



Biobased fibre **RE**inforced **PLA**stics

D7.2 Recyclage rapport voor thermosets

Frederik Goethals

frg@centexbel.be

Project: HBC.2020.2567 Biogebaseerde Vezelversterkte Kunststoffen

Projectpartners: Centexbel en Sirris

Collective Research & Development and Collective Knowledge Dissemination (COOCK), supported by Vlaio

1 januari 2021 – 31 december 2023

Samenvatting

Het toenemende gebruik van thermohardende composieten in verschillende industrieën heeft geleid tot een groeiende bezorgdheid over de verwijdering ervan aan het einde van de levensduur en de impact op het milieu. In tegenstelling tot thermoplastische kunststoffen, die kunnen worden gesmolten en opnieuw verwerkt, bieden thermohardende composieten unieke uitdagingen bij recycling vanwege hun vernette structuur. Deze leverbaarheid geeft een overzicht van de huidige stand van zaken op het gebied van recyclingtechnologieën voor thermohardende composieten.

Het eerste deel bespreekt de meest voorkomende recyclagemogelijkheden voor thermohardende harsen nl. mechanische, thermische en chemische recycling waarbij ook de toepasbaarheid voor biocomposieten wordt aangehaald en de financiële en ecologische impact van recycling wordt besproken.

Dan wordt er kort besproken hoe thermohardende composieten in de toekomst beter kunnen worden gerecycleerd door gebruik te maken van nieuw ontwikkelde thermohardende harsen die makkelijker recycleerbaar zijn.

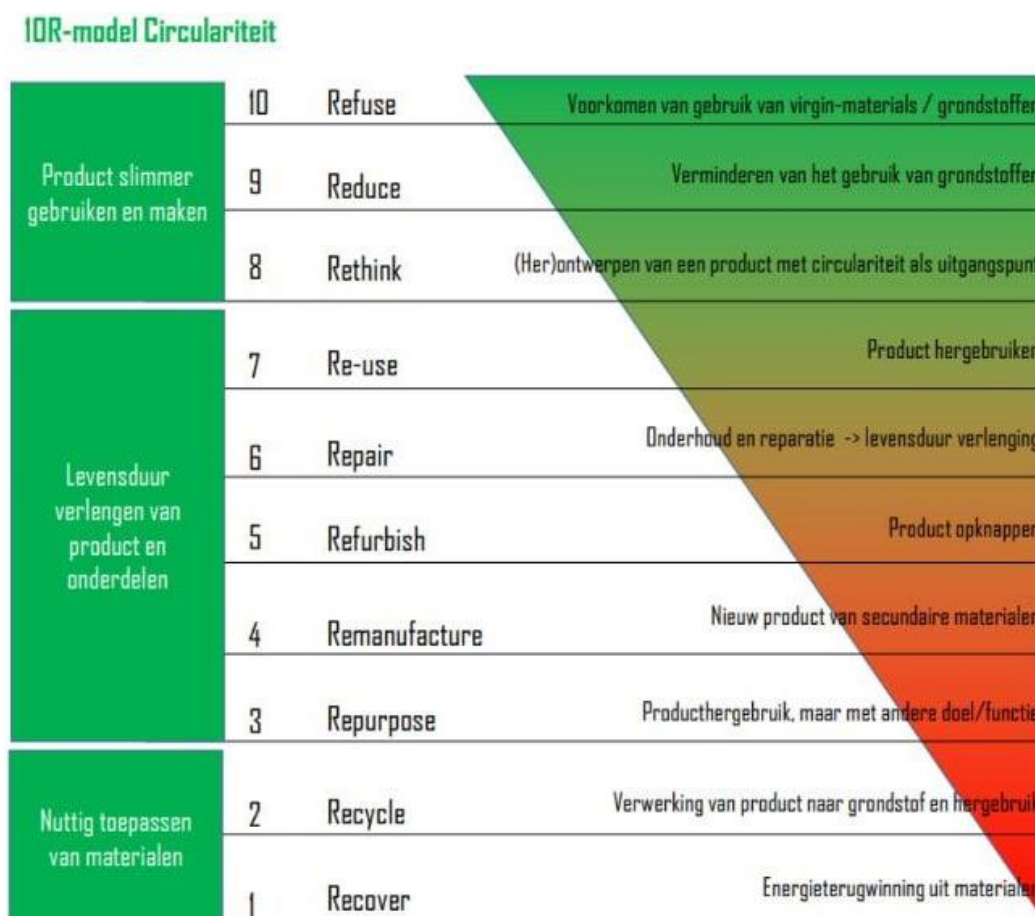
Als laatste worden enkel projecten rond recycling van thermohardende composieten waarin Centexbel een projectpartner was besproken en worden enkele proof of concepts rond recycling uitgevoerd in het BREPLA project voorgesteld.

Inhoudstabel

Samenvatting.....	2
Introductie.....	4
Mechanische recyclage	6
Thermische recyclage.....	7
Verbranding	7
Wervelbedreactor	7
Pyrolyse.....	8
Chemische recyclage	9
Financiële en ecologische impact van recyclage	10
Redesign	12
Resultaten uit projecten.....	13
Helacs.....	13
Recy-composite.....	13
SUSPENS.....	14
Ecoxy	14
Proof of concepts in Brepla	15
Mechanische recyclage.....	15
Scheiden van toplaag en kern van sandwichpanelen	16
Conclusies.....	17

Introductie

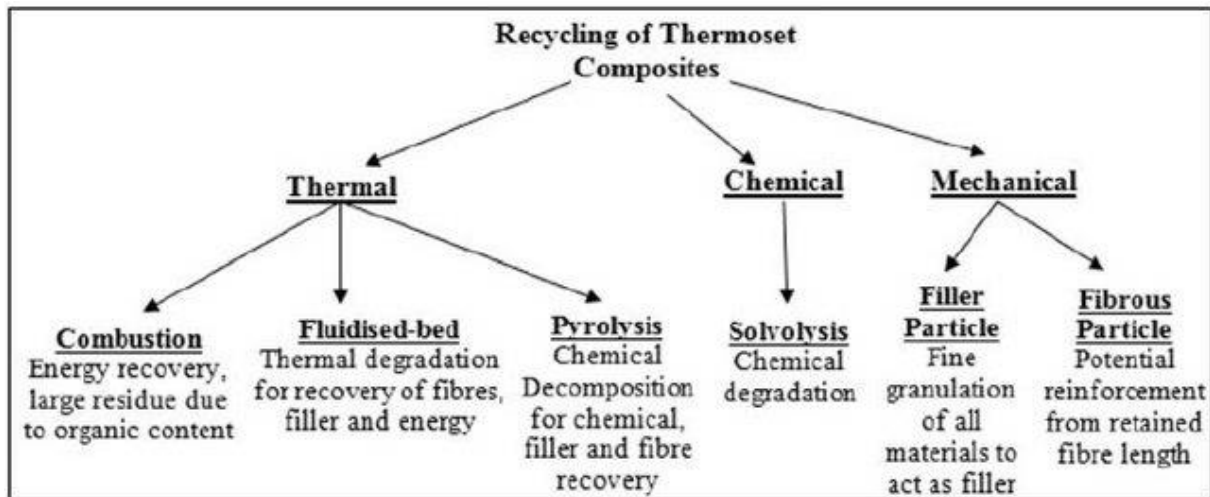
Circulariteit wordt steeds belangrijker in onze maatschappij en ook voor composieten geldt dat ze zoveel mogelijk gerecycleerd moeten kunnen worden i.p.v. verbranden of storten. Het recycleren van thermohardende composieten is complexer dan bij thermoplasten omdat thermohardende harsen sterk vernet zijn en ze dus niet zomaar via smeltverwerking kunnen gerecycleerd worden. Anderzijds bereiken veel thermohardende composieten nu hun einde levensduur, zoals eerste generaties windmolenwieken (vnl. glas/epoxy) en vliegtuigen (vnl. carbon/epoxy). Ook voor nieuwe composietmaterialen inclusief biocomposieten is het belangrijk dat er reeds aandacht besteed wordt in de ontwikkelingsfase over hoe deze later efficiënt kunnen worden gerecycleerd. Voordat er echter overgegaan wordt tot recyclage is voor het circulariteitsmodel belangrijk dat er eerst bekeken wordt hoe de levensduur kan verlengd worden door bv. hergebruik of herstellen (zie Figuur 1).



Figuur 1: circulariteitsmodel 10R.¹

Indien er uiteindelijk toch moet overgeschakeld worden naar recyclage zijn er verschillende mogelijkheden om thermohardende composieten te recycleren namelijk: mechanisch, chemisch of thermisch (Figuur 2).

¹ <https://www.archipunt.nl/het-10r-model-voor-circulariteit-hoe/>



Figuur 2: mogelijke routes om thermohardende composieten te recycleren.²

Deze vormen van recycleren worden in dit rapport verder besproken. Hiervoor baseren we ons op de OVAM studie: “Potentieelinschatting en marktonderzoek naar hergebruik en hoogwaardige recyclage voor vezelversterkte thermoharders”³ waaraan Sirris en Centexbel ook aan hebben meegewerkt en volgende review papers:

- 1) “Recycling of Thermoset Materials and Thermoset-Based Composites: Challenge and Opportunity” door Elisabetta Morici et al.⁴
- 2) “Recycling of Reinforced Glass Fibers Waste: Current Status” door Conçalves et al.⁵
- 3) “Composite Material Recycling Technology—State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s” door Krauklis et al.⁶
- 4) “Cost Modelling for Recycling Fiber-Reinforced Composites: State-of-the-Art and Future Research” door Shehab et al.⁷
- 5) “A Review on the Potential and Limitations of Recyclable Thermosets for Structural Applications” door Post et al.⁸

Hierbij wordt de impact van recyclage op ecologisch en financieel vlak ook kort aangehaald. Naast het recycleren op zich wordt er ook gefocust op het ontwikkelen van thermohardende polymeren die makkelijker te recycleren zijn door hun samenstelling.

Als laatste worden ook nog resultaten besproken uit onderzoeksprojecten rond recyclage van thermohardende composieten waarin Centexbel en/of Sirris deel van uitma(a)k(t)en en wordt een voorbeeld van mechanische recyclage aangetoond van een demonstrator van Brepla.

²https://www.researchgate.net/publication/263019027_Recycling_of_fiber-reinforced_composites_and_direct_structural_composite_recycling_concept

³<https://publicaties.vlaanderen.be/view-file/20492>

⁴<https://www.mdpi.com/2073-4360/14/19/4153/pdf>

⁵<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8876600/pdf/materials-15-01596.pdf>

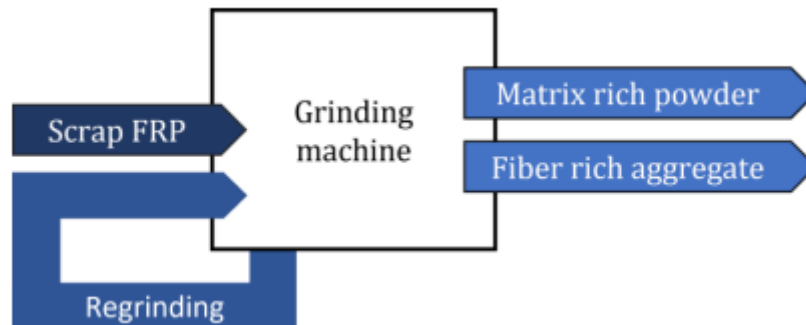
⁶<https://www.mdpi.com/2504-477X/5/1/28>

⁷<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9823720/pdf/polymers-15-00150.pdf>

⁸<https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/15583724.2019.1673406?needAccess=true>

Mechanische recyclage

Mechanische recyclage is naast energierecuperatie (verbranding) de meest eenvoudige vorm van recyclage van thermohardende composieten. Hierbij worden composietmaterialen eerst verkleind en nadien vermalen tot kleinere fracties zoals poeders of vezelhoudende granulaten.



Figuur 3: mechanisch recycleren van composietmaterialen⁹

Dit kan dan gebruikt worden als vulstof in nieuwe composietmaterialen, cement of asfalt. Door het maalproces is er wel een sterke devaluatie van de vezeleigenschappen. Aangezien dit vanuit het oogpunt van mechanische eigenschappen een laagwaardige vorm van recycleren is, wordt dit voornamelijk toegepast voor goedkopere glasvezelversterkte composietmaterialen, maar kan ook een oplossing zijn voor composieten die natuurlijke vezels bevatten. Enkele bedrijven die mechanische recyclage uitvoeren zijn:

- Mixt Composites Recyclables (MCR): <https://www.m-c-r.com/en/quality/recycling>
- Filon Products Ltd: <https://www.filon.co.uk/wp-content/uploads/2018/07/Roofscape-10.pdf>
- Reprocover: <https://reprocover.eu/en/our-services/>; enkel mogelijk indien het vezelgehalte laag is
- Extreme-ecosolutions: <https://extreme-ecosolutions.com/>

⁹ <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8876600/pdf/materials-15-01596.pdf>

Thermische recyclage

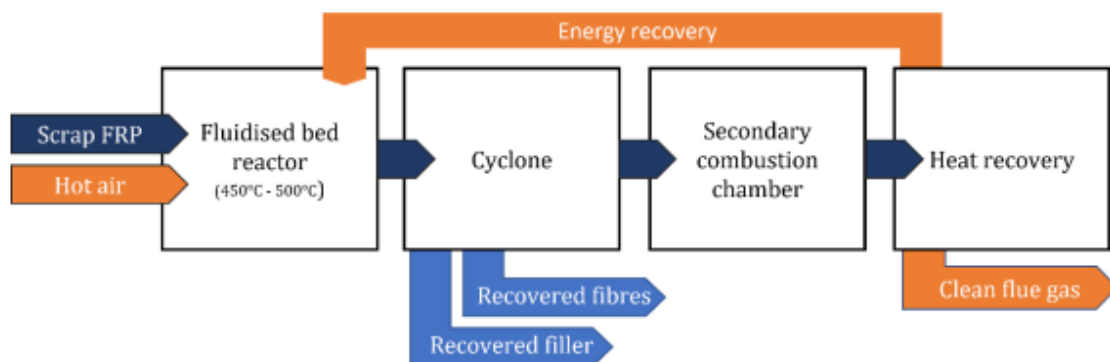
Verbranding

Het verbranden van composieten gebeurt met het oog op energierecuperatie en daarbij is het interessanter dat het composietmateriaal een hoog brandbaar matrixgehalte heeft indien de vezelconcentratie bestaat uit inerte vezels zoals glas of basalt. De assen worden dan nadien gestort of kunnen ook in de cementindustrie gebruikt worden.

In het geval van biocomposieten waarbij plantvezels werden gebruikt als vezelversterking, kan de energierecuperatie groter zijn omdat hier minder assen overblijven aangezien de vezels ook verbranden. Wanneer het biocomposiet 100% biogebaseerd is, kan deze vorm van "recyclage" als energieneutraal beschouwd worden aangezien de vrijgekomen verbrandingsgassen afkomstig zijn uit hernieuwbare bronnen. Anderzijds kunnen aanwezige brandvertragers ervoor zorgen dat het proces minder efficiënt verloopt aangezien deze veelal energie absorberen i.p.v. vrijgeven.

Wervelbedreactor

Bij dit proces wordt siliciumzand in een vloeïende staat gebracht in een warme luchtstroom met een temperatuur tussen 450-550 C° en een snelheid tussen 0.4 en 1 m/s. Dit breekt het composiet af in kleinere stukken, vervluchtigt en oxideert de matrix zodat propere vezels achterblijven die dan worden gerecupereerd in een cycloon. Via een secundaire verbranding op 1000°C wordt de matrix dan volledig verbrand en de warmte die hierbij vrijkomt kan hergebruikt worden om het totale energieverbruik te doen dalen (zie figuur 4).



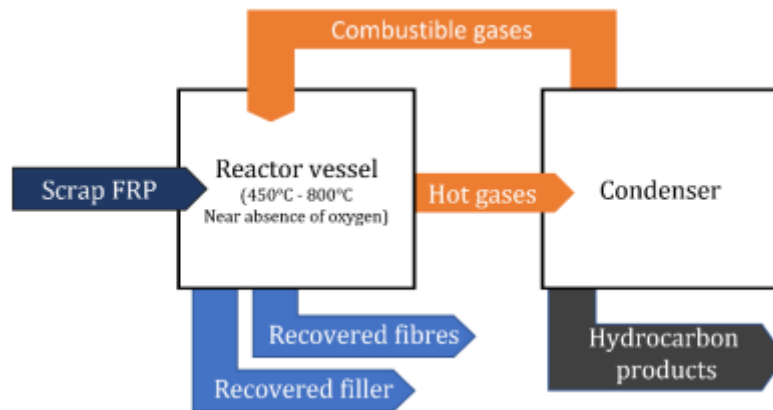
Figuur 4: schema recyclage composieten via wervelbedreactor. ¹⁰

Dit recyclageproces is vooral gericht op het recupereren van de vezels, maar door de hoge temperaturen niet geschikt voor het recycleren van plantvezels. Dit proces is bijvoorbeeld wel geschikt voor het recycleren van natuurlijke minerale vezels zoals basalt en Filavavezels, maar dan moet het ook economisch haalbaar zijn.

¹⁰ <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8876600/pdf/materials-15-01596.pdf>

Pyrolyse

Bij pyrolyse wordt het composietmateriaal verhit tot temperaturen tussen 450°C-800°C in een inerte atmosfeer zodat er decompositie van de matrix optreedt terwijl de vezel (meestal carbonvezel) intact blijft (zie figuur 5). Deze techniek maakt het mogelijk om de composietbestanddelen terug te winnen door de omzetting van de polymeermatrix in gas en olie, terwijl de vezels en vulstoffen (indien aanwezig) kunnen geïsoleerd worden. Het pyrolysegas kan worden gebruikt als brandstof voor het pyrolysesysteem, terwijl de olie kan worden gebruikt als vloeibare brandstof of eventueel als grondstof voor het maken van nieuwe monomeren die opnieuw kunnen worden omgezet in een nieuw hars.



Figuur 5: schema pyrolyseproces¹¹

In het geval van biocomposieten met plantvezels kunnen de vezels niet gerecupereerd worden, maar deze technologie kan mogelijk interessant zijn voor biocomposieten bestaande uit natuurlijke minerale vezels of carbonvezels in combinatie met een biogebaseerd hars.

Voorbeeldbedrijven die pyrolyse uitvoeren:

Composite recycling: <https://composite-recycling.ch/>

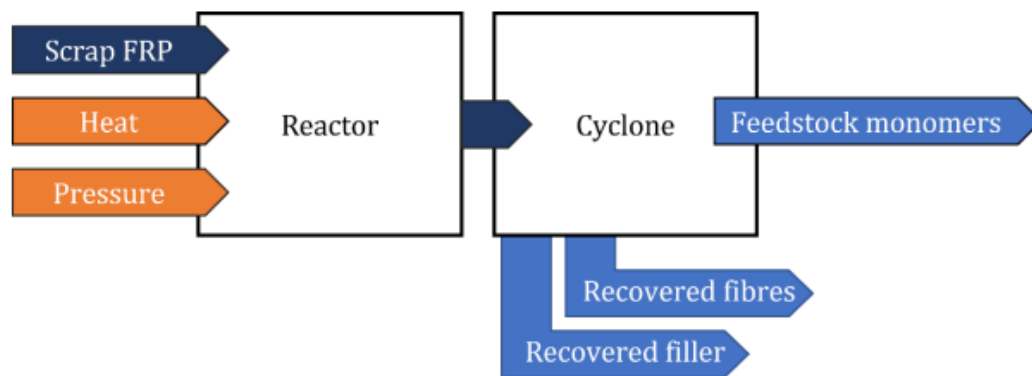
Gen 2 Carbon: <https://www.gen2carbon.com/>

Fuji design: <https://fuji-d.jp/en/>

¹¹ <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8876600/pdf/materials-15-01596.pdf>

Chemische recyclage

Chemische recyclage, ook wel solvolyse genoemd, depolymeriseert de matrix zodat de vezel vrijkomt. De gevormde monomeren kunnen na opzuiveren dienen als startmateriaal voor het maken van nieuwe harsen. Depolymerisatie treedt op door blootstelling aan een specifiek solvent zoals water, salpeterzuur, azijnzuur of glycol al dan niet in de aanwezigheid van katalysatoren en meestal gecombineerd met hoge drukken en temperaturen. Alhoewel deze recyclagetechnologie gebeurt op lagere temperatuur en dus ook minder energie vergt, zijn dikwijls schadelijk solventen vereist om de matrix te kunnen depolymeriseren. Voor biocomposieten op basis van plantvezels is de verlaagde temperatuur interessant, maar anderzijds zijn de vezels niet zo goed bestand tegen de gebruikte chemicaliën waardoor ze niet kunnen gerecycleerd worden en dus hier ook de nadruk zal liggen om de matrixmonomeren nadien af te zonderen en te gebruiken voor nieuwe syntheses.



Figuur 6: schema chemische recyclage¹²

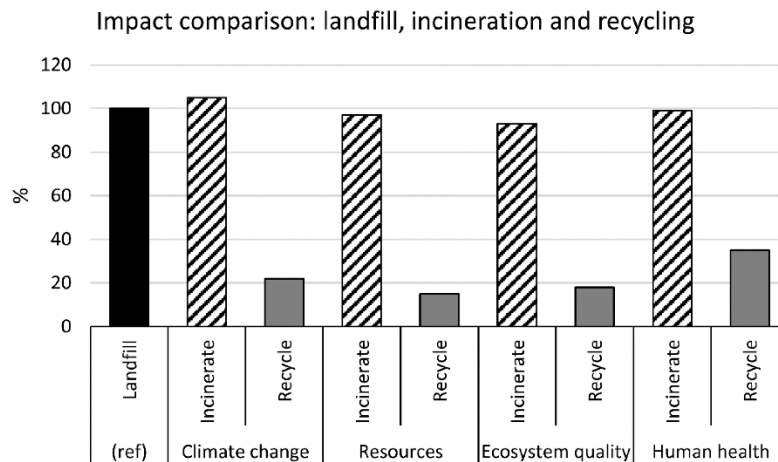
Voorbeeldbedrijven die composieten recycleren via solvolyse zijn:

- RYMYC: <https://www.rymyc.it/>
- Extracthive : <https://www.extracthive-industry.com/>
- Shocker composites: <https://www.shockercomposites.com/>

¹² <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8876600/pdf/materials-15-01596.pdf>

Financiële en ecologische impact van recyclage

Vanuit ecologisch standpunt is het zeker interessant om composietmaterialen te recyclen i.p.v. te storten of te verbranden en dit wordt ook gestaafd in onderstaande grafiek.



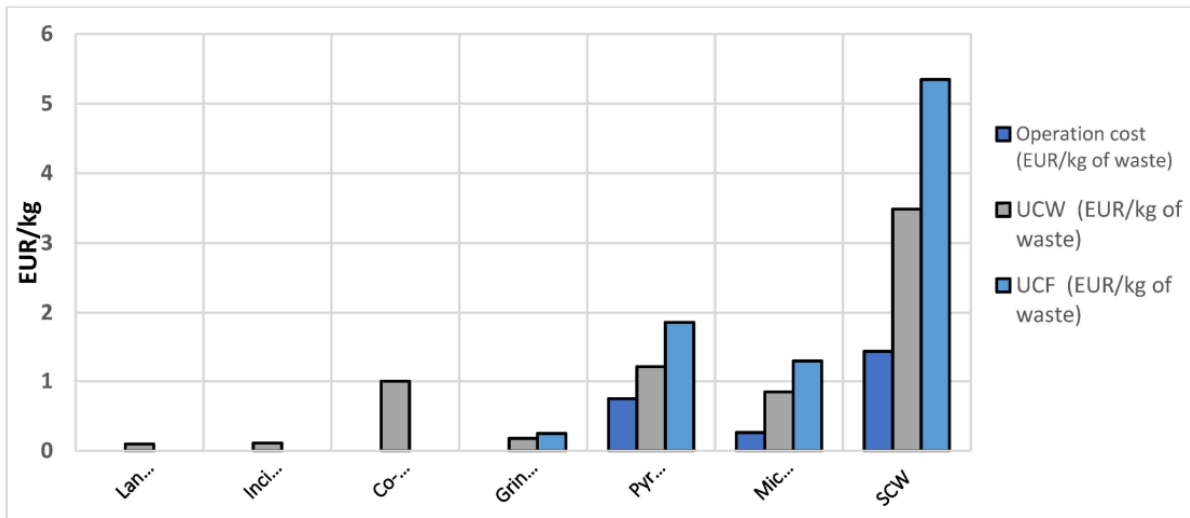
Figuur 7: ecologische impactvergelijking¹³

Anderzijds speelt de kostprijs van recycleren ook een rol en dit is momenteel niet in het voordeel voor de meeste composietmaterialen. Vooral in het geval van glasvezels is dit nadelig gezien de relatief lage kostprijs van glasvezels. Carbonvezels zijn interessanter om te recycleren aangezien deze veel duurder zijn dan glasvezels en dus ook een hogere restwaarde hebben. Echter, doordat de vezels korter worden door het recyclageproces kunnen ze niet meer gebruikt worden in structurele toepassingen en verliezen ze daardoor een groot stuk van hun waarde waardoor ze momenteel meestal gewoon worden verbrand of gestort.

Vo Dong et al. (2018)¹⁴ voerde een economische en milieubeoordeling uit van verwijderingsroutes voor CF-afval (Carbonvezel). Het ontwikkelde model vergeleek storten, verbranden, mechanische recyclage, pyrolyse en chemische recyclage (superkritisch water (SCW)) in termen van drie economische indicatoren, namelijk: (1) exploitatiekosten per massa eenheid afval; (2) de eenheidskosten per massa eenheid afval (UCW); en (3) de eenheidskosten per massa van teruggewonnen vezels (UCF). Dit wordt weergegeven in figuur 7.

¹³ <https://www.mdpi.com/2504-477X/5/1/28>

¹⁴ <https://hal.science/hal-01977839/document>



Figuur 8: Kost voor afvalwerking van EOL carboncomposieten. UCW = unit cost per mass of unit waste; UCF = unit cost per mass of recovered fiber; Lan= landfill, Inci = incineration, Co=co-incineration; Grin = Grinding, Pyr = pyrolysis, Mic = microwave heating; SCW = super critical water.¹⁵

Op deze grafiek is duidelijk te zien dat de kost voor storten of verbranden momenteel veel lager ligt t.o.v. recycleren.

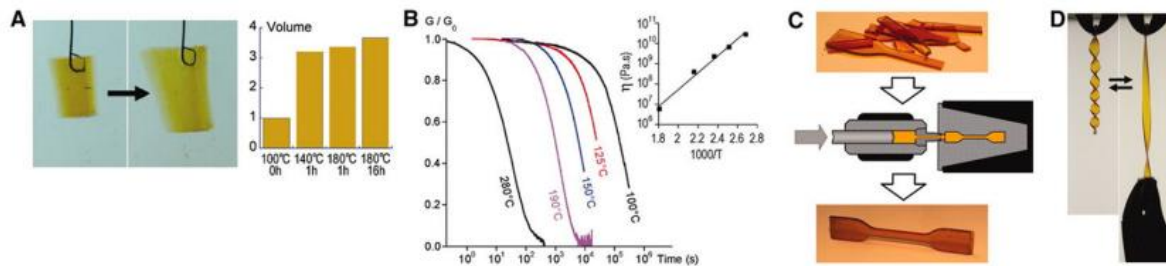
Anderzijds bereiken veel van deze duurzame composietmaterialen nu hun eindelevensduur (bv. windmolenwieken) en dit zal in toekomst enkel stijgen waardoor veel landen zich bewust zijn dat storten of zelfs verbranden een te hoge ecologische kost wordt waardoor dit ook in veel landen niet meer zal worden toegelaten of er zal een hogere vergoeding voor storten gevraagd worden. Dit is een grote stimulans om composietmaterialen te gaan recycleren via één van de boven aangehaalde recyclagemethodes.

Voor biocomposieten op basis van plantvezels is het eerder belangrijk dat de matrix kan gerecycleerd worden door bv. depolymerisatie dan het herwinnen van de vezels aangezien deze praktisch geen restwaarde hebben, de vezels volledig hernieuwbaar zijn en bv. in het geval van vlas en hennep ook geen intensieve landbouw vragen. Dus deze vezels kunnen in principe gewoon gestort worden waar ze zullen biodegraderen en als meststof kunnen dienen voor nieuwe gewassen of ze kunnen verbrand worden energierecuperatie.

¹⁵ <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9823720/pdf/polymers-15-00150.pdf>

Redesign

Naast het ontwikkelen van recyclagemogelijkheden voor de momenteel moeilijk te recycleren thermohardende materialen is het ook belangrijk om thermohardende harsen te ontwikkelen die makkelijker kunnen gerecycleerd worden. Dit kan worden gerealiseerd door het introduceren van degradeerbare of dynamische covalente verbindingen in de moleculaire structuur. Door een externe stimulans (e.g. warmte, reagens of licht) kunnen deze verbindingen dan verbroken worden. Een speciale klasse binnen de recycleerbare thermohardende harsen zijn de vitrimeren (figuur 9). Deze harsen gedragen zich bij lage temperaturen als gewone thermohardende polymeren, maar bij hogere temperaturen worden ze visco-elastisch door bindingsuitwisselingsreacties en kunnen dus zoals thermoplastische polymeren thermisch vervormd worden.¹⁶



Figuur 9: vitrimerconcept¹⁶

De meeste van deze 'recycleerbare' thermohardende polymeren bevinden zich nog in het academisch stadium maar toch zijn er al een paar commercieel beschikbaar:

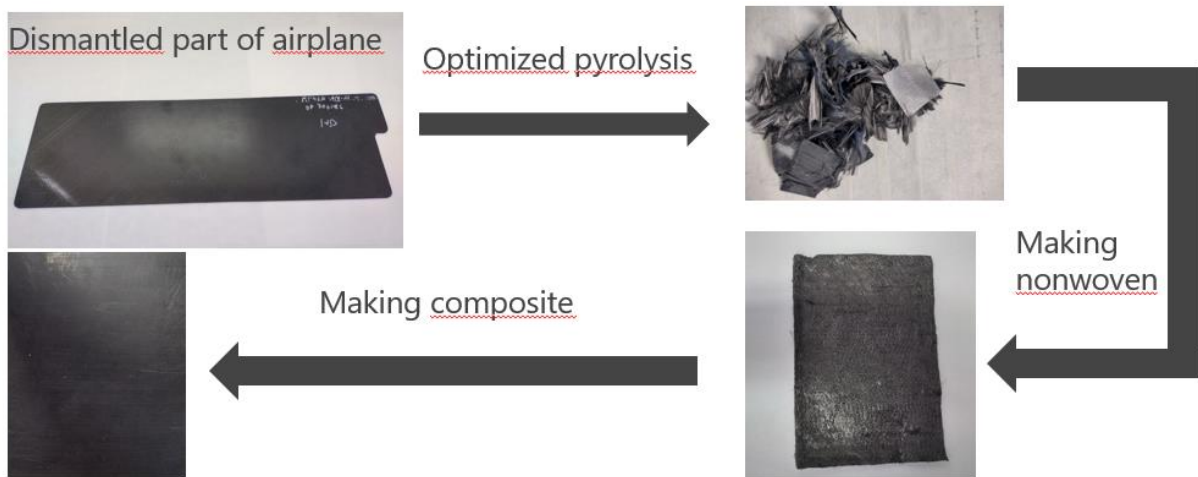
- Aditya Birla (<https://www.abg-am.com/portfolio/chemistry/recyclamine-technology/F008?tab=1>): heeft een recyclebaar amine (Recyclamine) en is geschikt in combinatie met epoxyharsen
- Mallinda (<https://mallinda.com>): biedt polyimine gebaseerde vitrimeren aan onder de naam Vitrimax

¹⁶ <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15583724.2019.1673406>

Resultaten uit projecten

Helacs¹⁷

Helacs is een Europees gesubsidieerd project met focus op het ontwikkelen van recyclageprocessen om hoge kwaliteitsvezels te halen uit vliegtuigcomposietonderdelen zodat die vervolgens opnieuw kunnen gebruikt worden in composieten. Het recyclageproces is een geoptimaliseerd pyrolyse proces. De bekomen rCF vezels (recycleerde Carbonvezel) worden gebruikt om nonwovens te maken en via een RTM of persproces kunnen dan opnieuw kwalitatieve composieten gemaakt worden (Zie figuur 10).



Figuur 10: recyclageconcept van het Helacsproject

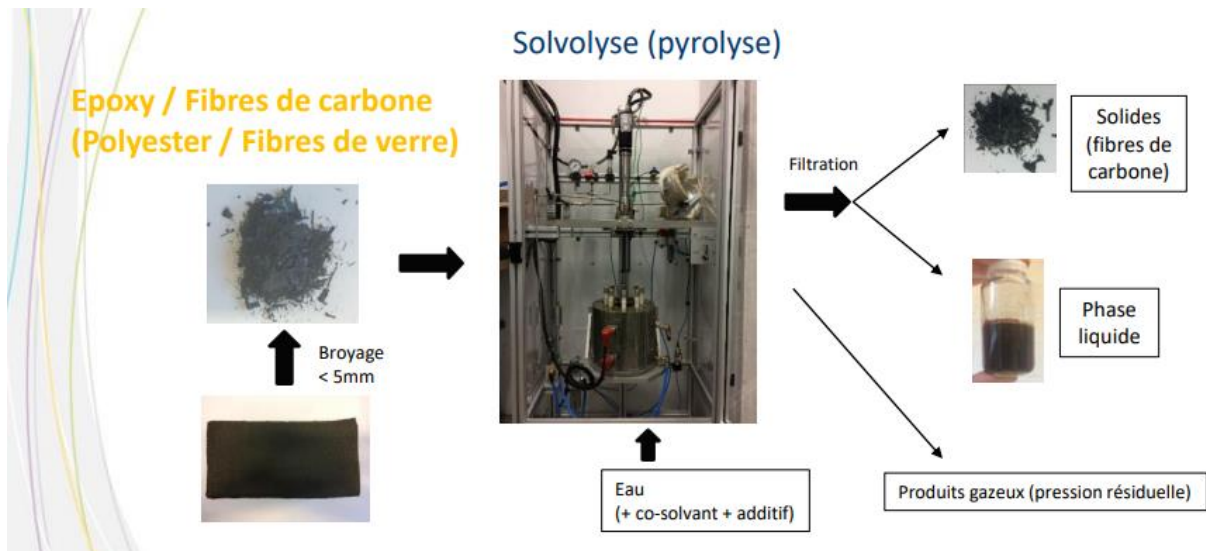
Door de vezels van een sizing te voorzien kunnen de mechanische eigenschappen bovendien nog verder worden geoptimaliseerd .

Recy-composite¹⁸

Het Interregproject RECY-COMPOSITE heeft als objectief een antwoord te bieden op de uitdaging die de composiet materialen stellen op drie verschillende niveaus en dit binnen een grensoverschrijdend gebeuren: mechanische recyclage, chemische recyclage en energierecuperatie indien de vorige opties niet haalbaar zijn. Via een solvolyseproces kunnen de vezels en matrix gescheiden worden (zie figuur 11). De vloeistoffractie bestaat uit meer dan 50 verschillende moleculen (alcoholen , fenolen, amines,...) die nadien best ook nog afgezonderd worden om valorisatie mogelijk te maken.

¹⁷ <https://www.aitiip.com/helacs.html>

¹⁸ <http://www.recycomposite-interreg.eu/>



Figuur 11: solvolyseproces uit het recy-composite project¹⁹

SUSPENS²⁰

Het door de EU gefinancierde SUSPENS-project heeft als doel biogebaseerde epoxy- en polyesterharsen te ontwikkelen met een biogehalte van meer dan 95%. Deze harsen worden gecombineerd met duurzame versterkingen gemaakt met natuurlijke en gerecyclede vezels om sandwichpanelen te maken. Er worden ook recyclingoplossingen ontwikkeld. Een innovatief pyrolyseproces zal de afvalstroom die vrijkomt bij het carbonvezeltransformatieproces gebruiken om het energieverbruik te optimaliseren. Een specifiek solvolyseproces zal de biogebaseerde harsen terugwinnen. De aanpak zal worden gedemonstreerd door het vervaardigen van een accucover voor een auto, een dek en romp van een zeilboot en een onderdeel voor een vliegtuigvleugel. Een holistische levenscyclusanalyse zal de demonstratie ondersteunen door de behaalde winst op het gebied van de milieu-impact op de cradle-to-cradle-cyclus te meten.

Ecoxy²¹

In het ECOXY project werden innovatieve biogebaseerde epoxyharsen en vezelversterkingen ontwikkeld om nieuwe duurzame en techno-economisch concurrerende vezelversterkte thermohardende composieten (te produceren door zich te richten op geavanceerde functionaliteiten: reparatiebaarheid, herverwerkbaarheid en recycleerbaarheid (3R)). De 3R-functionaliteiten werden bereikt door het gebruik van nieuwe harsformuleringen waarbij algemeen gebruikte verharders vervangen werden door dynamische verharders.

¹⁹ <http://www.recycomposite-interreg.eu/images/Presentations/Resultats-RECY-COMPOSITE.pdf>

²⁰ <https://www.suspensproject.eu/>

²¹ <https://ecoxy.eu/>

Proof of concepts in Brepla

In het Brepla project zelf werden enkele proof of concepts rond het scheiden en recyclen van composieten uitgetest. Als eerste werd nagegaan of afval van de dienbladdemonstrator (vlas/epoxy) na vermalen kan gebruikt worden als vulstof in thermoplastische biopolymeren. Als tweede werd nagegaan of de huid van de kern bij een sandwichpaneel kan gescheiden worden door middel van een groen solvent op kamertemperatuur en atmosferische druk.

Mechanische recyclage

Het dienblad werd vermalen en het recyclaat werd toegevoegd aan PLA via een compoudeerstap.



Figuur 12: PLA compound met vlas/epoxy recyclaat

PLA compounds met 10% en 20% recyclaat konden makkelijk aangemaakt worden en van deze compounds werden trekstaafjes gemaakt via spuitgieten (figuur 13).



Figuur 13: PLA trekstaafjes met vlas/epoxy recyclaat

Het effect van het toevoegen van vlas/epoxy recyclaat op de mechanische eigenschappen werd bepaald met een trek- en buigproeftest. De resultaten worden getoond in tabel 1.

Tabel 1: trek- en buigeigenschappen van PLA met een zonder vlas/epoxy recyclaat. Met Et de trekmodulus, om treksterkte, eb de verlenging bij breuk, Ef de buigmodulus, ofm de buigsterkte en efb de verlenging bij breuk.

Materiaal	Et [MPa]	om [MPa]	eb [%]	Ef [MPa]	ofm [MPa]	efb[%]
PLA	3810	57,1	5,2	3740	119	7,5
PLA + Dienblad (10%)	3600	64,8	2,5	3410	105	3,9
PLA + Dienblad (20%)	3810	65,2	2,5	3560	104	3,5

Uit de tabel blijkt dat modulus en sterkte gelijkaardig zijn aan PLA zonder recyclaat, maar de verlenging bij breuk is lager voor PLA met recyclaat in wat betekend dat het materiaal brosser geworden is, wat typisch is als er vulstoffen worden toegevoegd aan thermoplastische polymeren.

Scheiden van toplaag en kern van sandwichpanelen

Composietsandwichpanelen zijn samengestelde materialen bestaande uit een kern en huid. De kern zorgt voor een grote buigweerstand en een laag gewicht terwijl de huid de trek- en compressiekrachten opvangt. De samenstelling van de huid en kern is meestal verschillend zodat het interessant is deze te scheiden voor recyclage. In Brepla werd een biocomposietsandwichpaneel gemaakt met een honingraatkarton als kern en een biopolyurethaan geïmpregneerd vlasweefsel als huid.

Een stukje van dit composiet werd in het solvent Anisol gebracht. Na 1 uur kan de huid heel gemakkelijk van het honingraat karton worden losgetrokken (zie figuur 14).



Figuur 14: scheiden van huid en kern

Dit werd ook eens herhaald voor een monolithisch component bestaande uit bioPU en vlas. De lagen kunnen makkelijk uit elkaar gehaald, maar de PU lost niet op en blijft tussen de vezels zitten. Dus het solvent zorgt ervoor dat de adhesie tussen de PU en vlas verbroken wordt (zie figuur 15).



Figuur 15: gedelamineerd vlas/bio PU composiet

Dit werd ook eens herhaald voor een vlas/bio-epoxy composiet en basalt/furan composiet door deze te proberen op te lossen in verschillende groene solvents op kamertemperatuur en op 60°C, maar door de hogere chemische resistentie van deze twee harsen konden de composietlagen niet van elkaar gescheiden worden. Deze harsen vragen dus hardere recyclagecondities.

Conclusies

Er bestaan reeds heel wat mogelijkheden om thermohardende composieten te recyclen, maar de hogere kostprijs t.o.v. storten of verbranden maakt dat dit nog niet op grote schaal wordt uitgevoerd. Anderzijds zijn vele instanties zich ervan bewust dat de afvalberg van composietproducten snel zal stijgen en recyclage daarom aanbevolen is. Er wordt dan ook verwacht dat er een verbod zal komen op storten van end of life composietmaterialen. Recente ontwikkelingen rond makkelijker te recyclen thermohardende harsen zullen dit verder in de juiste richting duwen. Voor biocomposieten op basis van plantvezels is storten nog te verantwoorden als enkel de vezel gestort wordt aangezien deze zal biodegraderen of het volledig composiet biodegradeerbaar is.