

EIND RAPPORT PPS PROJECT: HERO

PUBLIEK PROJECT RAPPORT

Project title:	High End Recycling of Polymer & PV-Glass (HERO)
Project number:	2021201
Version:	23/06/2015
Project coordinator:	TNO
Project partners:	Exasun, Maltha, Heathland-Trinseo
R&D line:	Program line 1a: 'Zonnestroomtechnologieën'
Total project budget:	303k€
Starting date:	01/03/2022
End date:	28/02/2025
Reporting period:	01/03/2022 until 28/02/2025
Reported by:	M. Späth – P.M. Sommeling Martin.spath@tno.nl



1. INTRODUCTIE

Fotovoltaïsche (PV) panelen vertegenwoordigen aan het einde van hun levensduur een zeer lage restwaarde, wat economisch rendabele recycling in de weg staat. Om deze impasse te doorbreken richt dit project zich op een circulair hoogwaardig glas-polymeerproduct, gemaakt van PV-panelen en polymeerrecycalaat. Glas-polymeer composietmaterialen combineren eigenschappen van PV-glas en lichtgewicht polymeren waardoor nieuwe BIPV-toepassingen mogelijk worden.

Projectdoelen

Een van de waardevolle materialen van een PV-paneel is de voorste glasplaat die een andere chemische samenstelling heeft dan standaard helder vensterglas, met een lager ijzergehalte. De productie van dit glas vereist complexe industriële processen vanwege de onzuiverheden in het minerale basismateriaal. Daarom is solar glas een waardevol materiaal dat het waard is om opnieuw te worden gebruikt voor hetzelfde doel, namelijk toepassing in PV-panelen. Op dit moment is er echter geen echte markt voor gerecycled PV-glas omdat de afvalstromen relatief klein zijn, waardoor het PV-glas momenteel wordt gedowncycled.

Wij wilden een hoogwaardige afzetmarkt ontwikkelen voor gerecycled PV-glas/polymeren en deze materialen verwerken in lichtgewicht Building Integrated en/of Vehicle Integrated (BIPV- en VIPV-) toepassingen, niet alleen in vlakke maar ook in 3D-vormige objecten. Dit past in het programma van MMIP dat zich richt op materiaalontwikkeling om circulariteit en volledig materiaalhergebruik mogelijk te maken.

Activiteiten en onderzoeksmethoden

In het project richtte glasrecyclingexpert Maltha zich op zuiveringstechnologieën van hoogwaardige glasmineralen uit afgedankte PV-panelen. Het glas aan de voorkant van PV-panelen heeft een diverse chemische samenstelling die een grote uitdaging vormt voor recycling en de productie van nieuwe hoogwaardige circulaire producten. Partner Heathland-Trinseo, expert in polymeerrecycalaat en recyclebare kunststoffen, zuiverde en bereidde geschikte polymeren uit afvalbronnen om deze te combineren met PV-glasrecycalaat voor de productie van BIPV-gevelelementen. TNO, bedenker van het projectidee, was verantwoordelijk voor het mengen van de recyclaten en het afstemmen van de unieke materiaaleigenschappen.

Verwachte resultaten aan het begin van het project

De verwachte resultaten zoals gepland in het project, met als einddoel het leveren van een set materialen die, wanneer gecombineerd, toelaten om de individuele restwaarde te verhogen door een hoogwaardige BIPV front glasplaat te produceren, konden niet gehaald worden door het vroegtijdig beëindigen van het project. Een overzicht van de behaalde resultaten wordt beschreven in hoofdstuk 3.

Project partners

Tabel 1.1. *Project partners*

Naam	KvK nummer	Type organisatie
Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek TNO	27376655	Kennis Instituut

Naam	KvK nummer	Type organisatie
Maltha recycling	20078126	Internationaal opererend groot bedrijf

Naam	KvK nummer	Type organisatie
Heathland BV	17246130	MKB kleinbedrijf

Naam	KvK nummer	Type organisatie ¹
Exasun BV	63654911	MKB kleinbedrijf

Gelieerde partners

- Stichting Open, recycler van elektronisch afval en grootste inzamelaar van PV (Sociale onderneming);
- ASOM Alliance for solar mobility, Europees platform ter oprichting en onderhoud van de solar mobiliteit industrie

Mogelijke eindgebruikers

Sabic innovative plastics is zeer geïnteresseerd in het gebruik van circulaire lichtgewicht BIPV zonnepanelen en zal op de hoogte worden gehouden van de voortgang van het project. GMB Glasmanufaktur Brandenburg GmbH in Duitsland zal de voortgang van het project volgen om het PV-glasrecycalaat toe te passen voor de productie van circulaire PV-frontplaten in de toekomst.

2. RESULTATEN

Werk Pakket 1

Maltha richtte zich op het recyclen en zuiveren van het end-of-life (EoL) PV-glas uit de voorplaat van het zonnepaneel. De activiteiten waren voornamelijk gericht op het breken van de glasplaat, gevolgd door zeven om verschillende granulaatgroottes en -vormen te scheiden. Deze granulaten werden gebruikt voor het mengen met polymeren (WP3). De resultaten toonden aan dat de grootte van het granulaat cruciaal is voor de mengverhouding en de optische eigenschappen. Maltha leverde glasgranulaat volgens de voor de toepassing vereiste specificaties door de gewenste grootte op micron schaal te selecteren en werkte aan het veranderen van de vorm door fijn afgestemde nabewerking. De grootte en vorm van het begingranulaat worden vooraf bepaald door het glasfabricageproces, dat wil zeggen de dikte van de glasplaat en het hardingsprotocol van het glas (temperatuurprofiel, inclusief temperatuurgradiënt in het koelproces).

Analyse van glasgranulaat uit EoL-glasplaat

In het centrum voor glasonderzoek van Maltha zijn uitgebreide analyses uitgevoerd aan het gerecyclede glas. Hierbij werden vooral de deeltjesgrootte en ongewenste verontreinigingen onderzocht. De karakterisering ondersteunde de identificatie van kwaliteitsaspecten voor hergebruik en hielp bij het sturen van het ontwerp van het recyclingproces. Maltha evalueerde de materiaalkwaliteit door zowel verontreinigingsanalyses (zoals koolstofresidu) als toepassingstesten uit te voeren om het optimale gedrag van het materiaal in een industriële productieomgeving te garanderen.

Discussie

Twee projectdoelen werden niet gehaald door een voortijdig einde van het project. Maltha wilde opschalen naar een economisch haalbaar industrieel proces met een flexibel industrieel proces dat geschaald kan worden tussen 10 kt/jaar en 100 kt/jaar.

Hiertoe kon niet worden voldaan aan het opstellen van een 'materiaalpaspoort' voor het gerecyclede glas. Maltha heeft tijdens het project de karakterisering van het glasrecyclaat verbeterd en streeft naar een recyclingproces dat een consistente materiaalkwaliteit levert.

Werk Pakket 2

Als startpunt moest er een specificatie worden opgesteld van een geschikt polymeerrecyclaat dat voldeed aan de verwachte materiaaleigenschappen voor combinatie met glasgranulaat en toepassing in BIPV-elementen. Heathland leverde informatie over compatibilisatoren voor MMA en zorgde voor kennisoverdracht tussen Trinseo en TNO over de eigenschappen van PMMA.

Heathland verwerkte PMMA-afval tot gerecycled MMA (rMMA) in de proeffabriek in Moerdijk.

Er is een evaluatie uitgevoerd om de verschillende soorten de-polymerisatie apparatuur (batch en continu) te vergelijken die gebruikt moeten worden om composiet plaatmateriaal bestaande uit glas en PMMA te verwerken.

Voorlopige conclusie

Vanwege mogelijke schade aan continue apparatuur is er een sterke voorkeur voor een batchreactor. Depolymerisatie van PMMA/glascomposietmaterialen is niet uitgevoerd om de effectiviteit van de depolymerisatie te controleren, omdat de bereiding van de composiet op grotere schaal tot nu toe niet succesvol was. Heathland's succesvolle terugwinning van MMA uit PMMA (zonder de glasdeeltjes) is echter een goede indicatie voor het potentieel van het idee voor circulaire PMMA verwerking van composietmaterialen en kan worden gebruikt als input voor toekomstig werk. Er is een evaluatie gemaakt van het gebruik van PMMA als alternatief voor polycarbonaat. Het intrinsieke gebrek aan brandwerendheid in vergelijking met polycarbonaat lijkt het grootste nadeel van PMMA.

Discussie

De verkregen resultaten komen gedeeltelijk overeen met de doelstellingen van het project. Oorspronkelijk was het de bedoeling om de glas/polymeer mengmonsters te ontleden in de polymeerreactor bij partner Heathland/Trinseo. Het ontleden van de plaatmonsters in glasgranulaat en het depolymeriseren van PMMA tot monomeergrondstof (rMMA) zou het bewijs zijn geweest van echte materiaalcirculariteit, ondersteund door analyse van het teruggewonnen glasgranulaat.

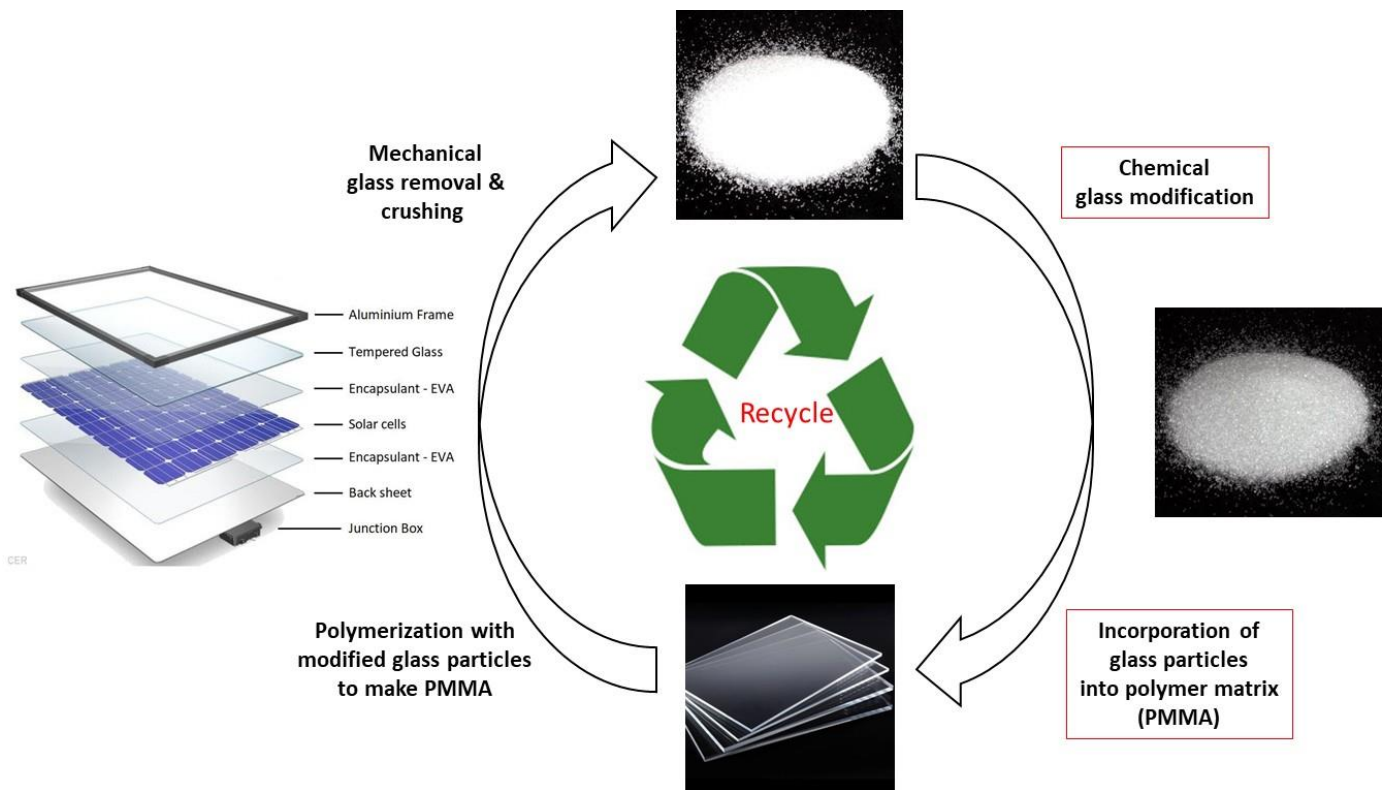
Om de beperkte brandwerendheid van PMMA te verbeteren, kunnen vlamvertragers aan het polymeer worden toegevoegd en dit probleem zal naar verwachting ook minder belangrijk worden zodra PMMA wordt beladen met een hoog glasgehalte. Deze aspecten zouden in vervolgprojecten aan bod kunnen komen.

Werk Pakket 3

Na overleg met Heathland over de opties voor polymeren die in het project zouden worden toegepast, werd besloten om te focussen op polymethylmethacrylaat (PMMA) omdat Heathland het andere kandidaat-polymeer, PET, niet in zijn productportfolio heeft. Bovendien heeft PMMA het voordeel van een hoge transparantie in combinatie met geavanceerde recyclingmogelijkheden op basis van de specifieke eigenschappen van dit materiaal, aangezien het kan worden gedepolymeriseerd, wat resulteert in het MMA-monomeer dat het uitgangsmateriaal is voor de productie van PMMA. Dit heeft het voordeel dat het gemakkelijk kan worden gezuiverd door destillatie, waardoor een gerecycled product van hoge kwaliteit ontstaat en een echt circulaire verweringsketen van:

polymerisatie/toepassing/einde levensduur/depolymerisatie/zuivering/polymerisatie/toepassing....

Als modelverbinding is commercieel verkrijgbaar MMA door TNO gebruikt als uitgangsmateriaal voor de synthese van PMMA en het mengen met gebroken glas (deeltjes) dat door Malta op laboratoriumschaal is geleverd. Figuur 2.1 illustreert de belangrijkste processtappen die nodig zijn om een voldoende transparant polymeer/glas composietmateriaal te verkrijgen.



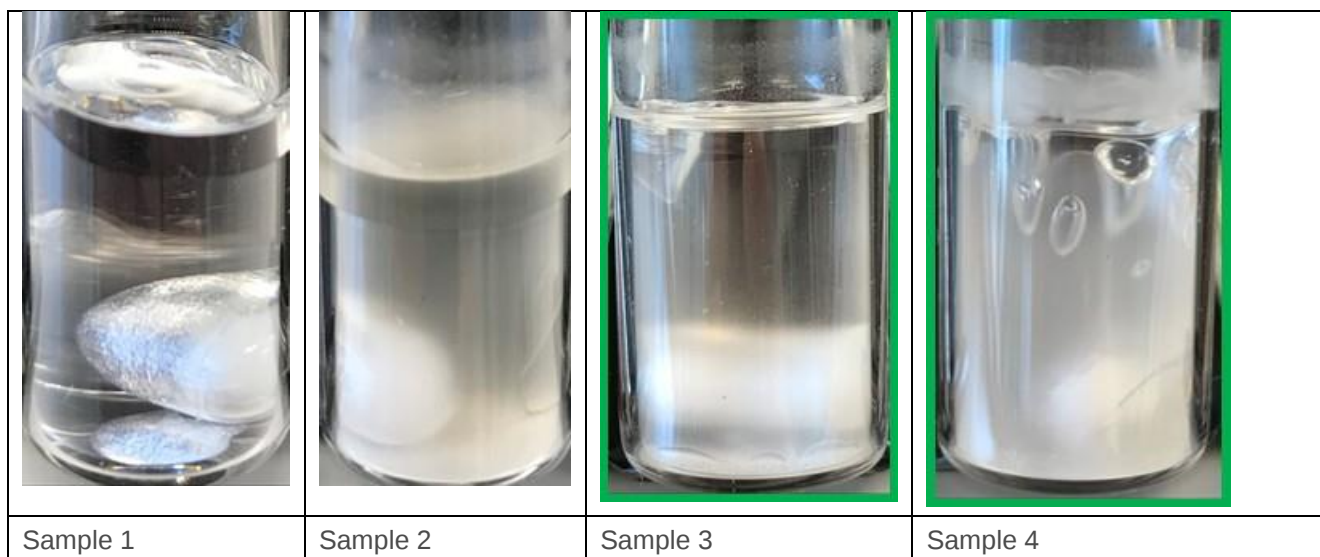
Figuur 2.1. Illustratie van de belangrijkste basisverwerkingsstappen bij het maken van een polymeer/glas composietmateriaal

Door een mengsel van vloeibaar MMA en glasdeeltjes continu te roeren bij verhoogde temperatuur kunnen de laatste in suspensie worden gehouden terwijl het polymerisatieproces bezig is. Dit resulteerde voornamelijk in een homogene verdeling van glasdeeltjes in een PMMA-matrix, maar met een duidelijke wazigheid in het gepolymeriseerde eindproduct als gevolg van verschillen in brekingsindex tussen het polymeer en het glas.

In een volgende stap zijn experimenten uitgevoerd om de brekingsindex van het glas aan te passen door voorbehandeling van de gerecyclede glasdeeltjes voordat ze in de matrix werden gemengd.

Verschillende variaties van glasvoorbehandelingsprocessen, resulterend in verschillende routes voor oppervlaktemodificatie, zijn getest en geëvalueerd met het oog op de optische eigenschappen. Figuur 2.2 geeft enkele voorbeelden die de effecten illustreren van verschillende variaties in additieven en het gehalte aan glasdeeltjes (respectievelijk 5 en 25 %) in de polymeermatrix.

MMA REF	+ glass untreated, 5 wt%	+ pretreated glass 5 wt%	+ pretreated glass 25 wt%
---------	--------------------------	--------------------------	---------------------------



Figuur 2.2. Visuele effecten van verschillende variaties in de voorbehandeling en het gehalte aan glasdeeltjes (respectievelijk 5 en 25 %) in de polymeermatrix. Op de bodem van de flacons zit een magnetische boon om te roeren.

Het mengen van glasdeeltjes zonder enige voorbehandeling in MMA gevolgd door polymerisatie resulteerde in een nogal wazig polymeer (sample 2), vergeleken met zuiver MMA na polymerisatie (referentie, sample 1).

Voorbehandeling van de glasdeeltjes voor aanpassing aan de brekingsindex van de matrix (PMMA) resulteerde in een aanzienlijke verbetering van de helderheid (sample 3) bij een glasgehalte van 5% in het eindproduct. Dit levert een proof of principle voor het idee om een composietmateriaal van glas en PMMA te maken en betekent een belangrijke en veelbelovende eerste stap in de richting van de doelstelling om een alternatief voor polycarbonaat te ontwikkelen op basis van gerecycled basismateriaal.

Het verhogen van het glasgehalte tot 25% resulteerde in een lagere helderheid (sample 4). Hoewel de waargenomen waas in het eindproduct niet noodzakelijk leidt tot onaanvaardbare verliezen in lichttransmissie, kan deze om esthetische redenen ongewenst zijn in bepaalde producttoepassingen. In het ultieme geval moet een composiet worden gemaakt met een helderheid gelijk aan glas of zuiver PMMA, dit vereist verdere optimalisatie van de processen en componenten.

Tot nu toe zijn alle experimenten en testen uitgevoerd in kleine gesloten flacons die blootgesteld zijn aan verhoogde temperaturen in een oven om het polymerisatieproces op gang te brengen. Om van praktisch nut te zijn moet het proces echter uiteindelijk opgeschaald worden naar het niveau van PMMA-platen, zoals oorspronkelijk de bedoeling was in het project. Binnen het gegeven beperkte tijdsbestek als gevolg van een voortijdig einde van het project en onvoorziene praktische problemen bij het opschalen van de polymerisatie is dit nog niet gelukt. Om die reden is ook de toepassing in PV-modules (werk pakket 4) en het testen daarvan niet uitgevoerd.

Discussie

De verkregen resultaten komen gedeeltelijk overeen met de doelstellingen van het project. Het belangrijkste resultaat is het proof of principle voor het mengen van glasdeeltjes en PMMA-polymeer om een composietmateriaal te maken dat volledig gebaseerd is op afvalmaterialen met

veelbelovende eigenschappen die mogelijk kunnen worden toegepast in PV-panelen, waardoor een echt circulair proces ontstaat. Opschaling naar platen met een groter oppervlak (A4-formaat) van dit materiaal is niet gerealiseerd vanwege een gebrek aan geschikte gespecialiseerde apparatuur en onderschatting van kritische verwerkingsparameters die opschaling in de weg staan. Dit is een geschikt onderwerp voor een vervolgproject waarin de uitdagingen tot nu toe kunnen worden aangepakt.

3. BIJDRAGE AAN KENNIS DISSEMINATIE

Tabel 3.1 *Publicatie overzicht*

Datum	Titel	Auteur	Conferentie/medium
12-07-2022	HERO: van PV-glas naar circulaire glas polymer front sheet voor BiPV en ViPV modules	Martin Späth / Marco de Jonge Baas	Artikel Solar Magazine
15-12-2021	Nieuwsuur item over recyclen zonnepanelen TNO solar lab Petten	Martin Späth / Agnes Mewe / Hein Hansen	Nieuwsuur
01-12-2021	Eindelijk een zonnepaneel dat wel te recyclen is	Martin Späth / Amanda Verdonk	Artikel NRC