buigsterkte en de buigmodulus van een kunststof, ook bekend als de buigsterkte van een kunststof. Buigstaven moeten worden gemaakt van gerecycleerde kunststoffen om ook deze tests volgens ISO-normen te kunnen uitvoeren. De vorm van buigstaven is rechthoekig (80 mm, 10 mm en 4 mm). De buigstaaf wordt door UTM gebogen door kracht uit te oefenen op het bovenste middendeel van het blok. Figuur 2.3.1.8-3 illustreert de buigproef.



Figuur 2.3.1.8-3 Illustratie van de buigproef waarbij de buigstaaf (nr. 1) door twee staanders wordt gehouden en de uitgeoefende kracht op de middelste stand bovenaan staat.

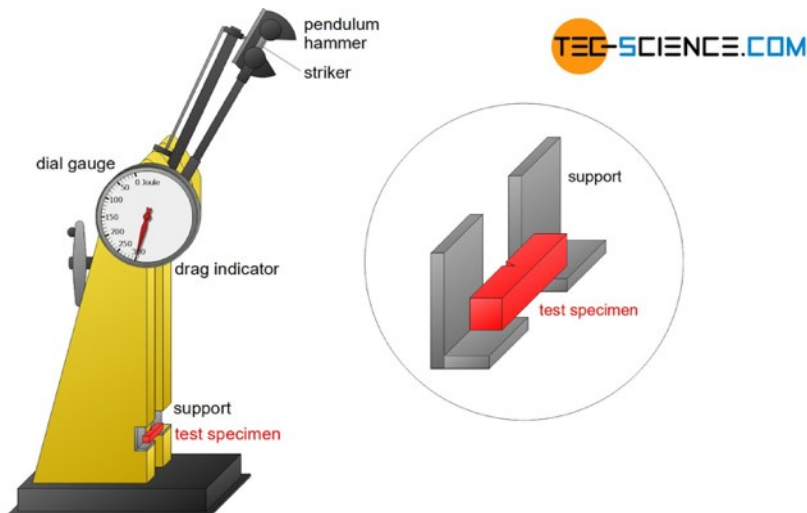
De toegepaste kracht met een constante snelheid wordt toegepast op de buigstaven en de vervorming (rek) wordt dienovereenkomstig geregistreerd en de vormverandering wordt vertaald in een rek-spanningskromme.

Met deze opstelling kunnen de buigsterkte en de buigmodulus uit de grafiek worden afgeleid op dezelfde manier als bij trekmetingen. Gegevens van buigmetingen kunnen op dezelfde manier worden gelezen en geïnterpreteerd als gegevens van trekmetingen. Het belang van de buigeigenschappen geeft de weerstand van het recycleaat tegen afschuifkracht aan.

Compressieproeven zijn het rechtstreekse tegendeel van trekproeven. Ze worden gemeten door met een boven belasting druk uit te oefenen op een kunststofmonster. De UTM wordt uitgerust met 2 steuntafels. Eén boven en één onder het kunststofmonster. Het kunststofmonster moet in een buisvorm worden gegoten of 3D-geprint. Deze buis wordt tussen de steuntafels geklemd. De bovenste steuntafel zal op het proefstuk gaan drukken

en opnieuw worden de hoeveelheid kracht die op het proefstuk wordt uitgeoefend en de rek van het proefstuk zelf in een spanning-rek curve gezet. Uit de grafiek kunnen de uiteindelijke druksterkte en compressiemodulus worden afgeleid. Wanneer een materiaal zeer bros is, zal UTM blijven meten tot het proefstuk breekt, maar wanneer het materiaal flexibel is, zal UTM meten tot de eerste scheur in het proefstuk verschijnt. In beide gevallen is dit punt de uiteindelijke druksterkte. Druksterkte is een uiterst belangrijke eigenschap voor consumenten bij het ontwerpen van technische 3D-prints die bestand zijn tegen zwaar eigen gewicht en externe drukkracht.

Charpy-slagproeven worden uitgevoerd om de hoeveelheid energie te bepalen die een kunststof tijdens de breuk opneemt. De opstelling is weergegeven in figuur 2.3.1.8-4.



Figuur 2.3.1.8-4 Illustratie van de Charpy-botsingsproef waarbij de botsproefstaaf (in het rood) in de ingezoomde figuur is weergegeven.

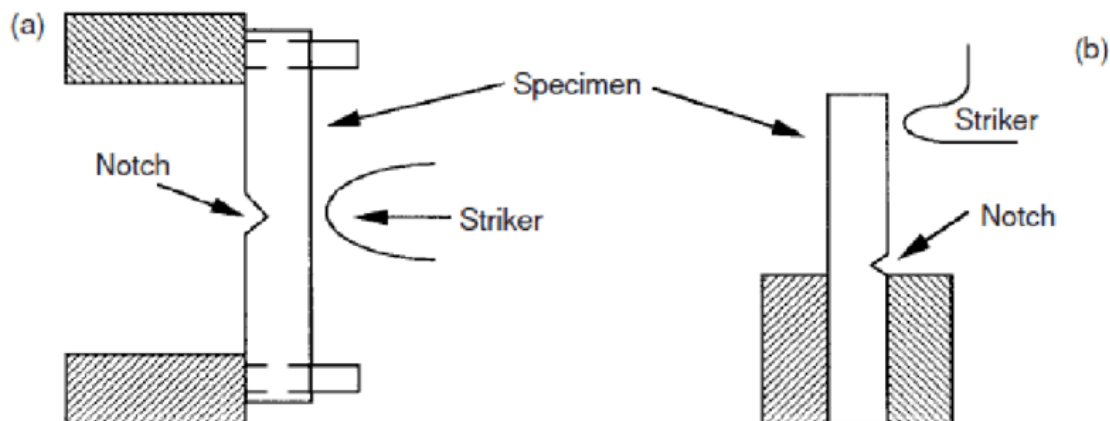
In dit geval heeft het ISO-standaardmonster dezelfde afmetingen als het buigzame hondenbot, maar met een kleine inkeping in het middendeel. Wanneer het kunststofmonster in de juiste vorm is spuit gegoten of 3D-geprint, kan het op de Charpy-slagproefopstelling worden geplaatst. De botsproefbank bevat een kleine steun om het monster op te leggen en een hamer op een ijzeren slinger (ook vaak slinger genoemd). De hamer bevat een vooraf bepaalde hoeveelheid potentiële energie. Deze potentiële energie kan worden berekend aan de hand van de verhouding tussen de massa van de hamer, de lengte van de hamerarm en de hoogte van de hamer voor en na de valproef. Wanneer de hamer valt, wordt de potentiële energie omgezet in kinetische energie. De hamer heeft de meeste kinetische energie voordat hij op het proefstuk slaat. Na het breken van het proefstuk verliest de hamer energie en zwaait naar een hoogte die lager is dan het beginpunt. Het potentiële energieverlies kan worden berekend aan de hand van het hoogteverschil. Tenslotte wordt de slagvastheid van het materiaal uitgedrukt in energie die wordt omgezet uit het potentiële energieverlies van de slinger.

De Charpy impact test is een gemakkelijk uit te voeren test met zeer snelle resultaten, maar dat doet niets af aan het belang van de resultaten. De resultaten geven een duidelijk beeld van de slagsterkte van kunststoffen, wat voor de consument zeer nuttig kan zijn om te weten voordat hij gerecycleerd plastic filament koopt. Aangezien de impactwaarde grotendeels wordt beïnvloed door onzuiverheden, is deze test geschikt om snel inzicht te krijgen in het verontreinigingsniveau van het materiaal.

De Izod-botsingstest is een andere test om de botssterkte te meten. Gewoonlijk wordt slechts één van de twee uitgevoerd om de schokweerstand te meten. De Izod proefstukken

hebben dezelfde afmeting als de buigproef. De Izod test werkt hetzelfde als de Charpy test met als enige uitzondering de proefstukhouder. Bij de Izod proef worden de proefstukken in een opwaartse positie gehouden door 2 klemmen. De berekening van de slagsterkte is ook dezelfde als bij de Charpy-test. De meeste bedrijven geven de voorkeur aan de Izod-test omdat deze iets hogere waarden geeft voor de kerfslageigenschappen van de geteste materialen. Zowel de Charpy- als de Izod-test kunnen worden uitgevoerd met en zonder inkeping. In figuur 2.3.1.8-5 worden illustraties gegeven van de vormen van de Charpy- en Izod-proeven.

Hoge waarden van de slagvastheid staan direct voor producten van goede kwaliteit. Recycling van kunststoffen vermindert altijd de slagvastheid van het product. Dit is één reden waarom slagvastheid echt belangrijk is. De andere reden is het testen van de aanwezigheid van onzuiverheden in gerecycleerde kunststoffen. Als de gerecycleerde materialen onzuiverheden bevatten, wordt het materiaal rond die onzuiverheden uiterst broos. Hierdoor zal de slagvastheid sterk afnemen. Daarom kan het verstandig zijn een botsproef uit te voeren op een klein deel van grote partijen voordat alles tot filament wordt geëxtrudeerd.



Figuur 2.3.1.8-5: Verschil tussen de (a) Charpy test en de (b) Izod test. Schematische tekening (Bron: [researchgate.net](https://www.researchgate.net))

Reologische proeven

Reologische tests bestaan meestal alleen uit MFI-tests (Melt Flow Index) omdat deze gemakkelijk uit te voeren zijn en veel belangrijke informatie over kunststoffen opleveren. MFI bestaat uit een holle buis waarin het kunststofmonster kan worden gestopt. Aan het ene uiteinde van de buis zit een klein gaatje (vaak de matrijs genoemd) en aan het andere uiteinde is de buis open zodat een verzwaarde zuiger bovenop het kunststofmonster kan worden gezet. De buis kan worden verwarmd zodat het kunststofmonster smelt. Wanneer het plastic volledig gesmolten is, stroomt het uit de buis. Afhankelijk van het gewicht van het plastic monster en de smeltindex, zal het plastic met een bepaalde snelheid naar buiten komen. Het gewicht en de snelheid waarmee de kunststof uit de buis komt, zijn bekende variabelen, zodat nu de smeltindex kan worden berekend. De snelheid waarmee de kunststof uit de buis komt, kan op twee manieren worden gedefinieerd: de hoeveelheid gewicht die in een bepaalde tijd wordt weggedrukt of de hoeveelheid volume die in een bepaalde tijd wordt weggedrukt.

Beide definities hebben hun ISO-norm en kunnen dus allebei worden gebruikt. MFI-resultaten zijn omgekeerd evenredig met het molecuulgewicht van de moleculen in het kunststofmonster. Hogere MFI-resultaten betekenen dus ook een lager moleculair gewicht,

wat men zou verwachten van gerecycleerde kunststoffen. Dit is een voorbeeld van waarom MFI zo belangrijk is, omdat kunststoffen met een laag molecuulgewicht gewoonlijk van zeer slechte kwaliteit zijn. Een laag moleculair gewicht betekent ook een lage viscositeit. Wanneer de viscositeit van kunststof te laag wordt (in combinatie met een gebrek aan sterkte) kan het niet meer goed geëxtrudeerd worden tot de gewenste draaddikte en misschien zelfs niet in de juiste vorm.

Al deze eigenschappen samen geven een zeer sterk beeld van de kwaliteit van gerecycleerd plastic. Deze eigenschappen kunnen globaal worden vergeleken om consumenten te laten zien welk gerecycleerd plastic filament nog goed is voor hun doeleinden. Dit zal een omgeving creëren waarin consumenten minder bang zijn om geld uit te geven aan gerecycleerde producten.

ii) Economische haalbaarheid

Er zijn 2 kernelementen van onze economische haalbaarheidsbeoordeling: marktvergelijking en overzicht van de apparatuurinvesteringen. Samen stellen deze ons in staat te voorzien wat onze potentiële kosten zouden zijn in een van en lopende kosten, maar ook wat de potentiële inkomsten en winstmarge zouden kunnen zijn voor de materialen die uit dit project zouden kunnen voortkomen.

Productpositionering en marktvergelijking

Om te evalueren welke prijs onze materialen op de markt zouden kunnen opbrengen, wilden wij in de eerste plaats PETG-filamenten op de EU-markt evalueren. Er zijn bestaande gerecycleerde materialen op de markt (evenals Reflow natuurlijk), maar de meerderheid blijft maagdelijk materiaal, zoals blijkt uit onze lijst met slechts 2 rivaliserende concurrenten. Interessant voor onze doeleinden is dat er een brede spreiding is in termen van prijs, met materialen vanaf 23,60 euro tot 32,39 euro.

Doorgaans worden materialen die aan de bovenkant van de markt worden gepositioneerd, beschouwd als van topkwaliteit, zoals de klant die beoordeelt op verschillende belangrijke parameters zoals diameterconsistentie, circulariteit en printprestaties. Maar net als Reflow is Filamentive rPETG in feite een gerecycleerd materiaal waarvoor klanten bereid zijn een extra premie te betalen voor zowel kwaliteit als duurzaamheid. Het zal van cruciaal belang zijn om de productpositionering en prijsstelling af te stemmen op de kwaliteit van de materialen die uit dit project voortvloeien.

Competitor Name	Price	Unit	Type (Virgin/Recycled)
Colorfabb	€23,60	1kg	Virgin
Eryone	€27,50	1kg	Virgin
Esun	€22,99	1kg	Virgin
MatterHackers	€21,98	1kg	Virgin
Polymaker	€34,95	1kg	Virgin
Prusament	€23,40	1kg	Recycled
Filamentive	€32,39	1kg	Recycled

Figuur 2.4.1.8-3: De belangrijkste recycling- en productiestappen samengevat in kosten of tarieven.

Hieruit blijkt dat Reflow de materialen uit dit project tegen een hogere prijs zou kunnen positioneren, misschien wel rond de 26,9 euro, wat een winstmarge van 60% zou

betekenen en een echte commerciële waarde zou creëren om onze recyclingactiviteiten verder te financieren en te ontwikkelen.

Link
PETG ECONOMY BLACK (colorfab.com)
ERYONE PETG filament 1.75mm, 3D printer filament PETG, +/- 0.02mm, 1kg / spool, orange... : Amazon.nl: Business, Industry & Science
eSUN PETG Filament 1.75mm, PETG 3D Printer Filament, Dimensional Accuracy +/- 0.05mm, 1kg (1kg) Spool 3D Printing Material for 3D Printer, Solid Black : Amazon.nl: Business, Industry & Science
Black MH Build Series PETG Filament - 1.75mm (1kg) MatterHackers
Polymaker PB01007 PolyLite Filament PETG hitzebeständig, hohe Zugfestigkeit 1.75 mm 1000 g blue 1 pc(s) : Amazon.nl: Business, Industry & Science
Prusament PETG Prusa Orange 1kg Original Prusa 3D printers directly from Josef Prusa
https://www.filamentive.com/product/rpetg-recycled-pet-filament-1-75mm-6-colours-500g/

Figuur 2.4.1.8-4: Onderzoek naar prijsvergelijking en productpositionering

Hoewel Reflow en anderen reeds gerecycleerde thermoplasten leveren aan de 3D-printindustrie, zou dit een nieuw type gerecycleerd materiaal zijn dat verschillende recyclagecycli heeft doorlopen.

Bedrijven en consumenten zouden deze materialen tegen een vaste verkoopprijs kunnen kopen, zoals hierboven voorgesteld, of REFLOW zou een terugnamesysteem als dienst kunnen opzetten. Klanten met grote volumes zouden elke maand aanzienlijke hoeveelheden printafval kunnen verzenden en ons van grondstoffen kunnen voorzien, terwijl zij een gereduceerde prijs per maand betalen om een vaste hoeveelheid materiaal uit de verschillende materiaalcategorieën te ontvangen.

Investing in apparatuur

Om dit systeem voor circulaire recycling tot leven te brengen, moeten wij een gedetailleerde beoordeling hebben van de betrokken investeringskosten. In onderstaande tabel beschouwen wij drie belangrijke investeringskosten: 1) De kosten van de technologie die in elke stap van het proces nodig is, 2) de kosten van de arbeid die nodig is om deze apparatuur te assembleren en te optimaliseren en 3) De arbeidskosten voor het opzetten van het proces en het testen van materiaalstromen.

Zoals te verwachten is, zijn de duurste machines die voor de productieprocessen, de grootschalige compounder en de extrusielijn. Bepaalde testapparatuur, zoals de DSC-apparatuur, is echter ook duur, omdat dit ons in wezen helpt de commerciële waarde van een bepaald materiaal vast te stellen op basis van de kwaliteit ervan. Veel van deze apparatuur kan in de EU worden aangeschaft; veel van de potentiële technologieleveranciers bevinden zich in Duitsland en Nederland.

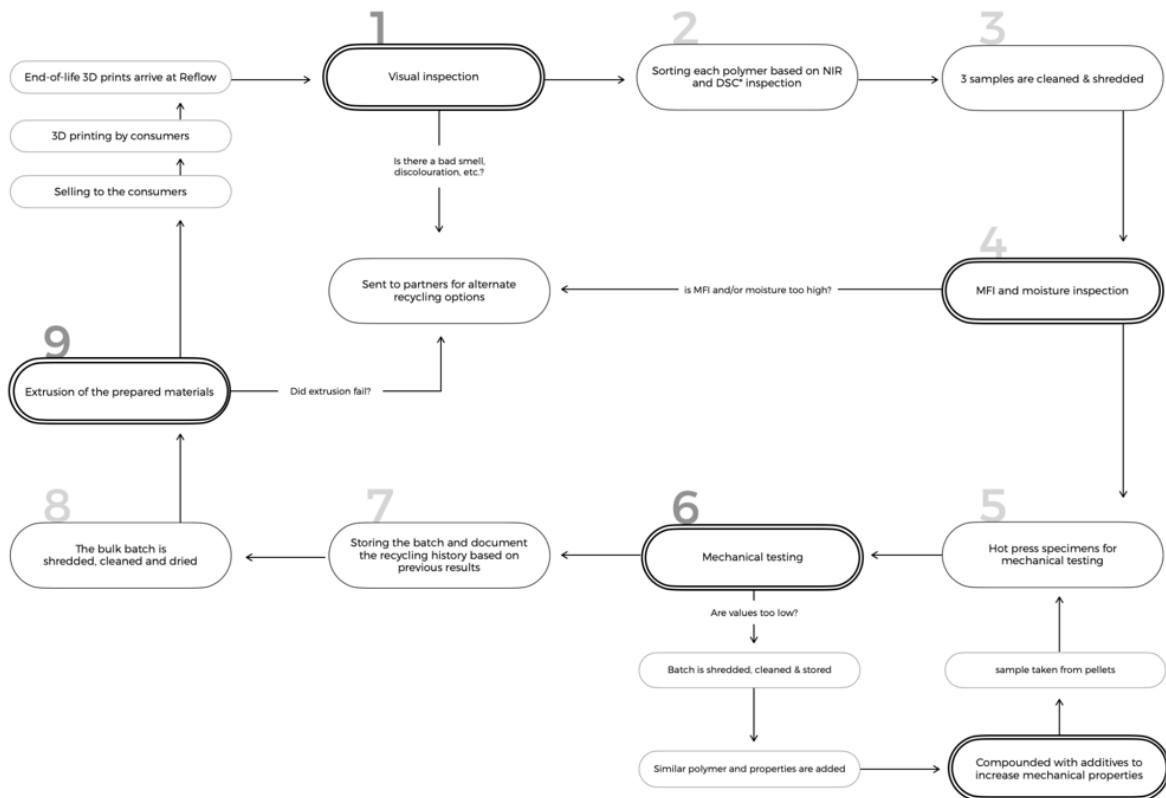
Wat de arbeidskosten betreft, zijn wij uitgegaan van een gemiddeld uurtarief van 60 eur/kg, aangezien een groot deel van de installatie- en procesactiviteiten moet worden uitgevoerd door een gekwalificeerde werktuigbouwkundige of materiaaltechnicus, waaruit het Reflow Techniek en Materialen team grotendeels bestaat. De behoefte aan arbeidskrachten in de verschillende stappen van het proces varieert aanzienlijk van relatief eenvoudige out of the box-apparatuur aankopen en eenvoudige processen zoals vochtanalyse, tot complexe geavanceerde machines die uitgebreide uren van uitproberen en experimenteren vereisen, zoals compounding.

Al met al denken wij dat deze lijst echter een redelijk bescheiden investeringshoeveelheid is om een commercieel recycling- en productiesysteem op te zetten. Wij zullen nader ingaan op het rendement van de investering in de loop der tijd en hoe snel een dergelijke investering rendabel kan worden.

Resultaten

i) Projectcoördinatie

Na uitgebreid onderzoek, bovenop onze bestaande knowhow en ervaring met recyclingprocessen en de ontwikkeling van nieuwe materialen, hebben wij de theoretische basis gelegd om dit circulaire systeem van recycling tot productie te creëren.



Figuur 2.5.1.8-1: Materiaalstroom van recycling naar productie

U ziet duidelijk geïllustreerd, de kernstappen van materiaaltransformatie die moeten plaatsvinden vanaf het beginpunt van de acceptatie van homogeen printmateriaalafval van consumenten. Voorwaardelijke stappen zijn dubbel omlijnd om aan te geven dat materiaal al dan niet in aanmerking komt, afhankelijk van het resultaat van deze stap.

Bij stap 1 kunnen we bijvoorbeeld onmiddellijk vaststellen dat het materiaal vervuild is en daarom niet geschikt is voor extrusie. Wij zouden het materiaal dan naar andere recyclingbedrijven sturen die het materiaal bijvoorbeeld als vulmateriaal in de bouw kunnen gebruiken. Evenzo kunnen wij bij stap 6 vaststellen dat de polymeren te sterk zijn aangetast om te worden geproduceerd en verkocht aan klanten, zodat wij een compoundingstap 6B overwegen, waarbij vezels of additieven worden toegevoegd om ervoor te zorgen dat de materialen een echte commerciële waarde op de markt vertegenwoordigen.

Dit cirkeldiagram geeft in wezen zowel de recyclingstroom als het commerciële model in zijn meest elementaire vorm weer. Als het materiaal opnieuw kan worden gerecycleerd, gebeurt dat ook en als het materiaal te veel is aangetast of vervuild, wordt het ofwel samengesteld met additieven om de eigenschappen te verbeteren, ofwel voor andere



doeleinden gebruikt omdat het ongeschikt is voor extrusie en 3D-printing.

Dit sleuteldiagram vat ook de kernresultaten van onze haalbaarheidsstudie en -analyse samen. Uit ons onderzoek en onze experimenten blijkt duidelijk dat dit een lucratieve, haalbare en zeer bruikbare business met grote impact is.

Wij weten uit ons eigen klantenonderzoek dat het enthousiasme voor een dergelijk productaanbod zeer groot is en dat duurzaam denkende klanten actief op zoek zijn naar een oplossing als deze, en uit onze economische analyse blijkt duidelijk dat er een passende winstmarge is om dit te laten werken en de investeringskosten op termijn terug te verdienen. Technisch gezien hebben wij al gewerkt met uitdagende materialen uit postconsumptie- en postindustriële bronnen, zoals medisch tray-afval, gerecycleerde visnetten, voedselverpakkingen, brillenglazen en nog veel meer.

De technologie die wij nodig hebben om deze oplossing uit te voeren is ook ruim beschikbaar en concurrerend geprijsd, hoewel er aanvullend onderzoek nodig is om precieze modellen en uiteindelijk gekozen leveranciers vast te stellen.

Uit ons onderzoek blijkt ook duidelijk dat het meest cruciale aspect voor ons in dit proces de kwaliteitscontrole is. Klanten zijn weliswaar enthousiast over het aanbod, maar als te sterk gedegraderd materiaal in het proces terechtkomt en niet correct wordt geïdentificeerd door het Reflow-team, kan dit de productbeoordelingen ondermijnen, waardoor de commerciële winstgevendheid van het proces kan afnemen.

ii. Levenscyclusanalyse

Basiseenheid: 1 kg filament geproduceerd uit zuivere/gerecycleerde pellets

1. Voor de productie van nieuw filament: Het systeem begint van petroleum tot de productie van amorfe PETG-korrels en eindigt wanneer de korrels op de productielocatie worden omgezet in filament.
2. Voor de productie van gerecycleerd filament: De "cut-off" regel wordt toegepast. Het systeem omvat de inzameling van afval, afvalrecycling en repelletisering, het vervoer van de pellets naar de productieplaats en de productie van het filament.

Veronderstellingen:

1. Het omzettingpercentage van PETG-filament uit pellets is 83,3%.
2. Het energieverbruik tijdens het filament is hetzelfde op basis van de Reflow-gegevens en ongeacht de herkomst van de pellets.
3. De broeikasgassen worden uitgedrukt als CO₂-equivalent.
4. Het energieverbruik en de broeikasgasemissies zijn gebaseerd op het machinevermogen en de productiecapaciteit bij Reflow
5. Groene energie verwijst naar hernieuwbare energie die wordt opgewekt door windturbines in NL en geleverd door GREENCHOICE.

Gegevensbron: Gebaseerd op GrantaEdupack Database en publicaties die betrekking hebben op Nederland.

Afsluitingsregel: De productie en het gebruik van het nieuwe filament vallen buiten de systeemgrens van het gerecycleerde filament.

Referenties:

+GrantaEdupack Database

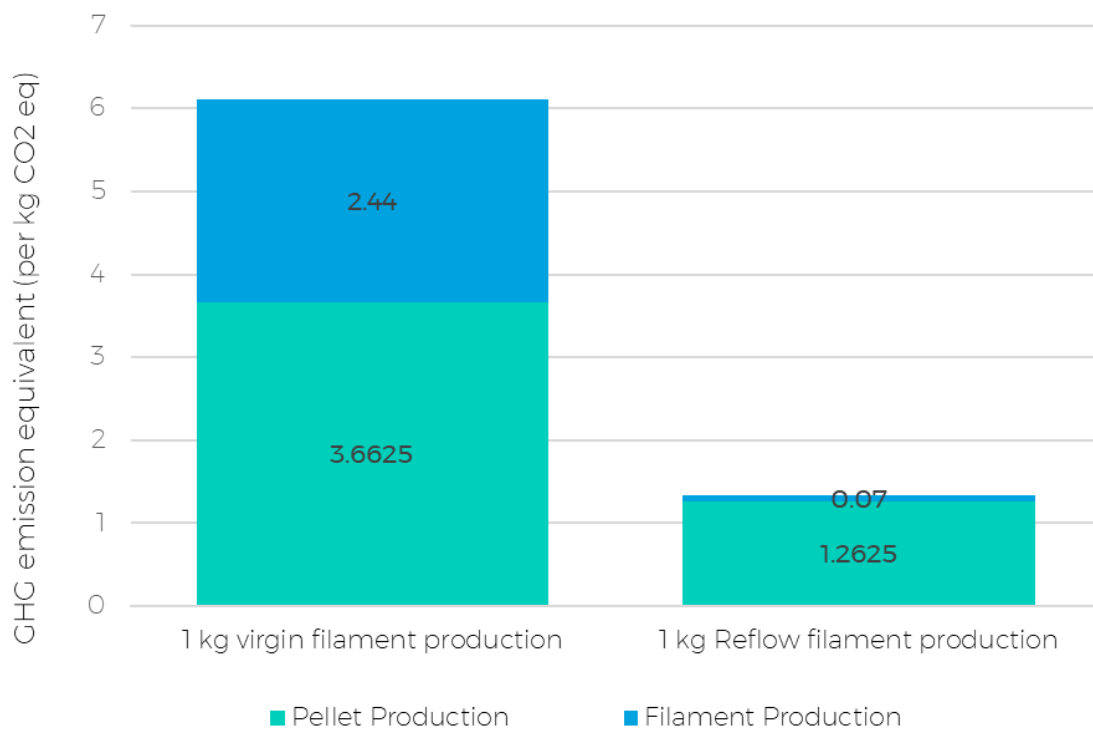
+Shen, L., Worrell, E., & Patel, M. K. (2012). Comparing life cycle energy and GHG emissions of bio-based PET, recycled PET, PLA, and man-made cellulose. *Biobrandstoffen, bioproducten en bioraffinage*, 6(6), 625-639.

+Hu, Y., Zhao, Z., Liu, Y., Li, G., Wang, A., Cong, Y., ... & Li, N. (2018). Synthese van 1, 4-Cyclohexaandimethanol, 1, 4-Cyclohexaandicarbonsuur en 1, 2-Cyclohexaandicarboxylaten uit Formaldehyde, Crotonaldehyde en Acrylaat/Fumaraat. *Angewandte Chemie International Edition*, 57(23), 6901-6905.

+Gaikwad, V., Ghose, A., Cholake, S., Rawal, A., Iwato, M., & Sahajwalla, V. (2018). Transformatie van E-waste plastics in duurzame filamenten voor 3D printen. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(11), 14432-14440.

+Louwen, A. (2011). Vergelijking van de broeikasgasemissies gedurende de levenscyclus van schaliegas, conventionele brandstoffen en hernieuwbare alternatieven vanuit Nederlands perspectief. *Universiteit Utrecht in Nederland*, 43.

+Ardente, F., Beccali, M., Cellura, M., & Brano, V. L. (2008). Energieprestaties en levenscyclusbeoordeling van een Italiaans windmolenpark. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), 200-217.



ii. Andere mogelijkheden

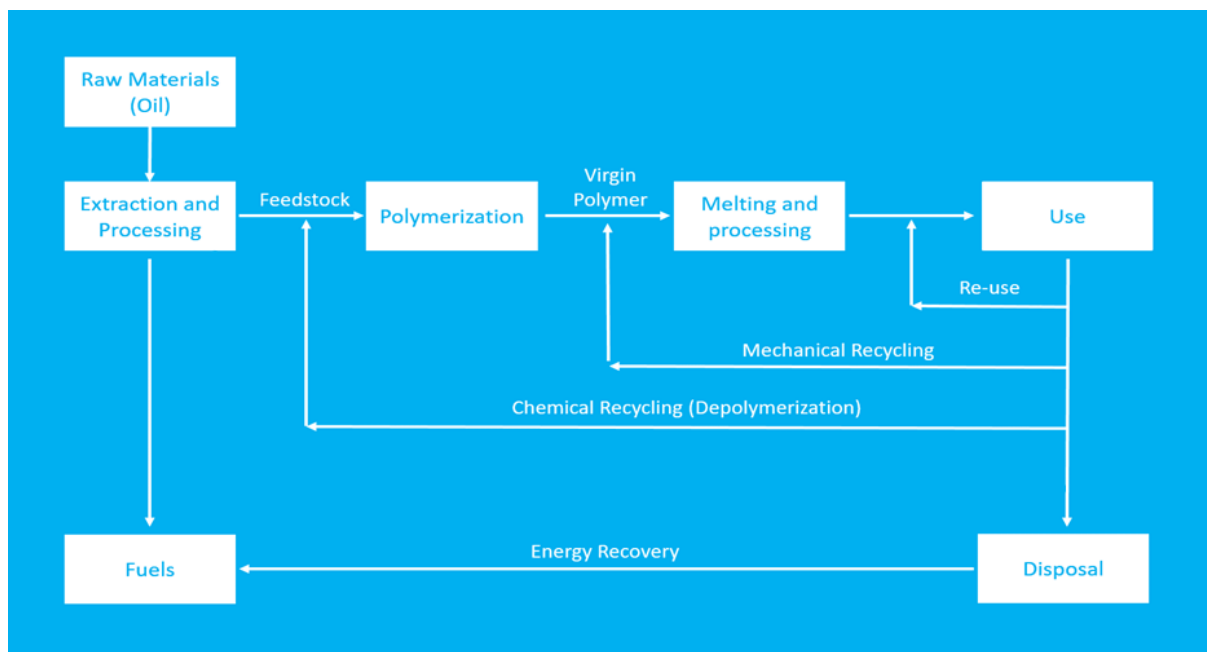
Tot dusver is dit hele onderzoek opgebouwd rond afgedankte 3D-prints van rPETG die worden gerecycled voor de extrusie van nieuw rPETG-filament. Dit is erg gericht op één bron en één product omdat dat het meest binnen onze mogelijkheden ligt, maar in de toekomst zal dit systeem ook worden toegepast op andere Reflow-materialen. Voor vezelgevulde materialen moet het systeem een beetje worden omgebouwd, dus deze materialen zullen eerst wat worden uitgesteld, maar voor rPLA zou dit hele systeem al werken. Het vereist alleen een beetje meer planning en ruimte om rPETG- en rPLA-materialen te allen tijde goed gescheiden te houden.

Wanneer ook rPP GF, rPETG GF en rPA6 CF in dit systeem worden geïmplementeerd, moet Reflow ervoor zorgen dat zij een compounder heeft zodat zij deze materialen naar behoren kan verwerken.

De andere opties om onze materialen te recyclen zijn meer productgericht. Afgedankte 3D prints van onze consumenten hoeven niet per se weer 3D print filament te worden om het circulair te maken. Het zou ook verwerkt kunnen worden tot pellets voor spuitgieten of gebruikt kunnen worden als cementvulling om huizen te bouwen. Een goede weergave van welk recyclingpad bij welk materiaal hoort, wordt gegeven door de MFI-waarden. Zeer lage MFI-waarden (tot 20) zijn goed voor extrusie en zullen waarschijnlijk worden gebruikt om nieuw filament te maken.

Middelmatige waarden (15 tot 30) kunnen worden gebruikt voor algemene doeleinden zoals plastic film, folie of blaasgieten. Hoge MFI-waarden (20 tot 70) kunnen worden gebruikt voor spuitgieten. Al deze opties (behalve extrusie) vallen buiten het productiebereik van Reflow, maar zijn nog steeds zeer haalbare opties om de circulatie van thermoplastische polymeren te verhogen.

Er zijn ook verschillende soorten recycling. Tot nu toe was alles vooral gericht op mechanische recycling omdat dit de minste gevolgen heeft voor het milieu, maar de andere soorten recycling zijn nog steeds betere opties dan plastic dat in de natuur of de oceanen ligt. De andere recyclingopties worden hieronder gevisualiseerd.



Figuur 2.5.1.8-1: Diverse recyclingprocessen

Chemische recycling is de volgende beste optie na mechanische recycling. Hierbij worden chemicaliën gebruikt om de lange polymeerketens weer om te zetten in kleinere ketens en vervolgens in de monomeren die ze ooit waren. Deze monomeren kunnen dan opnieuw worden gepolymeriseerd tot polymeren met veel grotere ketenlengtes en dus tot producten van betere kwaliteit.

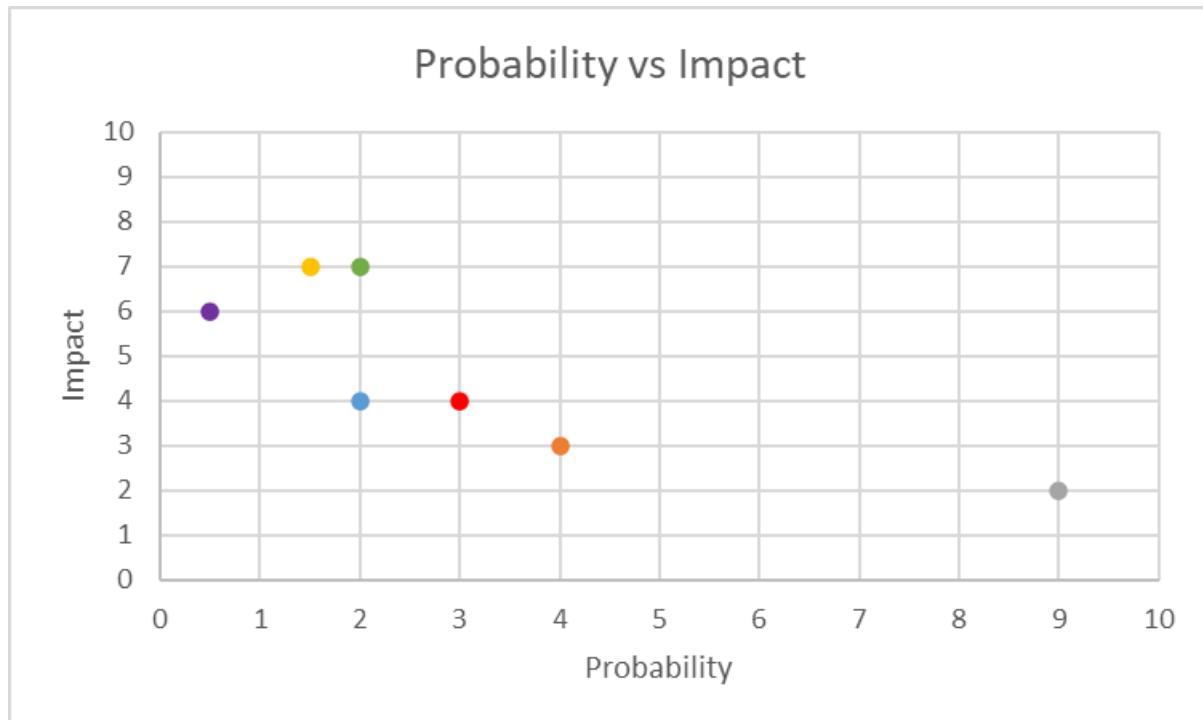
De laatste optie is geen recycling, maar zorgt wel voor plastic afval. Verwijdering van het plastic afval zodat het kan worden verbrand als brandstof is het tweede slechtste scenario en dat proberen wij te voorkomen.



F) Discussie en risicoanalyse

In onze bespreking willen wij voortbouwen op de basis van de voorgaande hoofdstukken door waarschijnlijke risico's of bedreigingen te identificeren en strategieën uit te werken om deze aan te pakken. Deze variëren in aard van de aanvaarding en de mentaliteit van de consument, technische uitdagingen, de kwaliteit van het materiaal of zelfs de sociaal-economische omstandigheden. Om onze discussie te beperken hebben wij ons geconcentreerd op 7 fundamentele risico's en deze fundamenteel beoordeeld op zowel hun waarschijnlijkheid als het effect dat zij zouden hebben op het door Reflow voorgestelde recyclage- naar productiesysteem. Het gaat om de volgende risico's:

Nummer	Risico	Overeenkomstige kleur
1	Partners kunnen failliet gaan door economische schokken zoals de energiecrisis.	Paars
2	Vertragingen bij het verkrijgen van de juiste apparatuur	Bruin
3	Afdrukken zijn te beschadigd voor recycling	Grijs
4	Polymeren die worden gemengd met verschillende soorten polymeren	Geel
5	Consumenten zijn niet bereid gerecycled filament te kopen	Blauw
6	Inconsistente levering van terugnamemateriaal met verontreinigingen door consumenten die verkeerde materialen terugsturen	Groen
7	Consumenten zijn niet bereid hun mislukte afdrukken op te slaan voor recycling	Rood



Om de impact van nummer één te beperken zal Reflow ervoor zorgen dat zij meerdere partners heeft op het gebied van materiaalverwerking en compounding. Op deze manier, als er één geen ondersteuning kan leveren, zal dit geen grote impact hebben op het project. Het risico van nummer 2 kan worden verminderd door kennis te vergaren over Reflow-partners met dezelfde apparatuur om te zien of die van hen kunnen worden ingehuurd als de vertragingstijden uit de hand lopen. De prints die te beschadigd zijn voor recycling is iets dat op een gegeven moment zal gebeuren, maar de hoeveelheid eerste keer gerecycled materiaal dat binnenstroomt zal zo veel groter zijn dat de impact van dit probleem zeer gering zal zijn.

Nummer 4 is zeer onwaarschijnlijk omdat NIR- en DSC-apparatuur zeer doeltreffend is om ervoor te zorgen dat verschillende soorten polymeren niet worden vermengd. Deze zijn reeds goed geïntegreerd in het Reflow-proces. Dit zijn echter handelingen die door mensen moeten worden uitgevoerd, wat ook tot fouten zal leiden. Om de kans hierop te verkleinen is het noodzakelijk het foutenpercentage te volgen en meerdere testpunten in de processtroom te implementeren.

De uitkomst dat consumenten niet bereid zijn om gerecycleerde materialen te kopen heeft ook een lage waarschijnlijkheid wanneer we ons consumentenonderzoek evalueren. Als we een trage start hebben in termen van commercieel aanbod, zijn we ervan overtuigd dat de focus op het milieueffect en consistente kwaliteitscontrole deze trechter mettertijd zal helpen groeien. Het is van cruciaal belang dat alle mechanische tests volgens ISO-normen worden uitgevoerd. Zo kan de consument zien dat de kwaliteit niet drastisch daalt ten opzichte van nieuwe materialen.

De inconsistentie van materialen is waarschijnlijk het grootste risico in die zin dat onze protocollen voor kwaliteitstests dit probleem kunnen vaststellen, maar een inconsistente levering kan leiden tot vertragingen in de levertijd voor de consument. Sommige gebruikers zijn misschien nieuw op het gebied van recycling en hechten geen belang aan het scheiden van materialen, zodat de kans bestaat dat sommigen gedeeltelijk vervuilde partijen opsturen. Met een goede traceerbaarheid kan die kans na verloop van tijd echter worden



verkleind. Er zijn waarschijnlijk enkele consumenten die niet bereid zijn om hieraan mee te werken, maar die kans is klein omdat het overgrote deel van alle Reflow-consumenten duurzaam denkt.

Veel van de risico's in verband met inconsistente levering van materiaal of kwaliteitscontrole kunnen fundamenteel worden aangepakt door A) de aanwerving van optimale deelnemers uit ons klantenbestand en B) doeltreffende procedures en apparatuur voor het testen van de kwaliteit.

In het geval van A) hebben wij reeds verschillende belangrijke variabelen vastgesteld die van het grootste belang zijn voor een succesvolle kringloop van print tot recycling. Daartoe behoren bijvoorbeeld het volume homogeen materiaal dat de klant gebruikt, zijn printomgeving en de motivatie van de klant om deel te nemen aan deze samenwerking op het gebied van duurzaamheid. Ideale klanten zijn gebruikers van grote volumes direct pellet drukwerk die voornamelijk zonder kleur drukken. Hoe meer materiaal we bij dergelijke klanten in grote volumes kunnen verzamelen, hoe kleiner de kans op vervuiling zal zijn. Veel gebruikers die met veel kleuren en zelfs veel soorten materiaal drukken, maar alleen in kleine volumes of middelgrote partijen, zouden een veel groter risico op verontreiniging vormen en mogelijk de materiaalconsistentie beïnvloeden.

B) Zoals reeds vermeld, is het absoluut van cruciaal belang dat onze QC-stappen vast, strikt en op meerdere punten kruiselings worden gecontroleerd om ervoor te zorgen dat dit circulaire productieproces kan werken. Elk van de 9 bovengenoemde stappen moet met zorg en aandacht worden uitgevoerd en de resultaten van elke test moeten digitaal worden bijgehouden. Deze bibliotheek zal na verloop van tijd een waardevolle gegevensverzameling opleveren die ons kan helpen nieuwe materiaalmonsters te vergelijken met hun optimale eigenschappen voor een bepaalde thermische cyclus of "recyclagekringloop".

Sterke punten	Zwakke punten
<ul style="list-style-type: none">a) 6+ jaar werken met gerecycleerde stromenb) Bestaande multi-extruder productiefaciliteitc) Meer dan 1000 klanten die Reflow materialen gebruikend) Sterke relaties met technologieleverancierse) Nauwe relaties met materiaalverwerkersf) Netwerk van compounders en vezelleveranciersg) Sterk herkenbaar duurzaam merkh) Bestaande kennis op het gebied van versnipperen, extruderen, materiaalanalyse, samenstellen	<ul style="list-style-type: none">a) In afwachting van complexe apparatuur voor materiaalanalyse, zoals DSC, waarvoor een aanzienlijke opleidingstijd nodig is.b) Er moeten nog bevestigingen komen voor apparatuur op grotere schaal voor compounding en extrusie.c) Veel werk in het identificeren van welke klanten en medewerkers bij het project passen
Kansen	Bedreigingen
<ul style="list-style-type: none">a) Nauwere relaties met klanten omdat we hen in staat stellen hun eigen plasticvervuiling aan te pakken.b) Introduceer nieuwe vormen van productie zoals terugnamebeurs of materialen als dienstc) Nauwere werkrelaties met partners in samenstellingen en materiaalverwerkingd) Hogere recyclingvolumes kunnen de recyclingkosten per kg verlagene) Nieuw duurzaam product dat geen enkele concurrent momenteel aanbiedt	<ul style="list-style-type: none">a) Energiecrisis kan gevolgen hebben voor de resultaten/partnersb) Vertragingen bij het veiligstellen van apparatuurc) Er kan polymeerverontreiniging optreden bij het terugsturend) De partijen materiaal kunnen te sterk gedegradieerd zijne) Consumenten zijn misschien niet blij met de prijs van het her-gerecyclede filamentf) Slechte materiaalopname door verzending van onjuiste of niet-homogene materiaalsoorten

C) Conclusie en aanbevelingen

Kortom, na het uitvoeren van deze haalbaarheidsanalyse zijn we ervan overtuigd dat we de volgende stappen kunnen zetten en kunnen beginnen met de praktische bouw van een circulair end of life print tot materiaal productiesysteem met de medewerking van klanten bij REFLOW BV. Hieronder ziet u een topografische weergave van de Reflow fabrieksvloer zoals die momenteel functioneert op een willekeurige werkdag. Het grootste deel van de vloer wordt ingenomen door de extrusielijnen met een groot volume, maar is vervolgens verdeeld in ruimtes voor printen, testen, materiaalanalyse en meer.



Figuur 2.5.1.8-1 Topografische weergave van de REFLOW-fabrieksvloer



Figuur 2.5.1.8-1: Materiaalstroom van recycling naar productie



Hierboven ziet u waar elke stap in onze voorgestelde materiaal- en productiestroom naartoe gaat, zoals duidelijk aangegeven door de desbetreffende kleuren. 1,2 en 7 komen voor in een lange sectie in het Fulfilment-gebied. 3 en 8 komen ook dicht bij elkaar voor, aangezien dit het versnipperen van grondstoffen is. Kwaliteitscontrole en mechanische tests vinden plaats in ons materiaal analyse-lab, op enige afstand van de plaats waar het materiaal wordt ingenomen en verwerkt. Ten slotte vindt de extrusie plaats in het bovenste gedeelte van de fabriek en indien compounding nodig is, zal deze technologie ook hier beschikbaar zijn.

Een unieke zakelijke propositie met aanzienlijke CO2-besparingen

We hebben voldoende ruimte om het proces uit te voeren, we beschikken over de vereiste vaardigheden en knowhow, we hebben een aanzienlijk partnerecosysteem met zowel directe toegang tot 3D-printers, print labs en recyclingbedrijven. We hebben ook een online winkelplatform met duizenden mensen die onze materialen gebruiken. Zoals we hierboven in onze levenscyclusanalyse hebben geïllustreerd, zouden REFLOW rPETG en rrPETG een enorme besparing op de uitstoot van CO2 betekenen als ze universeel zouden worden toegepast.

Voor zover wij weten heeft nog geen enkel filament of internationaal materiaalbedrijf tot op heden een dergelijk gezamenlijk klantrecyclingsysteem in 3D-printing in werking gesteld of toegepast. Het zou recycling op klantniveau helpen aanmoedigen omdat gebruikers het als hun verantwoordelijkheid beschouwen en gestimuleerd worden via kortingen.

Dit zou vooral van belang zijn voor universiteiten met een zeer groot gebruik van 3D printen in vakgebieden als robotica, werktuigbouwkunde en civiele techniek, architectuur, productontwerp en nog veel meer. Van deze instellingen in Nederland hebben we regelmatig bereik gekregen met het verzoek om een dergelijke recyclingmogelijkheid, zodat ze studenten kunnen aanmoedigen om duurzaamheidsoplossingen toe te passen en tegelijkertijd de verspilling te minimaliseren die ontstaat wanneer studenten voor het eerst kennismaken met 3D-printen.

Het is dan ook onze vaste overtuiging dat we moeten afstuderen op een milieustudie of een praktijkproef in de echte wereld, zoals vastgelegd in de RVO-documentatie. We kunnen een schatting maken van de hoeveelheid CO2 die zal worden gecompenseerd door dit te vergelijken met de productie van nieuw rPETG-materiaal op dit moment, maar een echte wereldstudie zou helpen deze aannames in twijfel te trekken. Kan rPETG bijvoorbeeld 6 cycli van thermische afbraak ondergaan en nog steeds een actief ingrediënt zijn in het productieproces? Wanneer moeten we deze materialen samenstellen met vezeladditieven? Als we het basismateriaal rPETG moeten mengen, welk percentage vezels of additieven is dan optimaal om de productkwaliteit te behouden? Dit zijn allemaal vragen die kunnen worden beantwoord door een praktische milieustudie of een "demonstratieproject".

Partners en impact

De coördinatie van een milieustudie zou ons ook in staat stellen de partners te stimuleren die we nodig hebben om dit circulaire productiesysteem in de toekomst in stand te houden. Dat zijn onder meer fabrikanten van apparatuur, materiaalverwerkers, klantengroepen voor 3D-printing, recycleerders voor alternatieve toepassingen en samengestelde partners. Zodra deze studie is afgerond, kunnen we de voorwaarden voor een werkovereenkomst presenteren en doelen stellen met deze belanghebbenden.



Het veiligstellen van de volgende fase van dit project is cruciaal om die samenwerking te financieren en ons in staat te stellen dit systeem in de echte wereld te laten functioneren. We willen daarom een nieuw voorstel indienen om de volgende financieringsfase met RVO te activeren, zodat we circulaire printrecycling tot een commerciële realiteit en een CO₂-emissiereductie voor het bedrijfsleven in Nederland en de EU in bredere zin kunnen maken.

We zullen 67000 kgs Co₂ per jaar besparen, als het geschatte materiaal nieuw is in plaats van Reflow rPETG



Uitvoering

1. Uitdagingen in het oorspronkelijke projectvoorstel

Een van de uitdagingen van het project was de mogelijkheid van grote variatie in de kwaliteit van het inputmateriaal, variërend van materialen die door Reflow zijn geproduceerd tijdens de eerste levensduur, tot materialen die niet door Reflow zijn geproduceerd. De manier waarop we dit hebben aangepakt was om het milieuonderzoek in 2 fasen uit te voeren:

Fase A: Beperk het inname materiaal tot filamenten/materialen waarvan bekend is dat Reflow hun oorsprong is. Dit zou Reflow de kans geven om de nodige kennis op te bouwen om 3D-geprinte materialen te kunnen innemen waarvan niet bekend is dat Reflow hun oorsprong is.

Fase B: Reflow om alle materialen van alle 3D-printleveranciers in te nemen en in batches te produceren, met behoud van de kwaliteit en consistentie van de materialen.

2. Verklaring van wijzigingen ten opzichte van het projectplan

Er is niet veel afgeweken van het oorspronkelijke projectplan. Integendeel, Reflow krijgt consequent verzoeken van haar klanten om een terugnameschema te implementeren en zij hebben zich bereid getoond om gerecycleerde materialen uit hun afvalstromen te gebruiken op voorwaarde dat we de kwaliteit van de gerecycleerde materialen kunnen behouden. Een van de klanten is een kleinschalige test gestart in hun eigen fabriek om de mogelijkheden van recycling van 3D geprint afval te onderzoeken (Lost Boys [Lablostboyslab - Ontwerpstudio en 3D Print boerderij](#)) We hebben klanten binnen en buiten Nederland, voorbeelden hiervan zijn Batch.works ([Batch.Works - BATCH.WORKS](#)), One Earth Technologies ([One Earth Technology](#)), Nagami ([NAGAMI - Imagine the Impossible, Bring the Future](#)) en Wasp ([Stampanti 3D | WASP | Azienda leader nel settore della stampa 3D \(3dwasp.com\)](#))

3. Uitleg over PR-project en verdere PR-mogelijkheden

3D-printing is een nieuwe technologische grens en is al een algemeen aanvaard alternatief voor traditionele productieprocessen. Hoewel de technologie op zich duurzamer is dan de huidige subtractieve productietechnieken en geen grootschalige productie en afval vereist, heeft ze nog steeds inherente problemen zoals het gebruik van maagdelijke polymeren die schadelijk zijn voor het milieu en niet snel afbreken. Er zijn bedrijven in de industrie die met gerecycleerde en biopolymeren werken (zoals Reflow), maar een terugnameprogramma waarbij materiaal dat door klanten is geprint, wordt gerecycleerd en opnieuw tot filament wordt verwerkt, is een nieuw aanbod. Dit zou een snelle kans creëren voor zowel organische als betaalde PR op grote schaal. De doelgroep van de advertentie is ook breed, variërend van afval en afvalbeheer, 3D-ontwerp en -printen tot circulaire economie.