



BREPLA

Biobased fibre REinforced PLAstics

Leverbaarheid 5.2.1

Methodiek voor productie van 2D & 3D-structuren

Sirris | Wannes Lembrechts - Linde De Vriese
wannes.lembrechts@sirris.be - linde.devriese@sirris.be

Project: HBC.2020.2567 Biogebaseerde Vezelversterkte Kunststoffen

Projectpartners: Centexbel en Sirris

Collectief Onderzoek & Ontwikkeling en Collectieve Kennisverspreiding (COOCK) gesteund door Vlaio

1 januari 2021 - 31 december 2023



sirris innovation
forward

Lijst van figuren

| | |
|---|----|
| Figuur 1: Opstelling van het vlas-PLA weefsel tijdens een droogtest | 6 |
| Figuur 2: Gewichtsevolutie (%) vlasweefsel tijdens droging op 80°C | 7 |
| Figuur 3: Gewichtsevolutie (%) vlas-PLA weefsel tijdens droging op 80°C | 7 |
| Figuur 4: Relatieve gewichtsoptname (%) vlas-PLA weefsel na droging..... | 8 |
| Figuur 5: Het consolidatieproces afgebeeld aan de hand van een temperatuur-tijd grafiek [3] | 9 |
| Figuur 6: Voorbeeld van een pers geschikt voor thermocompressie tot 2D-plaatmateriaal | 10 |
| Figuur 7: Kracht-temperatuur-tijds grafiek voor thermocompressie vlas-PP door Dehondt Composites [1]..... | 11 |
| Figuur 8: Kracht-temperatuur-tijd grafiek voor thermocompressie vlas-PA11 door Dehondt Composites [4] | 11 |
| Figuur 9: Overzicht variatie perstemperatuur en persdruk, de verschillende processtappen en de cyclustijd voor een perstemperatuur van 200°C | 12 |
| Figuur 10: druk-temperatuur-tijd grafiek voor de non-woven hennep-PP testen. | 12 |
| Figuur 11: Resultaten van variatie in perstemperatuur en persdruk voor non-woven hennep- PP | 13 |
| Figuur 12: Resultaten consolidatietest op 180°C met variatie in druk en gewichtsverhouding bij non-woven vlas-PLA | 14 |
| Figuur 13: Microscopiefoto's van non-woven vlas-PLA 50/50 na 10 bar persdruk | 14 |
| Figuur 14: Microscopiefoto's van non-woven vlas-PLA 50/50 na 15 bar persdruk | 15 |
| Figuur 15: Resultaat consolidatietest vlas-PLA 40/60 met 10 bar persdruk en 200°C perstemperatuur | 15 |
| Figuur 16: Vergelijking stijfheid (a) en sterkte (b) van zelfversterkt PLA geperst op 15, 30 en 50 bar (rood: ongedroogd, groen: gedroogd); (c): gedroogd sample, (d): ongedroogd sample [6]..... | 16 |
| Figuur 17: Voorbeeld van een dubbele bandpers voor de productie van thermoplastische composieten platen [7] | 18 |
| Figuur 18: Voorbeeld van een multi-daylight pers voor de productie van thermoplastische composieten platen [11] | 18 |
| Figuur 19: Voorbeeld van een automated tape laying proces [12]..... | 20 |
| Figuur 20: Processtappen thermovormen: (a) infrarood verwarming, (b)-(c) vervormen en consolidatie, (d) ontmalling [13] | 21 |
| Figuur 21: Thermovormen met vacuümverluchting verwerkt in de mal [14] | 21 |
| Figuur 22: Productieschema van een SMC-prepreg [17]..... | 25 |
| Figuur 23: Voorbeeld van het bladder inflation moulding process..... | 26 |
| Figuur 24: Productie van een hol composiet onderdeel geproduceerd via bladder inflation moulding met gebreide en commingled garens [18]..... | 26 |
| Figuur 25: Voorbeeld van een autoclaaf [21] | 28 |
| Figuur 26: Voorbeeld van een productie-opstelling in een autoclaaf [22]..... | 28 |
| Figuur 27: Aanbevolen uithard cyclus voor vlas-epoxy tijdens autoclaafproductie [20]..... | 28 |
| Figuur 28: Aanbevolen uithard cyclus voor vlas-epoxy tijdens autoclaafproductie voor een optimale oppervlakte-afwerking [20] | 29 |
| Figuur 29: Voorbeeldschema van het filament winding proces voor thermohardende composieten [23]..... | 30 |
| Figuur 30: Voorbeeld van het pultrusieproces bij thermohardende composieten [24] | 31 |
| Figuur 31: Verschillende stappen van de productie tot een (bio)composieten product met RTM [26] | 33 |

Figuur 32: Voorbeeld van de harsinjectiefase tijdens het RTM-proces geholpen door vacuüm verluchting 34

Figuur 33: Overzicht van de verschillende stappen in het vacuüminfusie proces [27] 35

Figuur 34: Voorbeeld van de injectiefase in een vacuüminfusie proces 35

Figuur 35: Voorbeeld van de productie van een bootromp met een vacuüminfusie proces 35

Figuur 36: Opstelling bij automated fiber placement [28] 36

Figuur 37: Werking van het fused filament fabrication proces [29].....37

Figuur 38: Voorbeeld hoe het product opgebouwd wordt tijdens een hand lay-up proces [30] 38

Figuur 39: Voorbeeld van de productie bij een hand lay-up proces [31]..... 38

Figuur 40: Voorbeeldschema van het spray-up proces [32] 39

Figuur 41: Voorbeeld van het spuitgietsproces voor composieten [33] 40

Inhoudstafel

| | |
|---|----|
| Introductie..... | 5 |
| 1 Algemene aandachtspunten voor de verwerking van plantvezels | 6 |
| 1.1 Voordrogen | 6 |
| 1.2 Maximale procestemperatuur | 8 |
| 2 Consolidatie van thermoplastisch plaatmateriaal tot 2D-plaatstructuur | 8 |
| 2.1 Aanbevelingen persparameters van halffabricaat leveranciers: vlas-PP, vlas-PA11 vlas-PLA | 10 |
| 2.2 Aanbevelingen persparameters uit eigen onderzoek, hennep-PP | 12 |
| 2.2.1 Consolidatietesten hennep-PP | 12 |
| 2.2.2 Consolidatietesten vlas-PLA | 13 |
| 2.3 Aanbevelingen persen zelfversterkt PLA | 15 |
| 3 Commerciële productie van thermoplastische 2D-prepregs met dubbele bandpers en multi-daylight pers | 17 |
| 3.1 Dubbele bandpers | 17 |
| 3.2 Multi-daylight pers | 18 |
| 4 Automated tape laying | 19 |
| 5 Thermovormen & persvormen (thermoforming & compression moulding) | 20 |
| 5.1 Thermovormen (thermoplastische composieten) | 20 |
| 5.1.1 LFT (lange vezel thermoplasten) compression moulding..... | 23 |
| 5.2 Persvormen: SMC, BMC & DMC Compression moulding (thermoset) | 24 |
| 5.2.1 SMC compression moulding | 24 |
| 5.2.2 BMC & DMC compression moulding (bulk moulding compounds & Dough moulding compounds) | 25 |
| 5.3 Bladder inflation moulding | 26 |
| 5.4 Conclusie van thermovormen en persvormen | 27 |
| 6 Autoclaaf | 27 |
| 7 Filament winding | 29 |
| 8 Pultrusie..... | 30 |
| 9 RTM | 32 |
| 10 Vacuüminfusie | 34 |
| 11 Additive manufacturing (3D printing)..... | 36 |
| 12 Hand lay-up | 37 |
| 13 Spray-up | 38 |
| 14 Spuitgieten | 39 |
| Conclusie | 42 |
| Referenties | 43 |

Introductie

Bij het ontwerp van een composieten product is het belangrijk om de mogelijke productieprocessen te kennen zodat een ontwerper tijdens het productdesign rekening kan houden met de geschikte productiemethode en produceerbaarheid van een product. De typische productiemethodes van halffabricaat tot product voor conventionele composieten kunnen ook gebruikt worden voor biocomposieten. Bij de verwerking van biocomposieten komen hier nog enkele extra aandachtspunten bij.

Dit verslag overloopt de verschillende productietechnieken voor biocomposieten. Startend met de algemene aandachtspunten bij biocomposieten in Hoofdstuk 1. Vervolgens komen de methodes om plaatstructuren te produceren aan bod in Hoofdstuk 2 tot 4. Hierna overloopt dit verslag één voor één de methodes om 3D-producten te maken in Hoofdstuk 5 tot 14. Indien mogelijk worden hierbij concrete procesparameters meegegeven.

Dit verslag is een uitbreiding op Leverbaarheid 5.1.1 'Methodiek voor productie van plaatstructuren' binnen het Brepla-project en geeft een overzicht van productietechnieken voor zowel 2D- als 3D-structuren.

Het doel van dit verslag is om een algemeen beeld te geven van de vele mogelijke productietechnieken met composieten, de randvoorwaarden mee te geven van elke techniek en aan te geven waar de aandachtspunten liggen als met biocomposieten gewerkt wordt. Het verslag is deels gebaseerd op de cursusinhoud van 'Composite Manufacturing' van prof. Jan Ivens (KU Leuven, Department of Materials Engineering).

1 Algemene aandachtspunten voor de verwerking van plantvezels

Dit hoofdstuk bespreekt de algemene aandachtspunten voor de verwerking van plantvezels tegenover conventionele vezels: het voordrogen en de limitatie in de maximale verwerkingstemperatuur. Hierbij wordt de nadruk gelegd op 'plantvezels' aangezien mineraalvezels, zoals basalt, deze limitaties niet of minder strikt hebben. Vanwege een hoge smelttemperatuur van basalt wordt de procestemperatuur hierbij eerder gelimiteerd door de degradatietemperatuur van de polymeren matrix.

1.1 Voordrogen

Tijdens de verwerking van biocomposieten moet gelet worden op enkele aandachtspunten. Plantvezels hebben vaak een hydrofiële aard, dit betekent dat ze vocht kunnen absorberen uit de omgeving. Voor een optimale hechting te verkrijgen met de, vaak hydrofobe, matrix is het belangrijk om plantvezels voor te drogen alvorens dit tot geconsolideerd plaatmateriaal te verwerken. Zo zullen de mechanische eigenschappen van het eindproduct beter en consistentier zijn.

Materiaalleverancier Dehondt Composites raadt aan om vlasvezels 8 uur te laten drogen op 60 °C [1]. Vanwege het belang van het drogen van plantvezels zijn binnen het BREPLA-project ook droogtesten uitgevoerd op vlasweefsel en vlas-PLA weefsel. Figuur 1 toont de opstelling tijdens een test die start met 1365 gram vlas-PLA weefsel. De oventemperatuur bedraagt steeds 80°C en manuele metingen volgen de gewichtsevolutie op.



Figuur 1: Opstelling van het vlas-PLA weefsel tijdens een droogtest

Figuur 2 toont de gewichtsevolutie en hieruit de droogsnelheid van vlasweefsel tijdens een droogtest. Het vlasweefsel weegt bij de start van deze test 355 gram waarvan deels vocht dat opgenomen is uit de omgevingslucht. Dit vochtgehalte neemt af tijdens het drogen, de eerste uren relatief snel, maar steeds trager en trager. Deze droogtest resulteert in een gewichtsafname van 6 % na 27 uur drogen.

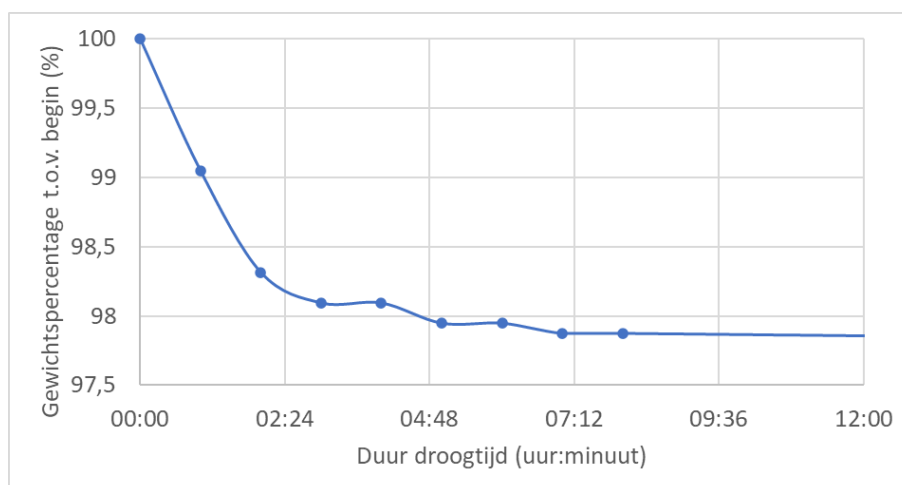
Figuur 2 toont echter dat 90% van de uiteindelijke gewichtsafname na 2 uur plaatsvindt, 95% na 3,5 uur en 99% na 6 uur.

Figuur 3 toont het gewichtsverloop tijdens de droging van vlas-PLA weefsel. Bij de start van de weging bedraagt de massa van het vlas-PLA weefsel 1365 gram. De gewichtsafname na 16 uur drogen bedraagt 30 gram of 2,2 % in totaal. Figuur 3 toont een gelijkaardig verloop als Figuur 2 met 87 % van het uiteindelijke vochtverlies dat al bereikt is na 3 uur, en 97 % na 7 uur.

De droogtesten van zowel vlas- als vlas-PLA weefsel tonen dat in deze opstelling na 3 uur drogen reeds zo'n 90% van het oorspronkelijk geabsorbeerde vocht is verdampt. Hierna neemt de effectiviteit van het drogen sterk af. Het droogproces hangt af van het materiaalvolume, de compactheid van het materiaal, de droogoven en het type materiaal in het droogproces. Hierdoor is het niet mogelijk om een droogtijd van 3 uur mee te geven als algemene richtlijn. Het gewichtsverloop zal wel steeds een gelijkaardige curve opleveren als in Figuur 2 en 3 te zien is.



Figuur 2: Gewichtsevolutie (%) vlasweefsel tijdens droging op 80°C

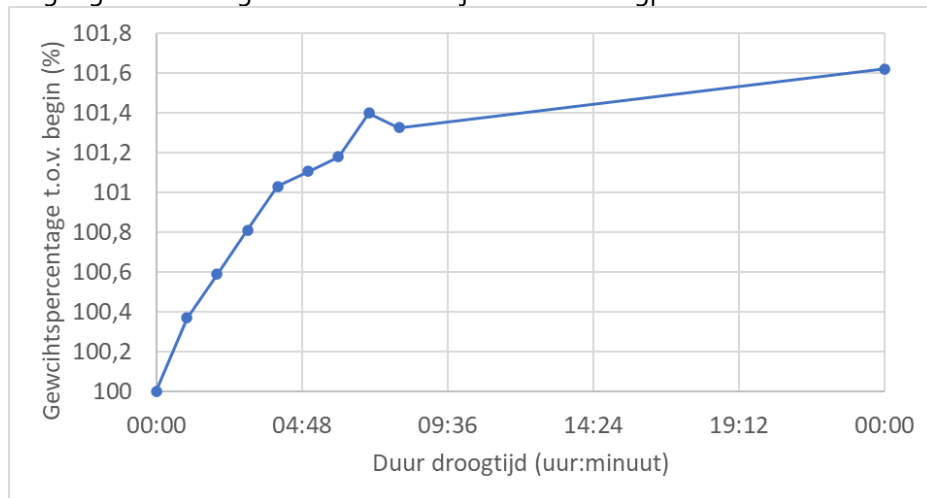


Figuur 3: Gewichtsevolutie (%) vlas-PLA weefsel tijdens droging op 80°C

Na de droogtest is voor het vlas-PLA weefsel ook de gewichtsevolutie bij blootstelling aan omgevingslucht opgemeten en weergegeven in Figuur 4. Het resultaat na 24 uur toont een totale gewichtstoename van 1,62 %. Ook in deze test is de gewichtsverandering het grootst

tijdens de eerste uren. Zo toont Figuur 4 dat 50 % van de uiteindelijke gewichtstoename reeds na 3 uur plaatsvindt, 70 % na 6 uur en 80 % na 8 uur.

Een vergelijking met de droogresultaten toont dat de gewichtsoptname in omgevingslucht trager gaat dan de gewichtsafname tijdens het droogproces.



Figuur 4: Relatieve gewichtsoptname (%) vlas-PLA weefsel na droging

1.2 Maximale procestemperatuur

Een belangrijk aandachtspunt bij de verwerking van plantvezels is de limitatie in maximale procestemperatuur. Onderzoek toont namelijk aan dat bij het overschrijden van 200°C de pectine, hemicellulose en cellulose structuren in de vezel degraderen waardoor de mechanische eigenschappen afnemen. Hierdoor wordt aangeraden om tijdens de productie van plantvezels (bv. vlas, hennep) te zorgen dat het materiaal maximaal 200°C bereikt. Voor de verwerking van basaltvezels geeft dit geen limitatie. [2]

Belangrijk is om bij de productie van een biocomposiet product naast de maximale verwerkingstemperatuur van plantvezels ook rekening te houden met de degradatietemperatuur van de polymeren matrix. Het is belangrijk om het productieproces af te stemmen op de component met de laagste degradatietemperatuur.

2 Consolidatie van thermoplastisch plaatmateriaal tot 2D-plaatstructuur

Een typisch proces voor de verwerking van droge vezels tot composieten 2D-plaatstructuur is het persproces. Dit is een batchproces dat geschikt is om vezelversterkte en zelfversterkte thermoplasten te verwerken met zowel een UD, gewoven of non-woven vezelstructuur.

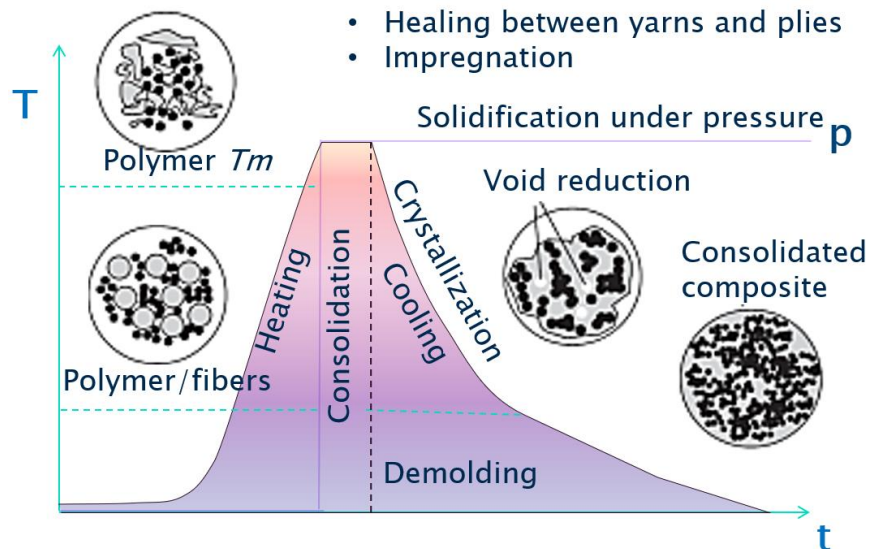
Het doel van dit consolidatieproces is om tot een volledige inmenging/impregnatie zonder luchtinsluitels te komen tussen de droge vezel en het thermoplastisch polymeer (folie, filamenten of poeder). Het polymeer moet hiervoor vloeien over een relatief grote afstand om tot een homogene vermenging met de vezel te komen.

Tijdens thermocompressie worden de vezel en matrix eerst opgewarmd, vervolgens een bepaalde tijd op hoge temperatuur en hoge druk gehouden, om als laatste stap weer af te koelen. Figuur 5 toont hoe een persproces de inmenging/impregnatie tussen vezels en

matrix bevordert tot het matrixmateriaal homogeen verdeeld is over de vezels, dit eindresultaat wordt een geconsolideerd composiet genoemd. Hierin zijn de vezels volledig geïmpregneerd met het polymeer.

De homogene verdeling van de matrix overheen de vezels is nodig zodat de spanning in het materiaal verdeeld kan worden overheen de verschillende vezels, wat de mechanische eigenschappen van het eindresultaat maximaliseert. Om een geconsolideerd geheel van goede kwaliteit te krijgen, is het belangrijk om het materiaal op te warmen zodat het thermoplastisch polymeer vloeibaar wordt. Door tegelijkertijd druk aan te leggen op het geheel kan het gesmolten polymeer zich verdelen overheen de vezels en worden luchtinsluitels uit het materiaal geperst. Wanneer het geheel vervolgens onder druk wordt afgekoeld, wordt een geconsolideerd composiet bekomen. Een geconsolideerd composiet is van goede kwaliteit bij een homogene verdeling van het polymeer overheen de vezels met een minimum aan luchtinsluitels.

- Intimate contact
- Healing between yarns and plies
- Impregnation



Figuur 5: Het consolidatieproces afgebeeld aan de hand van een temperatuur-tijd grafiek [3]

Figuur 6 toont een voorbeeld van een pers die geschikt is voor thermocompressie tot 2D-plaatmateriaal. Het opwarmen en afkoelen van vezel en matrix gebeurt typisch in de pers. Vanwege de warmteoverdracht door conductie en het opwarmen en afkoelen van de volledige pers is dit een relatief traag proces, maar noodzakelijk om een voldoende consolidatie te verkrijgen. Hoofdstuk 3 beschrijft verder hoe dit proces op commerciële schaal rendabel kan worden ingezet.



Figuur 6: Voorbeeld van een pers geschikt voor thermocompressie tot 2D-plaatmateriaal

2.1 Aanbevelingen persparameters van halffabricaat leveranciers: vlas-PP, vlas-PA11 vlas-PLA

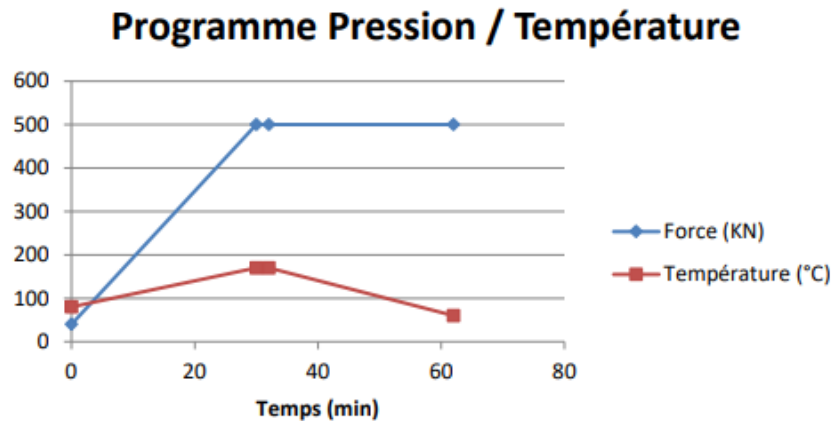
Mogelijke productiemethodes en ideale procesparameters worden soms meegegeven in de datasheet van een halffabricaat. Deze sectie vat enkele aanbevelingen samen van halffabricaat leveranciers om hun materiaal te verwerken via thermocompressie.

Dehondt Composites

Deze halffabricaat leverancier biedt weefsels en UD-materiaal aan waarbij de vlas- en thermoplastische vezels reeds met elkaar verwoven of gemengd zijn. Hierbij wordt aangeraden om het materiaal 8 uur op 60°C te laten drogen.

Figuur 7 toont de kracht-temperatuur-tijd grafiek voor thermocompressie met een vlas-PP weefsel. Dit weefsel heeft een gewicht van 500 g/m² en bevat 60 gew% vezels. In de datasheet wordt enkel de aangelegde kracht in kN beschreven. Bij het persen van halffabricaten speelt echter de aangelegde druk een rol. Omdat geen materiaaloppervlakte of persdruk wordt meegegeven geeft de datasheet op dit vlak geen reproduceerbare persparameters mee. Wel is te zien dat de aangelegde kracht stelselmatig wordt opgebouwd tot het materiaal de gewenste perstemperatuur bereikt.

Het persen op hoge temperatuur gebeurt voor dit materiaal op 170°C en duurt 2 minuten. Hiervoor en hierna wordt het materiaal opgewarmd en afgekoeld in de pers waardoor de totale cyclustijd meer dan 60 minuten inneemt. [1]

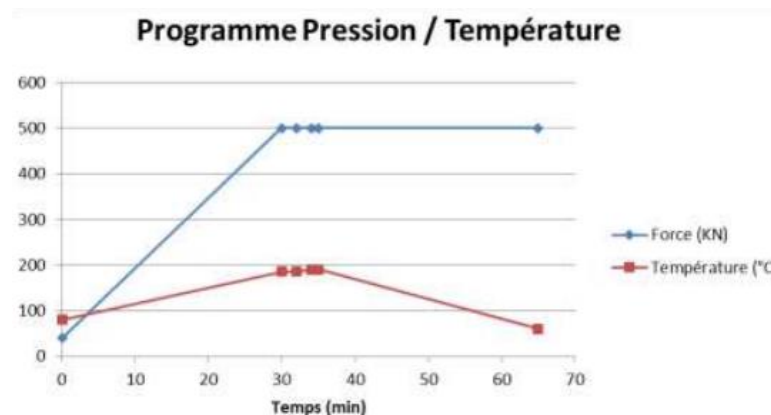


Figuur 7: Kracht-temperatuur-tijds grafiek voor thermocompressie vlas-PP door Dehondt Composites [1]

Figuur 8 toont de kracht-temperatuur-tijd grafiek voor thermocompressie van een biocomposiet uit vlasweefsel met biopolymeer PA11. De persmethode is hetzelfde als de methode die wordt aanbevolen voor het persen van vlas-PP weefsel volgens Figuur 7.

Dit weefsel heeft een gewicht van 500 g/m^2 en bevat 60 gew% vezels. Ook in deze datasheet wordt enkel de aangelegde kracht in kN beschreven, bij het persen van halffabricaten speelt echter de aangelegde druk een rol. Omdat geen materiaaloppervlakte of persdruk wordt meegegeven geeft de datasheet op dit vlak geen reproduceerbare persparameters mee. Wel is te zien dat de aangelegde kracht stelselmatig wordt opgebouwd tot het materiaal de gewenste perstemperatuur bereikt.

Het persen op hoge temperatuur gebeurt voor dit materiaal op 190°C en duurt 5 minuten. Hiervoor en hierna wordt het materiaal opgewarmd en afgekoeld in de pers waardoor de totale cyclus tijd zo'n 65 minuten inneemt. [4]



Figuur 8: Kracht-temperatuur-tijd grafiek voor thermocompressie vlas-PA11 door Dehondt Composites [4]

Scabro

Deze halffabricaat leverancier biedt vlas-PLA weefsels aan waarbij wordt aangeraden om dit materiaal op te warmen tot $180\text{-}200^\circ\text{C}$ en een druk van 1-50 bar aan te leggen. Dit materiaal kan ook verwerkt worden in een autoclaaf of met enkel een vacuümzak. [5]

2.2 Aanbevelingen persparameters uit eigen onderzoek, hennep-PP

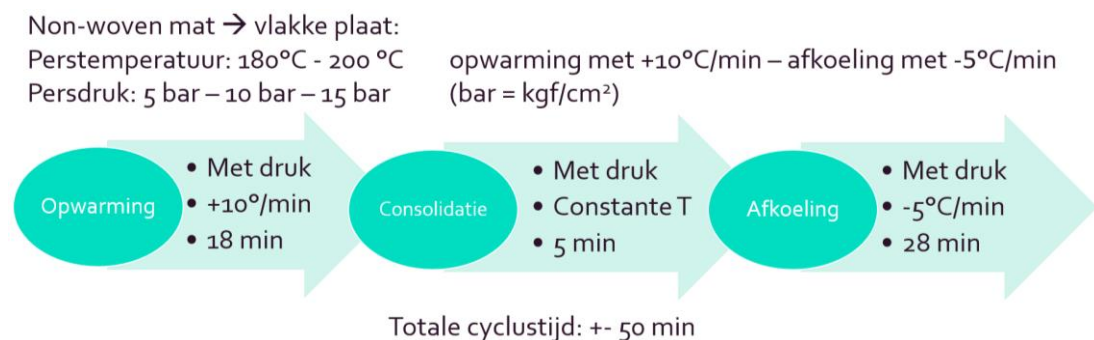
Ook binnen het BREPLA project zijn consolidatietesten met biocomposiet materiaal uitgevoerd. Hierbij zijn non-woven hennep-PP en vlas-PLA matten geperst.

2.2.1 Consolidatietesten hennep-PP

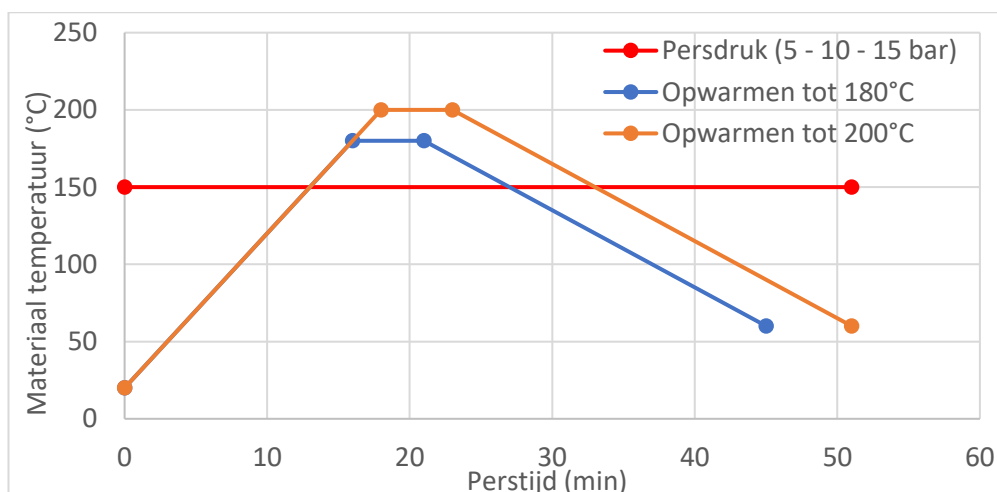
Het startmateriaal van deze testen wordt verdeeld door halffabricaat leverancier EcoTechnilin, wordt Fibriplast genoemd, heeft een non-woven vezelstructuur en heeft een gewicht van 1900 g/m² met een gewichtsverhouding van 50/50.

Dit onderzoek vergelijkt de plaatkwaliteit bij een variatie in perstemperatuur (180°C en 200°C) en een variatie in persdruk (5 bar, 10 bar en 15 bar). Hierbij wordt het materiaal opgewarmd in de pers met een opwarming van +10°C/min en afgekoeld in de pers met een afkoeling van -5°C/min. Deze waarden zijn bepaald door de limitatie in opwarm- en afkoelsnelheid van de gebruikte pers.

Figuur 9 geeft een overzicht van de gevarieerde parameters en uitgevoerde stappen in dit proces. Een tijdsindicatie wordt meegegeven voor elke stap waarbij wordt uitgegaan van een perstemperatuur van 200°C. Figuur 10 toont de druk-temperatuurs-tijd grafiek voor deze testen. De persdruk wordt aangehouden tijdens het afkoelen en opwarmen. Vanwege de hogere perstemperatuur duurt de cyclus voor 200°C 6 minuten langer (51 min) dan voor 180°C (45 min).



Figuur 9: Overzicht variatie perstemperatuur en persdruk, de verschillende processtappen en de cyclustijd voor een perstemperatuur van 200°C



Figuur 10: druk-temperatuur-tijd grafiek voor de non-woven hennep-PP testen.

Figuur 11 toont de geconsolideerde platen na de gevarieerde perscyclus. Op de geperste plaat op 180°C met 5 bar zijn verschillende droge plekken te zien waar de matrix niet homogeen is gemengd met de vezel. Droge plekken zijn ook, maar in mindere mate, te zien voor de platen geperst op 180°C – 10 bar en 200°C – 5 bar. De platen geperst op 180°C – 15 bar en 200°C – 10 bar tonen geen droge plekken en hierdoor een goede kwaliteit. Dit komt doordat de inmenging van vezel – matrix hierbij wordt bevorderd door een hogere druk of de lagere viscositeit van de matrix vanwege de hogere temperatuur. De plaat geperst op 200°C – 15 bar toont ook een goede inmenging van vezel en matrix. Hierbij is echter een uitvloeiing van de matrix uit de buitenzijden van het materiaal te zien. Het persen van non-woven hennep-PP wordt hierdoor aanbevolen bij 180°C – 15 bar of 200°C – 10 bar.



Figuur 11: Resultaten van variatie in perstemperatuur en persdruk voor non-woven hennep-PP

2.2.2 Consolidatietesten vlas-PLA





Het startmateriaal van deze testen wordt verdeeld door halffabricaat leverancier EcoTechnilin, wordt Fibriplast genoemd, heeft een non-woven vezelstructuur. Naast een variatie in procesparameters is ook het beginmateriaal gevarieerd. Zowel drie lagen 1300 gsm vlas-PLA met een gewichtsverhouding van 40/60 als twee lagen 2000 gsm vlas-PLA met 50/50 gewichtsverhouding zijn getest.

Verder zijn de consolidatie temperatuur (180°C – 200°C) en de persdruk (10 bar – 15 bar) gevarieerd. Als perscyclus is dezelfde gebruikt als beschreven in Figuur 9 en 10, opwarmen en afkoelen onder druk en 5 minuten op perstemperatuur gehouden.

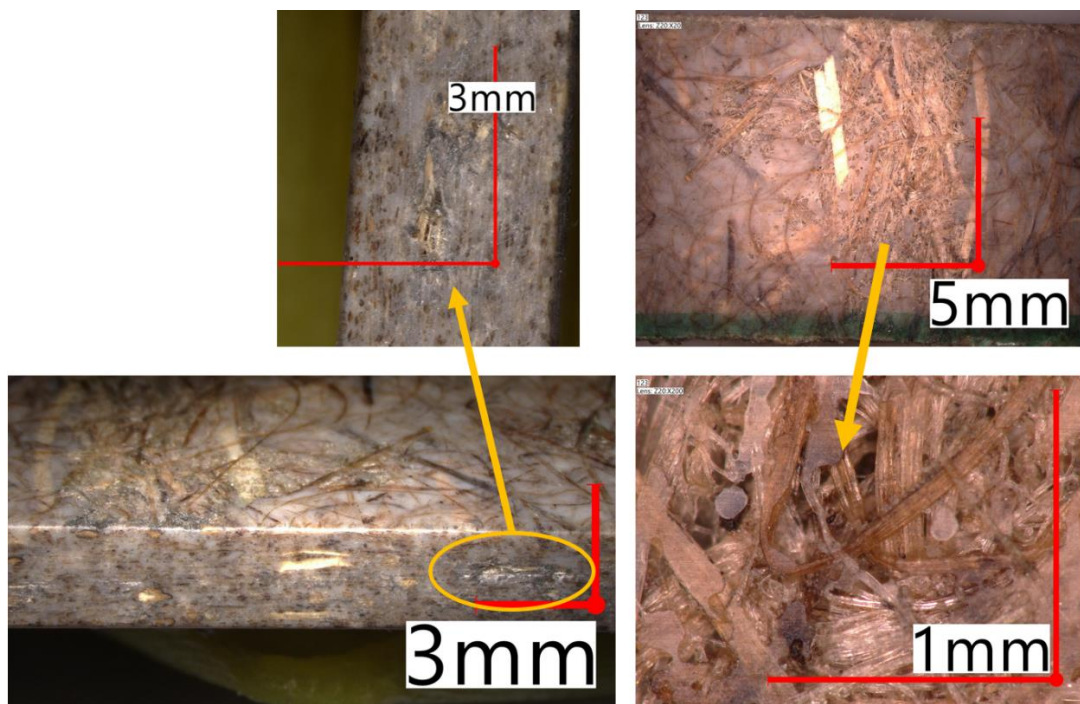
Figuur 12 geeft een beeld van de visuele verschillen tussen de platen geperst op 180°C. De plaat met 50/50 gewichtsverhouding geperst op 10 bar vertoont enkele droge plekken aan het oppervlak waar de vezels niet volledig omgeven zijn door de matrix. De plaat met dezelfde gewichtsverhouding vertoont onder een hogere druk van 15 bar geen droge plekken, hierbij zorgt de hogere druk dus zichtbaar voor een betere impregnatie van de vezel door de matrix. De platen met 40/60 gewichtsverhouding vertonen zowel bij 10 bar als bij 15 bar geen droge plekken en hiernaast ook geen andere zichtbare verschillen. Het hogere gehalte aan PLA zorgt hierbij dus ook bij 10 bar voor een betere impregnatie dan de 50/50 plaat bij deze persdruk.

Figuur 13 en 14 geven aan de hand van microscopie foto's een gedetailleerder beeld over de verschillen in inmenging van matrix en vezel tussen de samples met persdruk van 10 en 15 bar bij een 50/50 gewichtsverhouding. Figuur 13 toont dat porositeiten zich zowel aan het

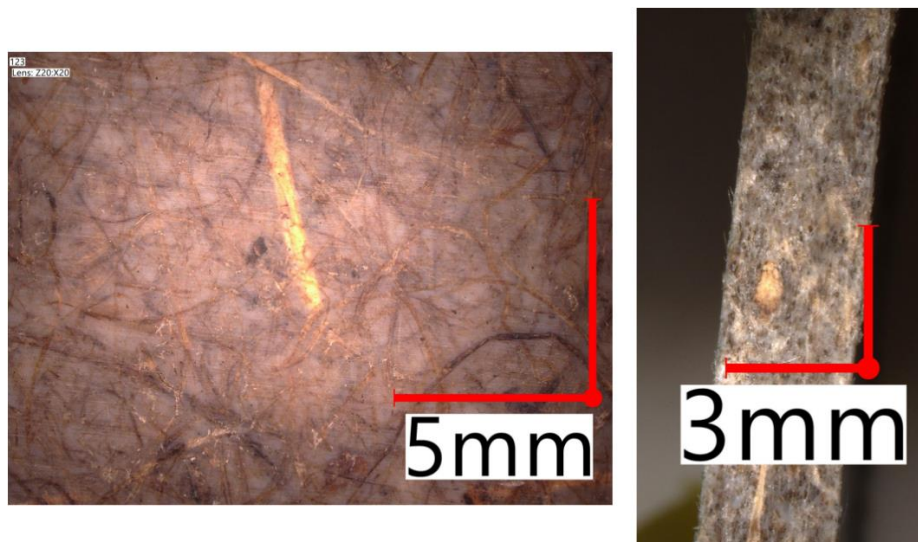
oppervlak als inwendig in het materiaal voordoen bij een persdruk van 10 bar. Deze porositeiten zijn niet te zien bij een persdruk van 15 bar.

| Persdruk verhouding vlas-PLA | 40/60 | 50/50 |
|---------------------------------|--|--|
| 10 bar |  |  |
| 15 bar |  |  |

Figuur 12: Resultaten consolidatietest op 180°C met variatie in druk en gewichtsverhouding bij non-woven vlas-PLA



Figuur 13: Microscopiefoto's van non-woven vlas-PLA 50/50 na 10 bar persdruk



Figuur 14: Microscopiefoto's van non-woven vlas-PLA 50/50 na 15 bar persdruk

Naast een perstemperatuur van 180°C is ook een perstemperatuur van 200°C getest. Bij startmateriaal van 40/60 gewichtsverhouding en met een persdruk van 10 bar is een zeer grote uitvloeit te zien. Figuur 15 toont hoe PLA vanwege de verlaagde viscositeit bij 200°C uit het sample is gevloeid. Vanwege de goede consolidatieresultaten bij 180°C en omdat 200°C de limiettemperatuur is van plantvezels, zijn in dit project na deze test geen extra consolidatietesten gebeurd op 200°C.

Na deze testen is in dit project steeds verder gewerkt met een consolidatietemperatuur van 180°C en een consolidatiedruk van 15 bar voor vlas-PLA materiaal. Naast voor een non-woven vezelstructuur, tonen testen aan dat met deze parameters ook een goede consolidatiekwaliteit bekomen wordt voor vlas-PLA weefsels.

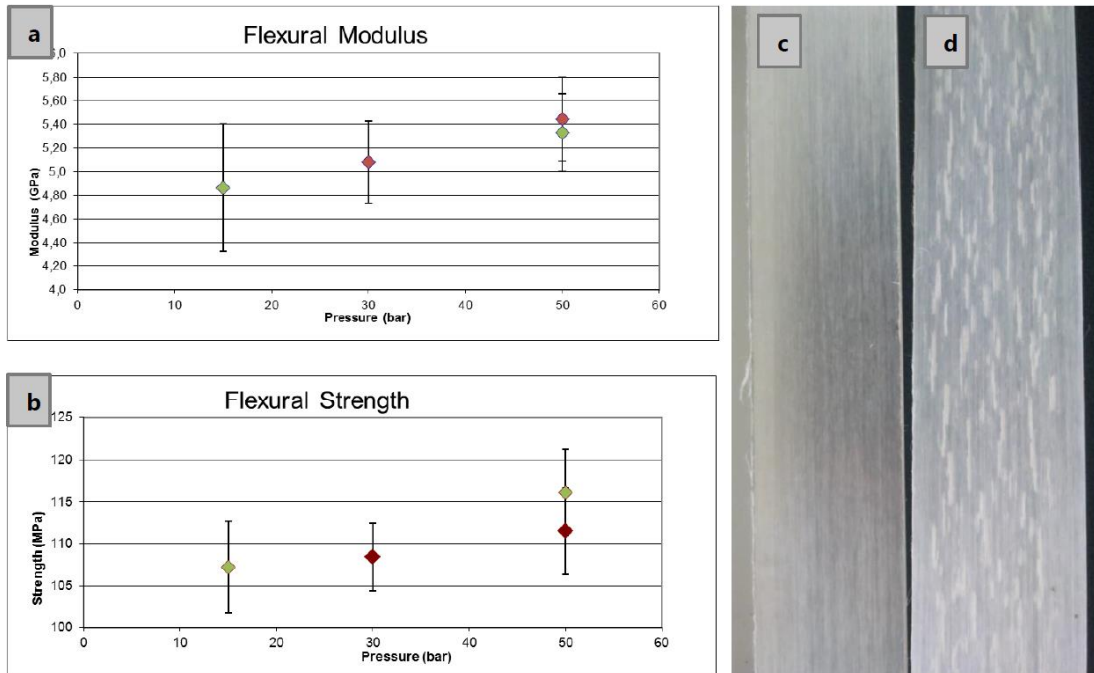


Figuur 15: Resultaat consolidatietest vlas-PLA 40/60 met 10 bar persdruk en 200°C perstemperatuur

2.3 Aanbevelingen persen zelfversterkt PLA

Naast plantvezels neemt ook biopolymeer PLA vocht op uit de omgeving. Hierdoor wordt bij het werken met zelfversterkt PLA ook aanbevolen om voor te drogen bij 80°C om hiermee de mechanische eigenschappen te maximaliseren. Eerder onderzoek uit het Bio-SRPC project, getoond in Figuur 16, toont namelijk dat in een ongedroogd materiaal tijdens het persen scheuren kunnen ontstaan parallel met de vezelrichting.

Na optimalisatie van de persparameters wordt in dit onderzoek aanbevolen om zelfversterkt PLA te persen op 160°C, 50 bar gedurende 5 minuten. Figuur 16 toont de resultaten uit dit onderzoek waaruit blijkt dat een persdruk van 50 bar de hoogste stijfheid en sterkte geeft voor zelfversterkt PLA.



Figuur 16: Vergelijking stijfheid (a) en sterkte (b) van zelfversterkt PLA geperst op 15, 30 en 50 bar (rood: ongedroogd, groen: gedroogd); (c): gedroogd sample, (d): ongedroogd sample [6]

3 Commerciële productie van thermoplastische 2D-prepregs met dubbele bandpers en multi-daylight pers

Wanneer een hoge productiesnelheid vereist is voor thermoplastische biocomposieten panelen is het mogelijk om het persen van een vlakke geconsolideerde prepreg plaat te versnellen met een dubbele bandpers of een multi-daylight pers. Buiten dat het nodig is om het halffabricaat op voorhand voor te drogen en rekening te houden met de maximale verwerkingstemperatuur van plantvezels, zijn ook deze processen gelijkaardig voor biocomposieten tegenover conventionele composieten. De procesdruk, -temperatuur en verwerkte materialen (thermoplastische composieten) zijn vergelijkbaar met een statisch persproces.

3.1 Dubbele bandpers

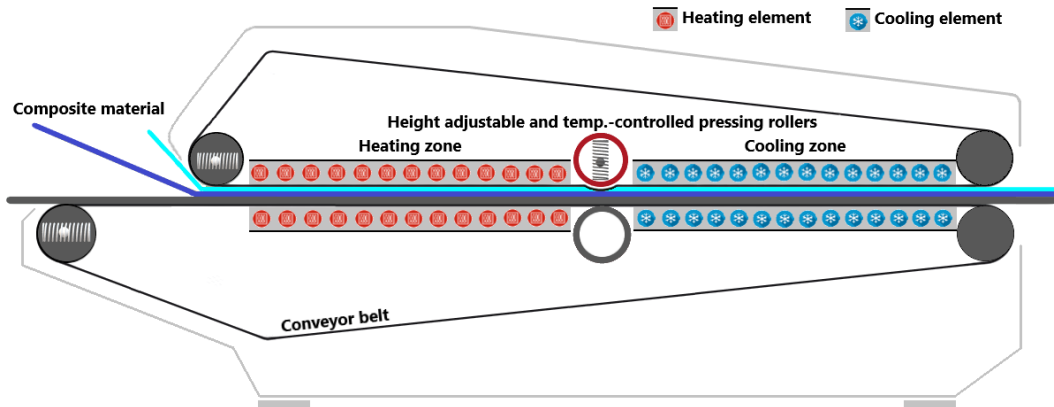
Een geschikte dubbele bandpers bestaat uit twee stalen banden en bevat verschillende verwarmings- en afkoelingszones waartussen een (bio)composieten halffabricaat kan geconsolideerd worden tot 2D-plaatmateriaal. Tussen de verwarmings- en afkoelingszone kan een persroller worden geplaatst. De pershoogte van de persroller is verstelbaar wat verschillende persdrukken en plaatdiktes mogelijk maakt. Een dubbele bandpers werkt volgens een continue systeem waardoor een hogere productie-efficiëntie mogelijk is dan bijvoorbeeld een statische pers. Figuur 17 toont een voorbeeld van een dubbele band pers. [7]

Het is essentieel dat de machine uit twee stalen rolbanden bestaat aangezien deze kunnen zorgen voor een hoge persdruk. De persdruk die kan aangelegd worden door de dubbele bandpers varieert. Zo bestaan persen die tot 20 bar kunnen gaan, maar is in andere persen een persdruk van 60 bar mogelijk. De hoge persdruk is belangrijk om luchtinluitsels te beperken en de consolidatiekwaliteit te optimaliseren. Omdat de persdruk in een dubbele bandpers gelimiteerd is tegenover de persdruk van een statische pers is de hoeveelheid luchtinluitsels typisch iets hoger en de consolidatiekwaliteit hierdoor iets lager in een dubbele bandpers. [8], [9]

De consolidatiekwaliteit hangt naast de druk ook samen met de temperatuur en de tijd op hoge temperatuur en hoge druk. Om te zorgen voor een homogene temperatuur verdeling in het materiaal wordt het materiaal langzaam opgewarmd langs verschillende verwarmingszones, wordt de gewenste druk aangelegd en wordt het materiaal vervolgens afgekoeld doorheen verschillende koelingszones. De ingestelde temperatuur is vergelijkbaar met deze in een statische pers en houdt rekening met de maximale verwerkingstemperatuur van vezel en matrix. Een procestemperatuur van 180-200 °C is typisch voor de meest voorkomende biocomposieten.

Een andere belangrijke procesparameter die ook de consolidatiekwaliteit beïnvloedt, is de bandsnelheid. Bij een te hoge bandsnelheid zal er namelijk een kwaliteitsverschil zijn tussen de buitenste en binnenste lagen die een mindere goede impregnatiekwaliteit kunnen vertonen. Onderzoek naar de verwerking met conventionele composieten toont aan dat een productiesnelheid van 0,2 m/min een eindresultaat bekomt met gelijkaardige mechanische eigenschappen als bij een statische pers. Een verhoging van de productiesnelheid zorgt in deze onderzoeken voor een daling in mechanische

eigenschappen. Voor biocomposieten is de optimale productiesnelheid mogelijk lager vanwege de maximale verwerkingstemperatuur bij plantvezels. [8], [9], [10]



Figuur 17: Voorbeeld van een dubbele bandpers voor de productie van thermoplastische composieten platen [7]

3.2 Multi-daylight pers

Ook een multi-daylight pers zorgt voor een verhoogde productie-efficiëntie bij de consolidatie van 2D-prepreg plaatmateriaal uit biocomposiet. Figuur 18 toont een voorbeeld hoe een multi-daylight pers eruit kan zien. Deze pers is vergelijkbaar met een statisch persproces aangezien het werkt volgens een batch proces met een vergelijkbare procesdruk- en temperatuur. Het voordeel van de multi-daylight pers is echter dat verschillende platen tegelijk kunnen opgewarmd, geperst en afgekoeld worden in verschillende units die ook in de hoogte verschillende platen tegelijk kan verwerken.

Volgende video's laten voorbeelden zien hoe een multi-daylight pers in de praktijk kan werken:

- https://www.youtube.com/watch?v=YRHRD_PoVho
- <https://www.youtube.com/watch?v=-67yevx5Ymo>



Figuur 18: Voorbeeld van een multi-daylight pers voor de productie van thermoplastische composieten platen [11]

4 Automated tape laying

Een andere productietechniek voor de verwerking tot 2D- en 3D-biocomposieten is automated tape laying. Figuur 19 toont een voorbeeld van een automated tape laying proces.

Buiten dat het nodig is om het halffabricaat op voorhand voor te drogen en rekening te houden met de maximale verwerkingstemperatuur van plantvezels, is ook dit proces gelijkaardig voor biocomposieten tegenover conventionele composieten.

Startmateriaal

Dit proces is zowel geschikt voor thermoplastische als voor thermohardende composieten. Hierbij wordt van een prepreg tape gestart waarbij de vezel en matrix reeds een goede inmenging hebben.

Processtappen

De machine brengt de tape rechtstreeks aan op het product en hierbij zorgt een drukroller lokaal voor een goede consolidatie. Bij thermoplastische composieten wordt de tape net voor de aanbrenging lokaal opgewarmd door bijvoorbeeld laser straling en zorgt de drukroller voor de afkoeling van het materiaal. Bij gebruik van thermohardende prepregs is na de aanbrenging van de tape steeds een uithardings-/temperatuurscyclus vereist.

Na het tape laying proces verwerkt typisch een volgende tweede processtap het materiaal tot een finaal 3D - product. Met een aangepaste automated tape laying opstelling is het echter ook mogelijk om een eenvoudige 3D – vorm met lichte kromming te produceren. Hierbij kan de machine het materiaal aanbrengen op een op maat gemaakte tegenmal met lichte kromming. Indien de geometrie te complex kan gekeken worden naar 3D-print of filament winding technieken die volgens een gelijkaardig principe werken. Deze technieken komen later aan bod in dit verslag.

Voor- & nadelen

Dit proces maakt het mogelijk om geautomatiseerd een geoptimaliseerde laagopbouw met een precieze oriëntatie en consistentie te produceren. De productiesnelheid is hoger dan 3D-printing, maar lager dan bijvoorbeeld het dubbele bandproces. Een nadeel van dit proces is de relatief hoge materiaalkost omdat dit proces start met een prepreg tape van hoge kwaliteit. Hierdoor wordt dit proces vooral als tussenstap gebruikt voor high-end toepassingen.



Figuur 19: Voorbeeld van een automated tape laying proces [12]

5 Thermovormen & persvormen (thermoforming & compression moulding)

Een veelgebruikte methode om composieten te verwerken tot een product is het persproces. Een persproces kan zowel ingezet worden om thermohardende composieten en thermoplastische composieten te verwerken. Ook kunnen zowel continue UD vezels, geweven vezels, non-wovens of compounds met vezels op cm – mm lengte verwerkt worden met een persproces.

Vanwege de verschillende variaties in perstechnieken is dit hoofdstuk opgedeeld in thermovormen/persvormen voor thermoplastische composieten (5.1) en persvormen voor thermohardende composieten (5.2).

5.1 Thermovormen (thermoplastische composieten)

Vanwege de mogelijkheid van het heropsmelten van thermoplastische composieten kunnen deze materiaal vervormd worden na opwarming en aanbrenging van druk. Dit proces wordt thermovormen, persvormen of thermocompressie genoemd.

Startmateriaal

Het thermovormproces start steeds van een materiaal waarbij een thermoplastisch polymeer reeds is voorgemengd met de versterkende vezels. Dit kan in volledig geconsolideerde prepreg vorm zijn (zoals beschreven in Hoofdstuk 2 en 3) of kan ook in vezelformaat zijn (non-woven mat of garens waarin zowel versterkende als thermoplastische vezels met elkaar vermengd zijn).

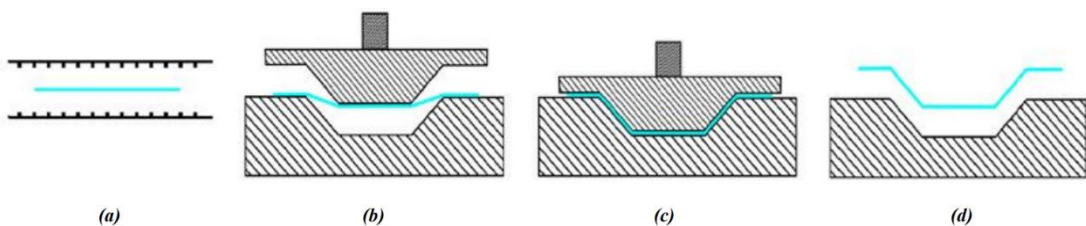
Tijdens dit vormproces is het moeilijk om het startmateriaal nog van materiaalstructuur te veranderen. Om tot een volledig dense materiaalstructuur in een 3D-product te komen moet namelijk ook gestart worden met volledig dens prepreg materiaal waarvan in

Hoofdstuk 2 en 3 de productiemethode staat uitgelegd. Indien, bijvoorbeeld bij het gebruik van een non-woven mat, porositeiten vereist zijn in het eindproduct, is het mogelijk om zonder het voorconsolidatieproces te werken.

Zowel UD-vezels, een geweven structuur of random georiënteerde korte vezels kunnen verwerkt worden door het thermovorm proces. De vezellengte bepaalt de materiaaleigenschappen, vanwege de mogelijkheid om verschillende vezellengtes te verwerken is er ook een brede spreiding in de mechanische materiaaleigenschappen die bekomen kunnen worden.

Processtappen

Figuur 20 toont de standaard werking van een thermovorm proces: het sheetmateriaal opwarmen, vervormen onder druk, weer afkoelen (al dan niet met het aanhouden van druk) en ontmallen. De vervormingsstap kan met een enkele of dubbele mal werken waarbij het materiaal wordt vervormd onder een mechanische drukkracht, vacuümdruk, luchtdruk, waterdruk of een combinatie hiertussen. Zo toont Figuur 21 hoe vacuüm verluchting in de mal verwerkt kan worden om te vermeiden dat lucht ingesloten geraakt tijdens de malsluiting.



Figuur 20: Processtappen thermovormen: (a) infrarood verwarming, (b)-(c) vervormen en consolidatie, (d) ontmalling [13]



Figuur 21: Thermovormen met vacuümverluchting verwerkt in de mal [14]

Volgende paragrafen geven meer info over hoe een thermovormproces in het algemeen wordt opgebouwd:

- Opwarming
- Verplaatsing
- Vervorming
- Afkoeling
- Ontmalling
- Randafwerking

- **Opwarming**

Het opwarmproces kan zowel via warmteconductie, convectie verwarming of via infrarood stralen gebeuren. Voor dunne platen wordt typisch infrarood verwarming gebruikt, voor dikke of poreuze materialen kan convectie verwarming via een oven voordeliger zijn.

Voor niet-vezelversterkte, amorfe kunststoffen volstaat het om te verwarmen boven de glastransitietemperatuur. Indien er versterkende vezels in het materiaal aanwezig zijn, is het noodzakelijk om op te warmen boven het smeltpunt van het polymeer, zodat de vezels tijdens vervorming vrij over elkaar kunnen bewegen en geen spanning veroorzaken in het materiaal. Hierbij is het belangrijk dat de opwarmtemperatuur lager is dan de degradatietemperatuur van het polymeer en de degradatietemperatuur van de vezels niet overschrijdt (200°C bij plantvezels). Hierdoor worden bij het gebruik van plantvezels eerder laagsmeltende polymeren gebruikt.

- **Verplaatsing**

Tijdens het uitdenken van het productieproces is het belangrijk om na te denken over hoe het materiaal verplaatst gaat worden. De verplaatsing van het materiaal kan bijvoorbeeld gebeuren via een lopende band, door vacuüm zuignappen, manueel of door het plaatmateriaal in te klemmen in een kader. Naast het verplaatsen kan een klemsysteem ook helpen het materiaal op spanning te houden tijdens het vervormproces en zo de begeleiding bij het glijden in de mal om kreuking en beschadiging te voorkomen.

- **Vervorming**

Eenmaal het materiaal is voorverwarmd op de gewenste temperatuur wordt het verplaatst naar de mal. De mal kan gemaakt worden uit aluminium, staal of composiet afhankelijk van de druk, gewenste levensduur, nodige abrasieweerstand en de nodige temperatuur weerstand. Vervolgens kan het materiaal vervormd worden door een vacuüm, luchtdruk, mechanische kracht of een combinatie hiervan aan te brengen.

Afhankelijk van het startmateriaal, de opwarmtemperatuur en de beoogde geometrie worden drukken van 1 tot 100 bar gebruikt tijdens het thermovormen. Hiernaast is het belangrijk om te overzien hoe de lucht uit de mal gaat bewegen. Afhankelijk van de malgeometrie kan het risico van luchtinsluiting zich voordoen, bij dit risico kan het interessant zijn om ventilatiegaten in de mal te voorzien. Thermovorm processen die enkel gebruik maken van vacuüm of luchtdruk worden regelmatig gebruikt voor polymeren, voor biocomposieten is het belangrijk om hierbij rekening te houden met een lagere reuklimiet en de mogelijke creatie van porositeiten tijdens het vervormproces onder lage druk.

Ook een alternatieve productiemethode vergelijkbaar met de verwerking van GMT (glass mat thermoplast) kan gehanteerd worden. Na opwarming worden hierbij verschillende stukken materiaal volgens een vooropgesteld patroon in de pers geplaatst zonder inklemming. Het materiaal wordt vervolgens geperst tussen een dubbele mal onder hoge druk (50 - 300 bar). De mal wordt hierbij voorverwarmd, maar blijft onder de Tg-temperatuur. Bij een goede optimalisatie van de materiaalplaatsing in de mal is maar een zeer kleine matrix flash te zien na dit proces. Dit zorgt voor minder randafwerking en productie-afval.

Belangrijke factoren tijdens het vervormproces zijn vervormingssnelheid, maltemperatuur, luchtevacuatie en temperatuurverdeling in de platen. Het materiaal mag niet te snel afkoelen tijdens het vervormproces. Hierdoor is het belangrijk om de vervormingssnelheid hoog te houden (typisch rond 30-50 mm/sec), maar ook niet te hoog zodat het materiaal de tijd krijgt om te vervormen. De mal kan ook opgewarmd worden (tot bijvoorbeeld 80 °C) om het materiaal minder snel te laten afkoelen.

- **Afkoeling**

Koeling gebeurt steeds in de mal en onder druk. Door het afkoelen wordt het materiaal in zijn nieuwe vorm gehouden, de druk zorgt voor een hoge oppervlaktekwaliteit en dat eventuele porositeiten die tijdens het vervormproces zijn ontstaan weer verdwijnen. De afkoeltijd hangt af van het materiaal, de materiaaldikte en de malgeometrie. Bij een snel proces en veel herhalingen is het belangrijk om ook een temperatuurregeling op de mal te voorzien zodat deze temperatuur en hierdoor ook de kwaliteit van het eindproduct constant blijft.

- **Randafwerking**

Na de ontmalling is randafwerking steeds vereist tijdens het thermovormproces. Een klemsysteem zorgt typisch voor een product van hogere kwaliteit, maar geeft ook steeds extra randmateriaal met zich mee. Voor biocomposieten kunnen zowel conventionele mechanische randafwerkingstechnieken gebruikt worden als, bij een juiste afstelling, ook technieken zoals waterjet en laser cutting. [15], [16]

Voordelen & nadelen

Het belangrijkste voordeel van het thermovormproces tegenover andere biocomposiet 3D-productieprocessen is het mogelijk maken van een korte procescyclustijd, wat hoge productie volumes toelaat. Hiernaast zijn de consistente productiekwaliteit, de robuustheid van het proces en de over het algemeen weinig manuele handelingen die nodig zijn ook interessante voordelen. Verder zorgt de mogelijkheid om verschillende vezellengtes te kunnen verwerken ook voor een brede spreiding in mogelijke mechanische eigenschappen.

Met het thermovorm proces kunnen relatief grote structuren gevormd worden. De limiet in de grootte is afhankelijk van de mogelijkheid om het startmateriaal homogeen op te warmen, snel te kunnen verplaatsen naar de mal en het verder onder een vacuüm, mechanische druk of luchtdruk te kunnen vervormen. De investering in een pers wordt vanaf een bepaalde oppervlakte te groot om een rendabel product te kunnen produceren met dit proces.

Een belangrijk nadeel is de randafwerking die steeds nodig is en ook voor productie-afval zorgt. Ook is het in het algemeen thermovormproces niet mogelijk om inserts in te bouwen in de mal waardoor op een andere manier gewerkt moet worden om het gevormde materiaal te verwerken tot een finaal product.

5.1.1 LFT (lange vezel thermoplasten) compression moulding

Een andere vorm van het persvormen met thermoplastische composieten is LFT compression moulding. Hierbij wordt gestart met een extrusie proces waarbij het uitgangsmateriaal als deeg vervolgens in de gewenste vorm wordt geperst. De naam LFT

('Long Fibre Thermoplastics' - lange vezel thermoplast) verwijst naar het extrusie proces dat is aangepast om de vezel zo lang mogelijk te houden gedurende het proces. Hierbij start het LFT-proces van een compound waarbij de vezels bij de compound worden gebracht net voor het einde van een extruder (direct LFT) of in een tweede extruder (indirect LFT) zodat de vezellengte zo lang mogelijk blijft. Zo worden compounds bereikt met een vezellengte van 10-25 mm. Anders is het eerder 1,8 mm. Dezelfde compounds kunnen ook gebruikt worden voor LFT injection moulding (spuitgieten).

Voordelen

- Hoge productiesnelheid
- Hoge robuustheid van het proces
- Weinig manuele handelingen vereist
- Relatief lage materiaalkost
- Inserts zijn mogelijk
- Complexe geometrieën zijn mogelijk

Nadelen

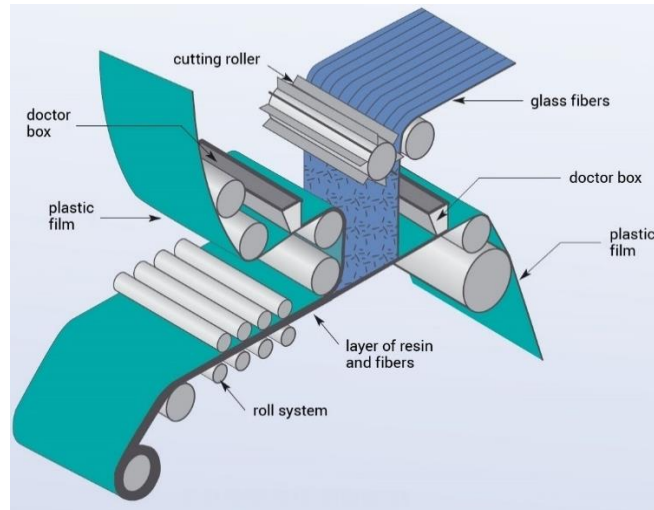
- Relatief lage mechanische eigenschappen tegenover composietprocessen met langere vezels
- Hoge malkosten vanwege hoge abrasieresistentie die vereist is
- Productgrootte is beperkt

5.2 Persvormen: SMC, BMC & DMC Compression moulding (thermoset)

Ook voor thermohardende harsen bestaan verschillende persprocessen die onderling verschillen en geoptimaliseerd zijn afhankelijk van het uitgangsmateriaal. Zo start het SMC (sheet moulding compound) proces steeds van random georiënteerde vezels die samengebracht zijn met een matrix tot plaatvorm wat vervolgens kan geperst en uitgehard kan worden onder hoge temperatuur en druk tot een 3D-vorm. Hiernaast werkt het BMC-proces met een compound en combinatie van het extrusie en spuitgiet proces. Verder verwerkt het DMC-proces compound materiaal rechtstreeks in een pers. Deze sectie beschrijft deze processen meer in detail.

5.2.1 SMC compression moulding

De vezels zijn typisch random en kort, maar kunnen ook in bepaalde gevallen continue zijn. Als eerste processtap wordt prepreg sheet materiaal gemaakt. Figuur 22 toont hoe een SMC-prepreg typisch geproduceerd wordt. Dit is een continue proces waarbij het hars als dunne laag wordt verspreid over een plastic film, vervolgens wordt een glasvezel mat hieraan toegevoegd om hierna de tweede film met hars toe te voegen. Compressierollen zorgen voor de compactheid en impregnatiekwaliteit van dit geheel. Het is mogelijk om naast hars en vezels ook vulmiddelen en additieven toe te voegen. Typisch worden korte vezels gebruikt (25 – 50 mm), al is het ook mogelijk om te werken met continue vezels. Het gebruik van polyëster en vinylester harsen is typisch voor dit proces. [17]



Figuur 22: Productieschema van een SMC-prepreg [17]

Om de finale 3D-vorm te maken, worden de sheets op een warme mal in een pers gelegd die onder hoge druk sluit en het materiaal uithard. Het uitharden duurt zo'n 30 tot 150 seconden afhankelijk van de materiaaldikte. De druk varieert tussen 50 en 100 bar. Bij het sluiten van de mal is het materiaal nog viskeus en kan het vloeien in de mal wat inserts en relatief complexe geometrieën mogelijk maakt (dikte veranderingen, ribben, ...). Om te zorgen dat het materiaal op tijd stopt met vloeien wordt steeds met een afschuivingsrand (shear edge) gewerkt, dit is een verdunning van de malopening aan de rand die toelaat dat lucht de mal verlaat maar het viskeuze composietmengsel niet. Hierdoor kan de druk opgebouwd worden. De shear edge zorgt dat steeds een kleine randafwerking vereist is.

SMC producten worden typisch gebruikt in constructie, elektriciteit en automotive toepassingen.

Voordelen:

- Design vrijheid
- Korte productie cyclus
- Hoge robuustheid van het proces
- Inserts zijn mogelijk
- Relatief goedkoop startmateriaal
- Weinig manuele handelingen vereist

Nadelen:

- Dure mal nodig met hoge abrasieweerstand
- Productgrootte is beperkt wegens hoge drukken in de pers.
- Gebruik van niet-bioharsen

5.2.2 BMC & DMC compression moulding (bulk moulding compounds & Dough moulding compounds)

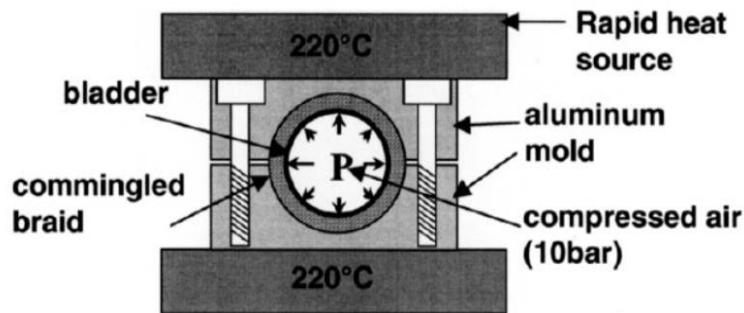
Anders dan het plaatvormig startmateriaal starten het BMC - en DMC-proces met een extrusiestap. Zo wordt in het BMC-proces de compound eerst verwerkt door de extrusie machine om het vervolgens met een perssysteem in de mal te persen vergelijkbaar met het spuitgietproces. De vezels in het finale product zijn zeer kort (< 25 mm) met een lage vezelvolumefractie en de abrasieweerstand van de mal moet zeer hoog zijn. Voordelen

hierbij zijn dat complexe geometrieën en inserts mogelijk zijn, met een lage nabewerkingsgraad.

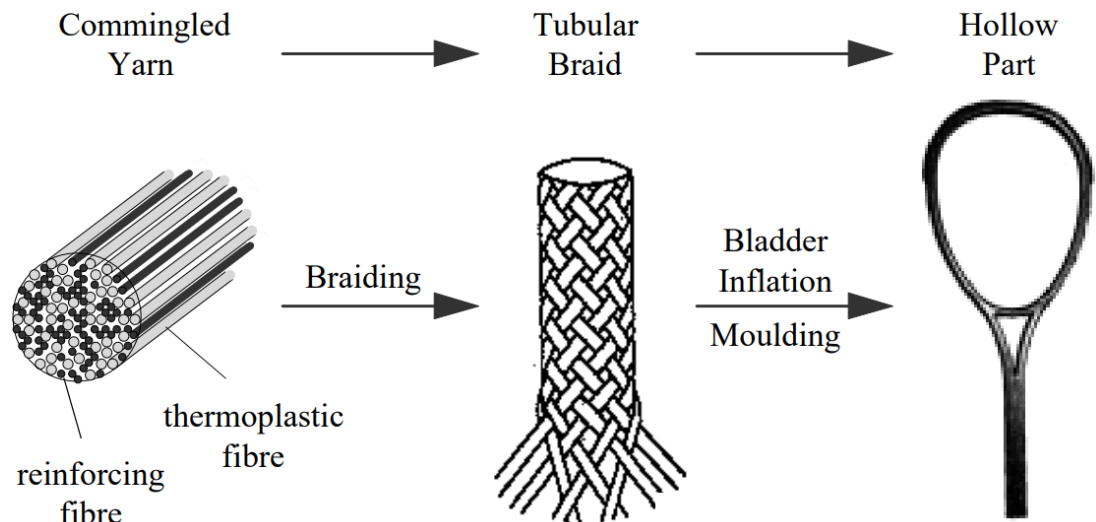
Het DMC-proces maakt geen gebruik van een extrusie machine. Na het mengen van vezels en hars in een mengmachine gaat de viskeuze composiet deeg rechtstreeks naar de pers. De uitdaging bij dit proces is om plaatsing van het materiaal in de mal goed te controleren en het proces hierbij robuust te maken.

5.3 Bladder inflation moulding

Een specifieke productie techniek die gebruik maakt van het aanbrengen van luchtdruk bij het creëren van een holle structuur is bladdermoulding. Hierbij wordt het materiaal vooraf in twee malhelften geplaatst en sluit vervolgens deze mal met in het midden een ballon (bladder). Vervolgens wordt het geheel opgewarmd en wordt via de ballon inwendig druk aangebracht aan het geheel. Figuur 23 toont een voorbeeld van de werking van dit proces. Deze techniek maakt vooral gebruik van thermohardende prepregs, al is het ook mogelijk om een gebreide structuur met garens die commingled zijn te gebruiken. Figuur 24 toont hiervan een voorbeeld.



Figuur 23: Voorbeeld van het bladder inflation moulding proces



Figuur 24: Productie van een hol composiet onderdeel geproduceerd via bladder inflation moulding met gebreide en commingled garens [18]

5.4 Conclusie van thermovormen en persvormen

Dit hoofdstuk toont dat thermovormen en persvormen veel mogelijkheden bieden. Zo zorgen verschillende procestypes en een variatie aan mogelijke startmaterialen voor verschillende product geometrieën met een grote range aan eindeigenschappen en kost. De mechanische eigenschappen van het eindproduct heeft een verband met de vezellengte. Over het algemeen kan gesteld worden dat bij continue vezels en dus hoge mechanische eigenschappen de mogelijke productgeometrie eenvoudiger is de toevoeging van inserts in het proces niet mogelijk is. Het gebruik van korte vezels zorgt voor mindere mechanische eigenschappen maar laat over het algemeen wel materiaalvloeitoe in het proces wat complexere geometrieën en de integratie van inserts wel mogelijk maakt.

Algemene voordelen van persprocessen zijn de korte cyclustijden, weinig manuele handelingen en de goede oppervlakte kwaliteit (vaak aan beide oppervlakken). Algemene nadelen is de investering in een hydraulische pers, de vaak dure mallen, beperkte productgrootte en de meestal nodige randafwerking.

6 Autoclaaf

Een andere productietechniek die mogelijk is voor de verwerking tot 3D biocomposieten is de productie met een autoclaaf. Buiten dat het nodig is om het halffabricaat op voorhand voor te drogen en rekening te houden met de maximale verwerkingstemperatuur van plantvezels, is ook dit proces gelijkaardig voor biocomposieten tegenover conventionele composieten.

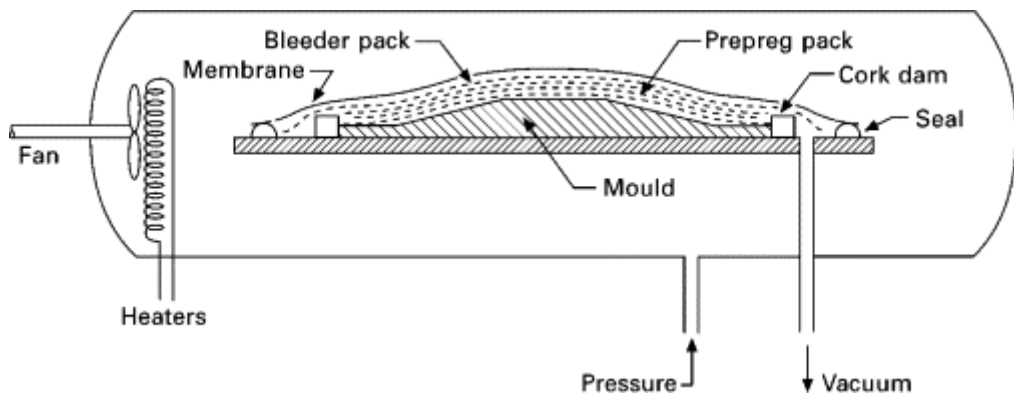
Dit proces is in de markt gangbaar voor (bio)composieten met een thermohardend hars, maar het kan mits kleine aanpassingen ook gebruikt worden voor een thermoplastische matrix. De autoclaaf zelf is een ruimte waar de temperatuur en druk kan verhoogd worden. Figuur 25 toont een voorbeeld van een autoclaaf. Een autoclaaf bestaat in verschillende groottes.

Het proces start typisch met thermohardende prepregs als startmateriaal waar de vezel reeds vermengd is met de matrix. Tijdens een laminatieproces wordt dit materiaal laag voor laag op een plaat (2D) of mal (3D) geplaatst in de gewenste oriëntatie en lay-up en omhuld door een vacuümzak. Vervolgens wordt deze volledige opstelling in een autoclaaf gelegd en wordt het geheel opgewarmd, op hoge temperatuur gehouden en afgekoeld. In de autoclaaf wordt langs de buitenkant van het product nog een extra druk naast de vacuümdruk aangelegd. Figuur 26 toont een voorbeeld van een productie-opstelling in een autoclaaf.

Autoclaafproductie maakt de beste mechanische eigenschappen met hoge vezelvolumefractie mogelijk voor (bio)composieten. Belangrijke nadelen zijn echter de hoge kostprijs van de installatie en lange cyclustijden door bijvoorbeeld een stijging en daling in temperatuur van 1-2 °C/min [19], [20]. In een alternatief proces kan een prepreg lay-up ook met een vacuümzak in een oven worden uitgehard zonder additionele druk. De oppervlaktekwaliteit en mechanische eigenschappen nemen hierbij af, maar de prijs van de procesinfrastructuur neemt wel af.

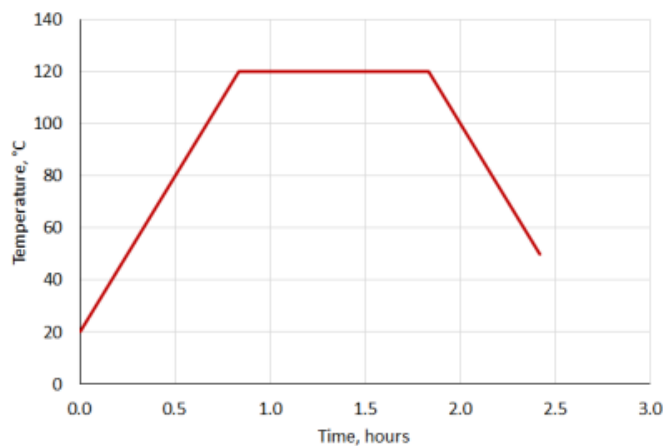


Figuur 25: Voorbeeld van een autoclaaf [21]

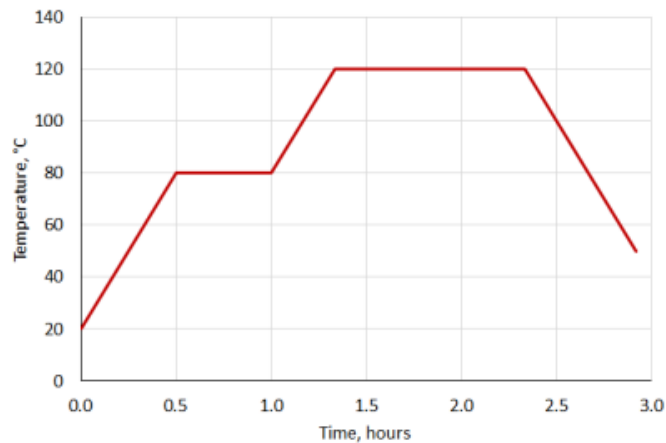


Figuur 26: Voorbeeld van een productie-opstelling in een autoclaaf [22]

Halffabricaat leverancier Composites Evolution beveelt in de datasheet voor het vlas-epoxy prepreg materiaal twee procescycli aan in de autoclaaf. Figuur 27 en 28 tonen de temperatuur-tijd cycli van deze twee voorbeelden. Hierbij wordt een opwarm- en afkoelnelheid van 2 °C/min gehanteerd en wordt het biocomposiet 1 uur op een uithardtemperatuur van 120°C gehouden. Figuur 28 toont een alternatieve cyclus waarbij het sample tijdens de opwarmfase tussendoor 30 minuten op 80°C wordt gehouden om een betere oppervlakte-afwerking te krijgen als eindresultaat.



Figuur 27: Aanbevolen uithard cyclus voor vlas-epoxy tijdens autoclaafproductie [20]



Figuur 28: Aanbevolen uithard cyclus voor vlas-epoxy tijdens autoclaafproductie voor een optimale oppervlakte-afwerking [20]

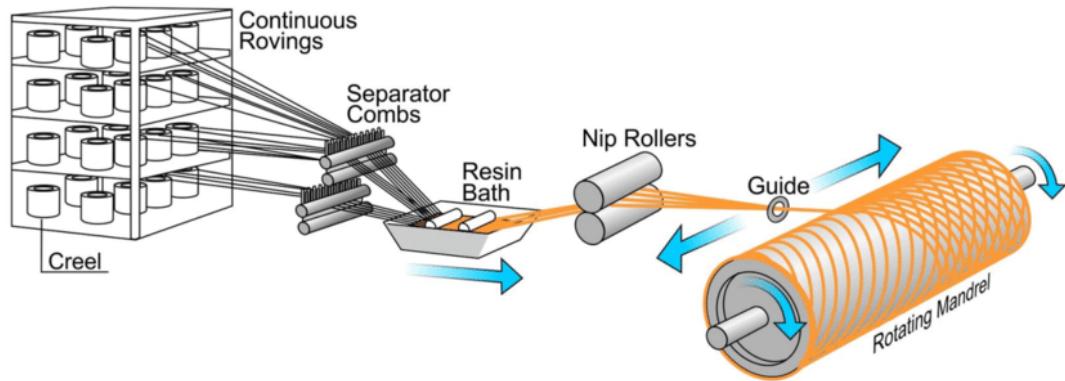
7 Filament winding

Filament winding is een wikkeltechniek waarbij continue vezel filamenten worden aangebracht op een roterende mal om zo tot een cilindrische 3D-structuur te komen. Dit gebeurt onder spanning waardoor de filamenten een voldoende hoge treksterkte moeten hebben. Dit is een uitdaging voor garens gemaakt uit plantvezels, maar wanneer de nodige trekspanning tijdens het proces afgestemd is op de treksterkte van de filamenten is dit in principe wel mogelijk. Producten die gemaakt worden met een filament winding proces zijn typisch axi-symmetrisch. De productgrootte kan variëren van kleine tot grote onderdelen. Voorbeeldproducten die met een filament winding proces kunnen geproduceerd worden zijn: een golfstick, pijpleiding, drukvaten en silo's.

Filament winding is een techniek die zowel bij thermoplastische composieten als bij thermohardende composieten voorkomt. Hierbij is de voorwaarde dat het polymeer voor de aanbrenging aan de mal al met de vezels is vermengd. Figuur 29 beschrijft het filament winding proces voor thermohardende composieten. Verschillende vezeldraden worden hierbij langs elkaar geïmpregneerd in een harsbad, met een lage viscositeitshars, waarna de menging tussen hars en vezel verbetert door compressierollers en een geleidingssysteem zorgt voor de juiste vezeloriëntatie op de roterende mal. De roterende mal zorgt dat er steeds spanning aanwezig is in de vezels wat de vezelvolumefractie en consolidatiekwaliteit van het eindproduct verhoogt.

Na de aanbrenging van de vezels en het hars hardt het geheel uit onder omgevingstemperatuur of in een oven. Eenmaal uitgehard kan het scheiden van de mal en de composieten structuur op verschillende manieren gebeuren:

- De mal blijft deel van de structuur en wordt niet gescheiden van de composietlagen
- Bij beperkte afmetingen en met een eventuele taper hoek in de mal verwerkt kan de composieten structuur van de mal worden geschoven
- De mal kan ontworpen worden om in te klappen
- Scheiding via het laten leeglopen van een opblaasbare mal
- Scheiding door een afbreekbare mal te gebruiken
- Scheiding door met een smeltbare mal te werken



Figuur 29: Voorbeeldschema van het filament winding proces voor thermohardende composieten [23]

Het filament winding proces is typisch zeer geautomatiseerd met veel gebruik van robots. Procesparameters die om te optimaliseren zijn:

- Garentype
- Aantal garens dat tegelijk wordt aangebracht
- Spanning in de garens
- Aantal lagen
- Windingshoeken
- Gebruik van het kortste pat (geodesic path) of een meer geoptimaliseerd vezeloriëntatie (semi-geodesic path)
- Winding snelheid
- Maltemperatuur

Verschillende software programma's zijn beschikbaar om de procesparameters en het design patroon te optimaliseren.

8 Pultrusie

Het pultrusieproces maakt het mogelijk om in een continue productielijn rechte producten te produceren met een constante doorsnede. Voorbeeldproducten die met een pultrusieproces gemaakt worden zijn profielen, buizen, balken en stangen. Hierbij trekt een trekunit, die op het einde van de pultrusie opstelling staat, het materiaal doorheen de volledige opstelling. Hiervoor is het belangrijk dat de treksterkte van de gebruikte garens is afgestemd op het product en de productievereisten. Dit zorgt voor extra aandachtspunten om plantvezels te gebruiken met deze methode. Ondanks deze aandachtspunten is het wel mogelijk om plantvezels met een voldoende hoge treksterkte te verwerken met deze productietechniek.

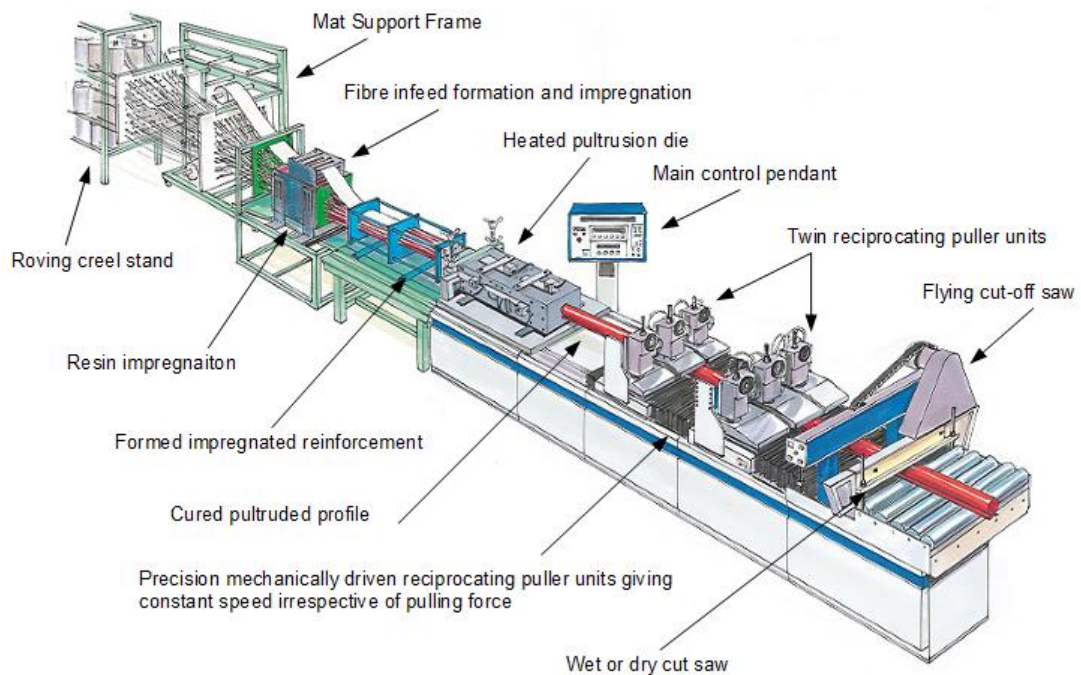
Het pultrusieproces laat toe om zowel thermoplastische als thermohardende composietproducten te maken. Figuur 30 toont een voorbeeldopstelling van een pultrusielijn die geschikt is voor het maken van thermohardende composieten. Als eerste stap worden de garens van een bobijn gewikkeld en brengt een geleidingsysteem de vezels naar een vorm geschikt voor de volgende stappen en die uiteindelijk ook de geleiding in de mal zal bevorderen. Om de krachten doorheen het proces te beperken is het belangrijk dat deze geleiding met zo weinig mogelijk wrijving gebeurt. Bij thermohardende composieten kan het hars binnenin de mal geïnjecteerd worden of worden de garens door een harsbad geleid waarna het overtollige hars uit de vezels wordt verwijderd. Bij thermoplastische

garens is geen harsbad aanwezig, wel zorgt bij deze garens een oven voor het voorverwarmen van de vezels (via IR-straling of convectie verwarming). Hierbij worden de garens eventueel langs verwarmde rollen gespannen om al een voorconsolidatie te bekomen. Ook thermohardende composieten worden soms voorverwarmd om het proces te versnellen.

Verder wordt het materiaal in de verwarmde mal geleid. In de mal harden de thermohardende composieten volledig uit en wordt een optimale consolidatie bekomen bij thermoplastische composieten. In het laatste deel van de mal wordt typisch ook een afkoel zone voorzien. Bij thermohardende composieten zorgt een oven in sommige gevallen nog na de mal voor het verdere uitharden van het materiaal.

Een trekunit is de drijvende kracht die het proces opgang houdt en zorgt voor een beperkende factor als de wrijvingskrachten toenemen. Een langere matrijs, een grotere productdoorsnede of een verhoging in processnelheid zorgen steeds dat de trekkracht moet toenemen wat niet altijd haalbaar is.

Als laatste stap van dit pultrusieproces wordt het product op de gewenste lengte gesneden in een snijunit.



Figuur 30: Voorbeeld van het pultrusieproces bij thermohardende composieten [24]

De productiesnelheid is afhankelijk van het startmateriaal. Voor thermoplastische commingled garens wordt typisch een processnelheid van 0,5 - 1 m/min gehanteerd. Bij gebruik van thermoplastische prepreg tapes is een verhoging van deze snelheid tot 10 m/min mogelijk. Voor thermohardende pultrusieproductie wordt typisch zonder voorverwarming een snelheid van zo'n 0,6 m/min en met voorverwarming een snelheid van 3 m/min gehanteerd. Belangrijk om te weten is dat een verhoging van de productiesnelheid ook voor hogere trekkrachten zorgt. Bij het gebruik van een langere mal kan de productiesnelheid toenemen. Een langere mal is echter duurder en zorgt voor hogere wrijvingskrachten wat ook tot de toename van de trekkrachten leidt.

Een juiste afweging in processnelheid, proceskosten, productgeometrie en productkwaliteit is dus belangrijk.

Het pultrusieproces maakt het mogelijk om zeer hoge vezelvolumefracties te bekomen met een sterke alignering van de vezels in de procesrichting. De alignering van de vezels in de procesrichting zorgt voor een zeer hoge treksterkte en buigsterkte van de profielen, al zijn de profielen relatief kwetsbaar in torsiebelasting en bij interne druk. Hiervoor is het aangepaste proces pullwinding ontworpen waarbij eerst een profiel wordt gepultrudeerd om vervolgens nieuwe vezeloriëntaties te introduceren in een filament winding proces. Dit maakt het proces complexer maar zorgt voor meer mogelijkheden in de optimalisatie van het uiteindelijke product.

Het standaard pultrusieproces is zowel geschikt voor simpele doorsnedes, holle profielen, maar ook een complexer design. De wanddikte varieert typisch tussen 2 tot 20 mm. Hoe groter de wanddikte, hoe moeilijker het is voor de warmte om volledig door te dringen in het materiaal.

Voordelen

- Productiemethode dat hoge volumes toelaat
- Goede mechanische eigenschappen in de procesrichting door de sterk gealigneerde vezels en een hoge vezelvolumefractie
- Designvrijheid van de doorsnede
- Volledig geautomatiseerd

Nadelen:

- Dure infrastructuur
- Hoge malkost vanwege de nood van een zeer hoge abrasiebestendigheid
- Moeilijke afstelling en controle van het proces
- Beperkt tot rechte structuren. Al bestaan er procesvarianten curved pultrusion en pullforming die een lichte curve toelaten.

9 RTM

Een andere productietechniek die mogelijk is voor de verwerking tot 3D - biocomposieten is resin transfer moulding (RTM). Buiten dat het nodig is om het halffabricaat op voorhand voor te drogen en rekening te houden met de maximale verwerkingstemperatuur van plantvezels, is dit proces gelijkaardig voor biocomposieten tegenover conventionele composieten.

RTM is enkel geschikt om (bio)composieten producten te produceren met een thermohardend polymeer. Het is belangrijk dat het hars bij het aanbrengen een lage viscositeit heeft. Figuur 31 en 32 tonen hoe het RTM-proces eruit ziet en welke stappen typisch gevolgd worden. Voor het proces is een gesloten mal in de vorm van het uiteindelijk product nodig (2D of 3D). Om te beginnen wordt tijdens de uitvoering van dit proces de gewenste lay-up, bestaande uit enkel de vezels, gevormd en op maat gesneden. Vervolgens wordt de mal gesloten met hierin de op maat gesneden en gevormde vezels. Tijdens de volgende stap wordt het hars in de mal geïnjecteerd onder druk. Een vacuümafzuiging kan hierbij de ontluchting stimuleren wat de kwaliteit van het finale product verhoogt, in andere gevallen gebeurt dit puur atmosferisch. Na uitharding van het hars wordt het product uit de mal gehaald en worden de randen opnieuw afgewerkt.

De mal wordt typisch voorverwarmd tot een temperatuur van 60-80 °C. De injectiedruk van het hars varieert voor een standaard RTM proces van 2 tot 7 bar. Een hoge druk RTM proces (HP-RTM), waarbij gestreefd wordt naar een kortere productcyclus, werkt typisch met een hogere injectie druk die varieert van 30 tot 120 bar in de mal afhankelijk van de productgrootte en -geometrie [25]. De uithardduur is afhankelijk van het hars en de maltemperatuur.

Naast HP-RTM bestaan er nog enkele andere varianten tegenover het standaard RTM proces.

Zo streeft het SQ-RTM (same quality RTM) proces voor een gelijkaardige kwaliteit maar snellere productie dan het klassieke autoclaaf proces (beschreven in Hoofdstuk 6). Hiervoor maakt het SQ-RTM proces gebruik van de combinatie van prepregs en droge textielen. De injectie onder hoge druk zorgt voor de compactheid van de prepregs en de impregnatie van de overige textielen. Een belangrijk aandachtspunt hierbij is dat het prepreghars en het geïnjecteerde hars compatibel moeten zijn met elkaar.

Een variant die naar een optimalisatie van de cyclustijd streeft is compressie RTM. Hierbij tussen de preform en de bovenmal tijdens de injectie een kleine luchtopening gelaten waardoor het hars zich sneller kan verspreiden. Eenmaal het hars zich heeft verspreid, sluit de mal onder druk wat voor een hoge vezelvolumefractie zorgt.

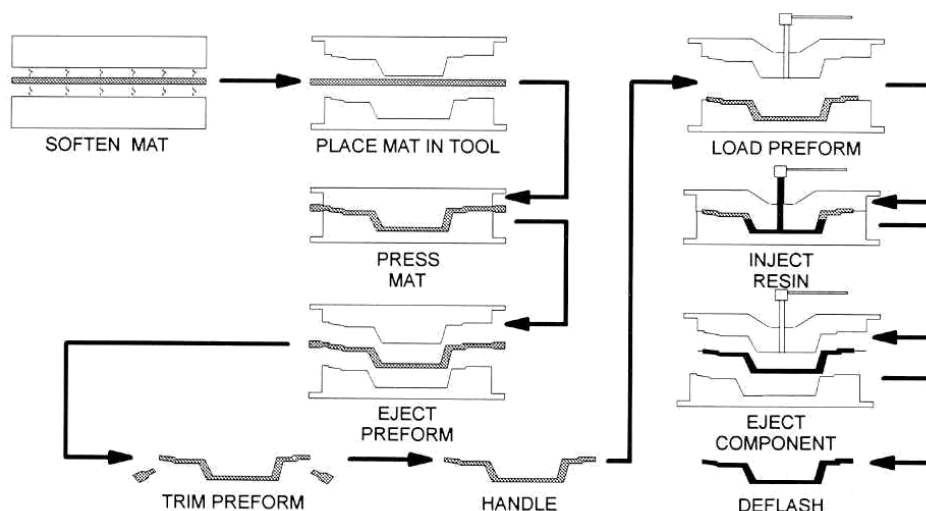
RTM-light is een andere variant waarbij de productiekost wordt verminderd. Bij deze techniek wordt de bovenmal vervangen door een dunnere mal, bijvoorbeeld een dunne composietmal, en wordt deze mal op zijn plaats gehouden met een vacuüm druk. Dit proces werkt trager, maar heeft het voordeel dat de vloeijing van het hars visueel te volgen is tijdens het proces.

Voordelen

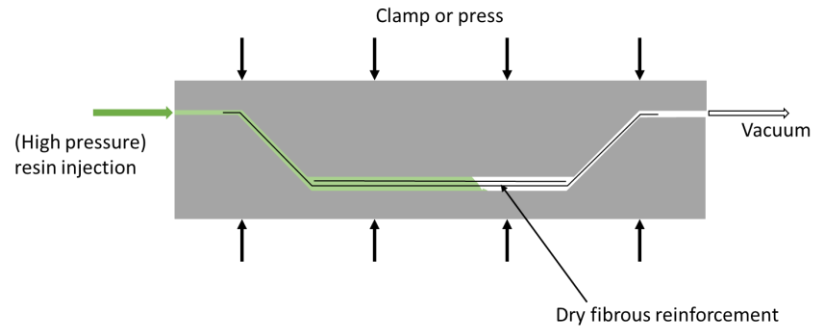
- Verschillende varianten beschikbaar
- Goede mechanische eigenschappen
- Mogelijk om inserts te verwerken

Nadelen

- Gemiddelde productietijd
- Moeilijk om volledig te automatiseren
- Randafwerking nodig



Figuur 31: Verschillende stappen van de productie tot een (bio)composieten product met RTM [26]



Figuur 32: Voorbeeld van de harsinjectiefase tijdens het RTM-proces geholpen door vacuüm verluchting

10 Vacuüminfusie

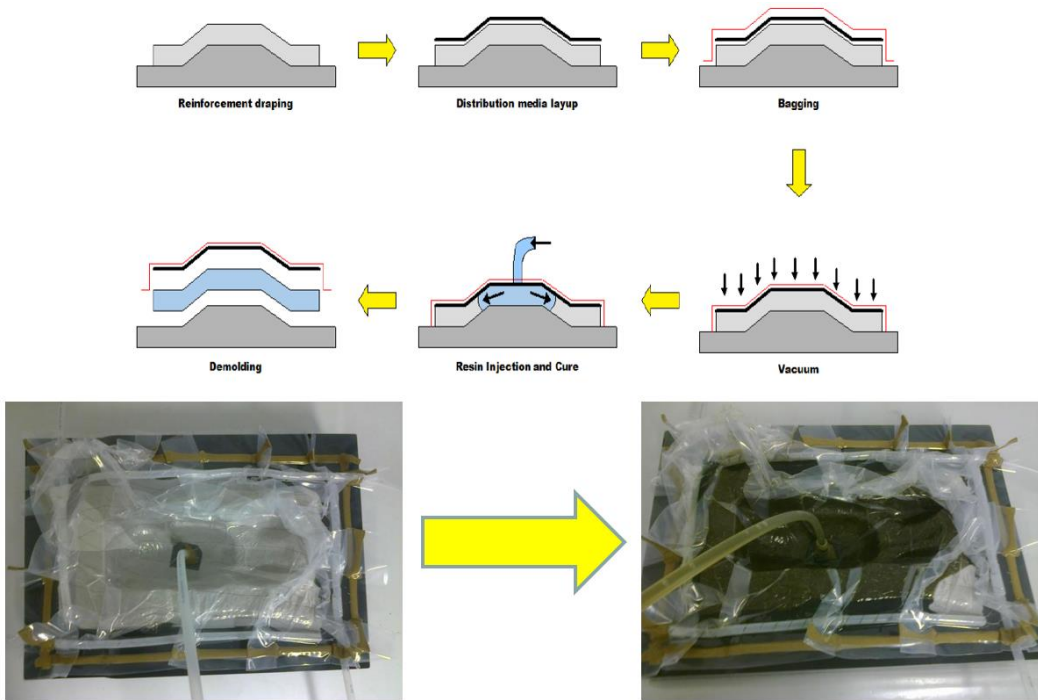
Een andere productietechniek die mogelijk is voor de verwerking tot 3D- biocomposieten is het vacuüminfusie proces. Buiten dat het nodig is om het halffabricaat op voorhand voor te drogen en rekening te houden met de maximale verwerkingstemperatuur van plantvezels, is ook dit proces gelijkaardig voor biocomposieten tegenover conventionele composieten.

Vacuüminfusie is enkel geschikt om (bio)composieten producten met een thermohardende matrix te produceren. Figuren 33, 34 en 35 tonen hoe een vacuüminfusie proces er typisch uitziet en welke stappen gevolgd worden.

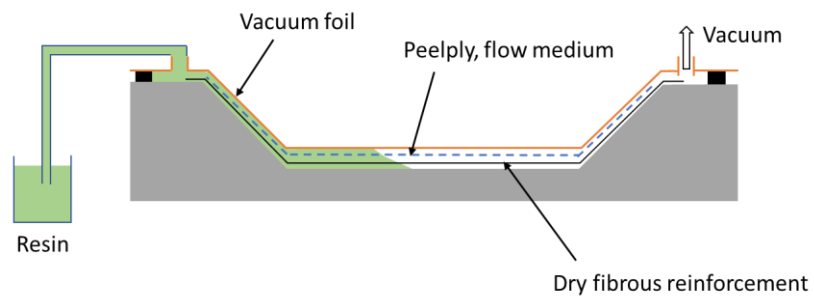
Voor de uitvoering van dit proces zijn verschillende voorbereidingsstappen nodig die typisch manueel worden uitgevoerd. Als eerste stap tijdens dit proces worden droge vezels met de gewenste lay-up op een plaat (2D) of mal (3D) gelegd. De toevoeging van vloeiverbetersaars als tweede stap zorgt voor de snellere en volledige verspreiding van het hars tijdens de infusie. Vervolgens worden de peel ply en vacuümszak geïnstalleerd. Waarna het hars onder een vacuümdruk doorheen de vezels kan vloeien.

In dit proces worden zowel epoxy als polyester harsen gebruikt. Afhankelijk van de samenstelling van het gebruikte hars kan de mal verwarmd worden, wordt het product achteraf in een oven gelegd of hard het hars uit op kamertemperatuur. Bij gebruik van polyester harsen met styreen is het belangrijk om geen volledige vacuüm aan te leggen om te voorkomen dat het styreen begint te koken.

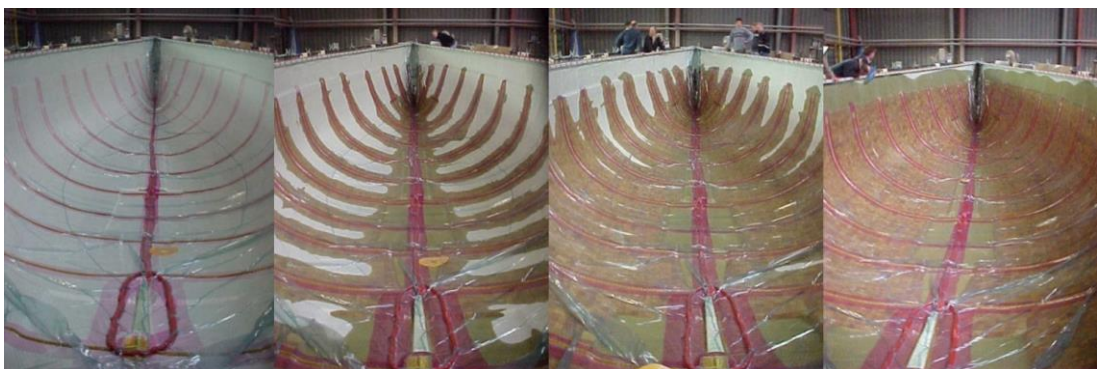
Dit is een relatief traag proces dat de mogelijkheid biedt om grote producten op een kostenefficiënte manier te produceren. Zo toont Figuur 35 een voorbeeld van de productie van de romp van een boot.



Figuur 33: Overzicht van de verschillende stappen in het vacuüminfusie proces [27]



Figuur 34: Voorbeeld van de injectiefase in een vacuüminfusie proces



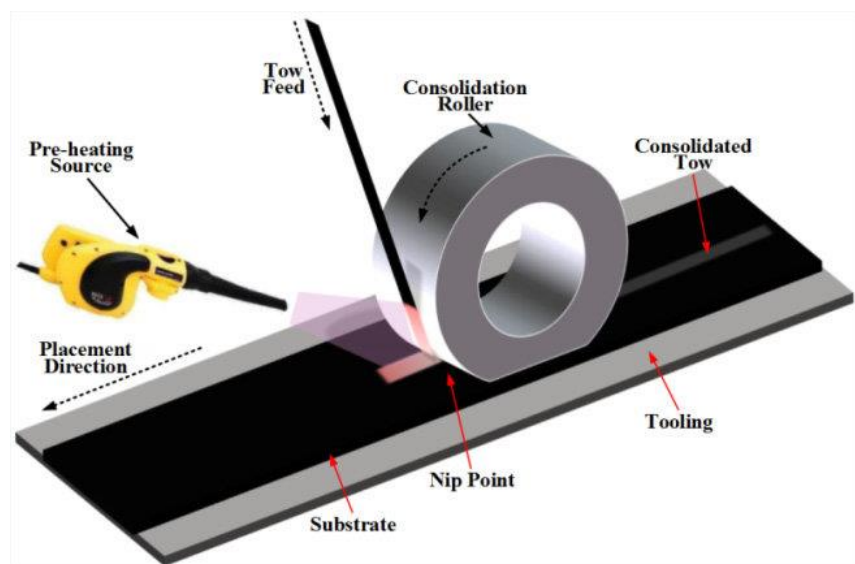
Figuur 35: Voorbeeld van de productie van een bootromp met een vacuüminfusie proces

11 Additive manufacturing (3D printing)

3D-printing maakt het mogelijk om op een zeer flexibele manier 3D-producten te printen. De verwerking van biocomposieten gebeurt hierbij op een zeer gelijkaardige manier als bij fossiel gebaseerde composieten.

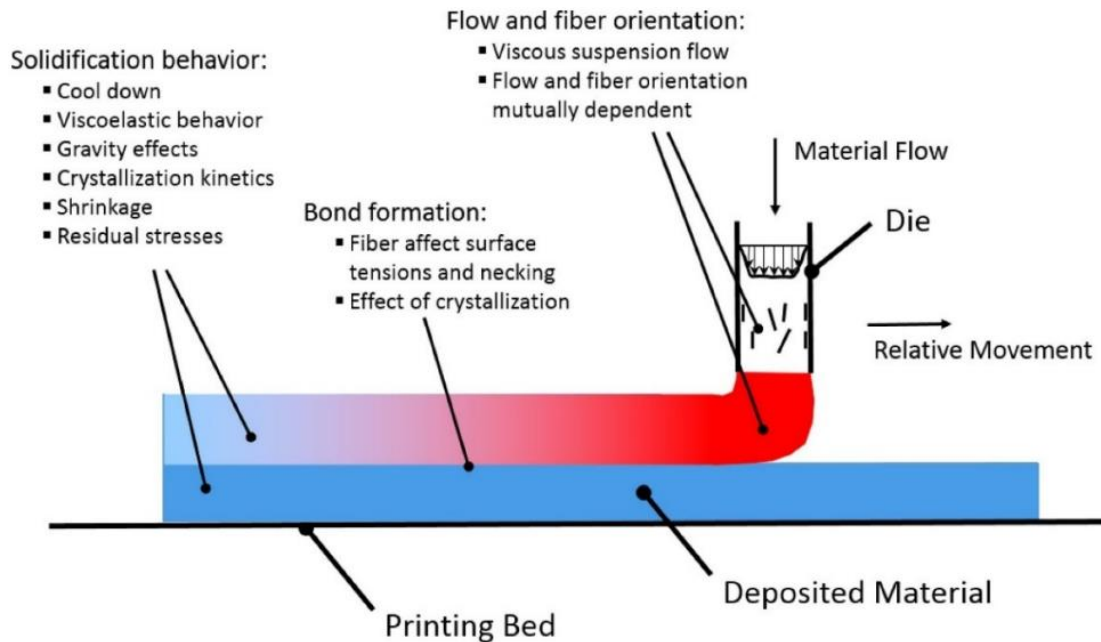
3D-printing start typisch van een thermoplastisch composiet in de vorm van een dunne tape, filament, poeder of granulaat. Twee typische varianten om dit startmateriaal aan te brengen aan een product zijn automated fiber placement en fused filament fabrication.

Figuur 36 toont de opstelling bij automated fiber placement. Hierbij wordt een dunne tape of filament voorverwarmd en via een compactierol op een mal of op eerder geprinte lagen aangebracht. Dit proces combineert de principes van filament winding en automated tape laying. Vanwege de dunne tape/filament is er een kleinere machine nodig en is de methode ook flexibeler in de vormen dat het kan printen. Ook kan deze methode holle structuren maken wat niet lukt bij filament winding. Wanneer een verhoging van de kwaliteit vereist is, is het mogelijk om na het printen een herconsolidatie uit te voeren op het product in een pers of in een autoclaaf.



Figuur 36: Opstelling bij automated fiber placement [28]

Het principe van fused filament fabrication is op Figuur 37 te zien. Deze techniek start van een filament waarin de vezel en een thermoplastisch polymeer reeds gemengd zijn. In sommige gevallen is een kleine extruder op de printer gemonteerd die van granulaat of poeder rechtstreeks een filament maakt. Tijdens dit proces gaat het filament doorheen een verwarmde printkop. De printkop smelt het filament deels op waardoor het vervormbaar is en kan hechten op de vorige laag. Deze techniek werkt zonder een compacteer stap, hierdoor komen vaak porositeiten voor. Deze techniek kan vezels op verschillende lengtes verwerken.



Figuur 37: Werking van het fused filament fabrication proces [29]

3D printing voor composieten in het algemeen geeft verschillende voordelen op vlak van flexibiliteit, productie van complexe geometrieën, specifieke plaatsing en oriëntatie van de vezels, de relatief lage machine en mal kosten en de hoge automatisatie

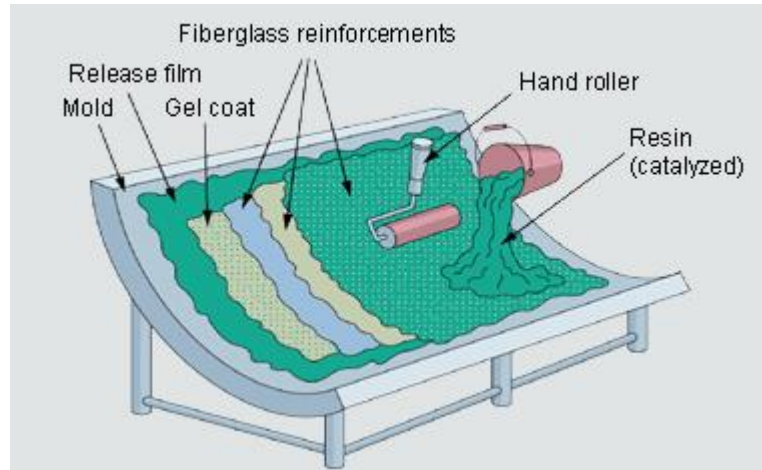
Enkele nadelen zijn dat het een relatief traag proces is, de gelaagde structuur die te zien is aan de zijkanten en dus de nodige nabewerking en de lagere mechanische eigenschappen.

12 Hand lay-up

Een andere productietechniek die mogelijk is voor de verwerking tot 2D- en 3D-biocomposieten is het hand lay-up proces. Buiten dat het nodig is om het halffabricaat op voorhand voor te drogen en rekening te houden met de maximale verwerkingstemperatuur van plantvezels, is ook dit proces gelijkaardig voor biocomposieten tegenover conventionele composieten.

Hand lay-up is enkel geschikt om (bio)composieten producten met een thermohardende matrix te produceren. Figuren 20 en 21 tonen hoe een hand lay-up proces er typisch uitziet. Zoals ook de procesnaam het zelf aangeeft, vereist dit proces veel manuele handelingen. Tijdens de opbouw van het proces worden eerst een release film en indien gewenst een gel coat op een plaat (2D) of mal (3D) aangebracht. Vervolgens worden droge vezels volgens de gewenste lay-up aangebracht en wordt het hars in de vezels gerold door de druk van een manuele rol.

In dit proces worden typisch polyester harsen gebruikt. Het hars wordt op kamertemperatuur aangebracht en meestal niet verwarmd.



Figuur 38: Voorbeeld hoe het product opgebouwd wordt tijdens een hand lay-up proces [30]



Figuur 39: Voorbeeld van de productie bij een hand lay-up proces [31]

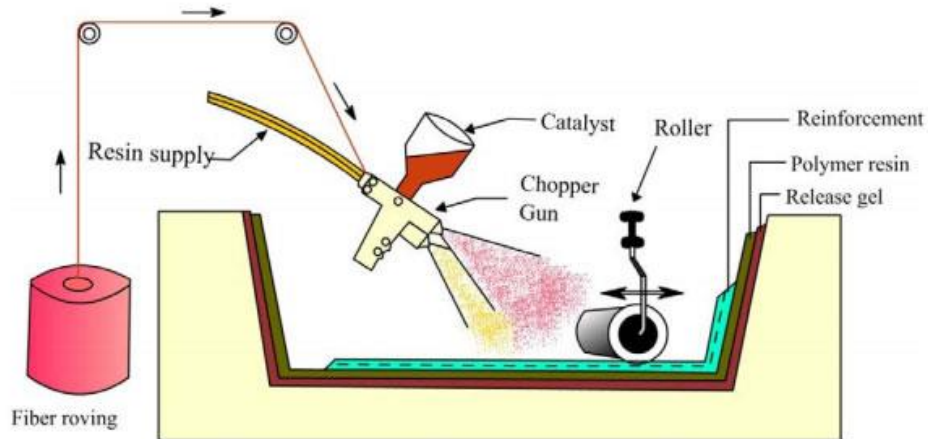
13 Spray-up

Ook het spray-up proces is geschikt voor de verwerking van 2D- en 3D-composieten. Buiten dat het nodig is om plantvezels op voorhand voor te drogen en rekening te houden met de maximale verwerkingstemperatuur, is ook dit proces gelijkaardig voor biocomposieten tegenover conventionele composieten.

Het spray-up proces is enkel geschikt om (bio)composieten producten met een thermohardende matrix, typisch polyester, te produceren. Figuur 38 toont een voorbeeldschema van het proces. Dit proces start van een garen en hars die afzonderlijk door een spray pistool gaan. De vezels worden in dit pistool in kleine vezels gehakt. Aan het hars worden hierin katalysatoren en additieven toegevoegd. De korte vezels en het hars worden tegelijk uit het pistool gespoten en op een mal aangebracht. Meestal gebeurt dit manueel, al is robotisering voor grotere reeksen mogelijk. Na het aanbrengen van de gewenste hoeveelheid vezels, zorgt het gebruik van handrollers om de lucht uit de composietlaag te halen en de compactheid te verzekeren. Uitharding kan zowel door opwarming als op kamertemperatuur gebeuren.

Dit spray-up proces is een relatief eenvoudig en goedkoop proces dat veel flexibiliteit toelaat in verandering van de geometrie, complexiteit van de geometrie en productgrootte. Een nadeel is zijn de relatief lage mechanische eigenschappen en de vele manuele handelingen

die vereist zijn. Randafwerking is bijvoorbeeld steeds vereist. Vanwege de manuele aanbrenging van de composietmateriaal is er ook een grootte variatie mogelijk in verschillende producten van dezelfde reeks en is de productkwaliteit sterk afhankelijk van de vaardigheden van de operator. Hiernaast is dit proces beperkt tot maar een enkel oppervlak van goede kwaliteit, is de cyclustijd relatief lang en zorgt de openheid van dit proces voor een hoge styreen emissie.

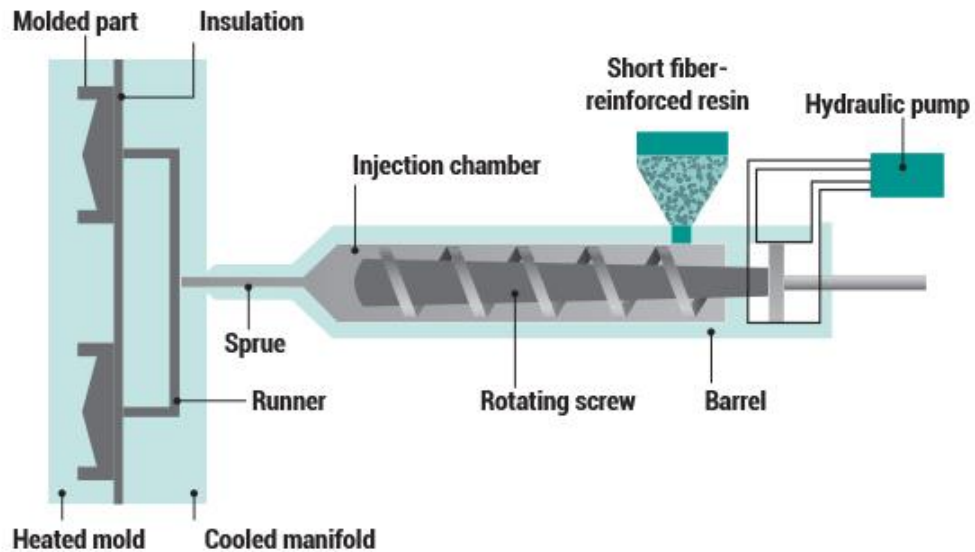


Figuur 40: Voorbeeldschema van het spray-up proces [32]

14 Spuitgieten

Het laatste productieproces dat overlopen wordt in dit verslag is het spuitgietproces. Spuitgieten voor biocomposieten is (buiten de maximale verwerkingstemperatuur van plantvezels) heel gelijkaardig als voor fossiel gebaseerde composieten en is ook gelijkaardig als het spuitgieten van polymeren.

Figuur 41 toont het spuitgietproces. Dit proces start van een composieten granulaat, met hierin korte versterkende vezels reeds in verwerkt zitten op mm-schaal. Dit granulaat wordt verwerkt doorheen een extruder die het materiaal opsmelt, mengt tot een homogene mengeling en het compacteert op hoge druk. Wrijving en afschuiving van het materiaal tussen de schroef en de extruderwand bevorderen het smelt- en mengproces. Vervolgens wordt het opgesmolten materiaal geïnjecteerd onder hoge druk. Wanneer voldoende gesmolten materiaal aanwezig is voor de schroef wordt deze voorwaarts geduwd en wordt het materiaal in de mal geïnjecteerd. De mal blijft op lage temperatuur en zorgt voor de afkoeling van het materiaal. Wanneer het materiaal is afgekoeld, opent de mal. Ondertussen is nieuw materiaal al klaar om geïnjecteerd te worden.



Figuur 41: Voorbeeld van het spuitgietproces voor composieten [33]

Tijdens dit spuitgietproces doen zich zeer hoge drukken voor. De bereikte druk ligt typisch tussen 350 – 2000 bar. De spuitgietmal moet resistent zijn tegen een heel hoge druk en heeft typisch een zeer hoge oppervlakte kwaliteit. Vanwege de hoge druk in combinatie met de abrasieve vezels in het materiaal is een stalen mal met een chroomlaag vereist. De levensduur van deze chroomlaag dient gemonitord en op tijd vervangen te worden. Kleine verluchttingsgaten in de mal, 0,05 mm tot 3 mm groot, zorgen dat de lucht kan verwijderd worden tijdens de materiaalinjectie.

Het spuitgietproces is een proces van extremen. Dit toont volgend overzicht van de voor- en nadelen. Dit maakt dat het spuitgietproces enkel voor specifieke massaproductie toepassingen interessant is.

Voordelen

- Zeer snelle productie – geschikt voor massaproductie – cyclustijd hangt af van de productgrootte
- Hoge robuustheid van het product
- Hoge automatisatie - zeer lage arbeidskosten
- Zo goed als geen randafwerking nodig
- Weinig materiaalafval
- Complex design en inserts mogelijk

Nadelen

- Lage mechanische eigenschappen
- Hoge investeringskost voor de machine
- Hoge malkost
- Zeer kleine foutenmarge, alles moet zeer nauwkeurig worden afgesteld

Naast het standaard spuitgietproces bestaan ook enkele varianten. Het LFT spuitgieten (LFT = long fiber thermoplast) zorgt ervoor dat de vezels pas in het laatste stadium van de extruder wordt in gebracht wat resulteert in een grotere vezellengte en dus betere mechanische eigenschappen in het eindproduct.

Ook is het mogelijk om te spuitgieten met een thermohardend composiet. Hierbij is het belangrijk dat het polymeer pas begint uit te harden in de mal en niet voordien. Bij traag uithardende polymeren kan gewerkt worden met een gelijkaardig proces. Bij hoog reactieve polymeren worden het hars en de harder net voor de injectie bij elkaar gebracht. Deze variatie wordt ook wel RRIM genoemd (Reinforced reaction injection moulding).

Conclusie

Dit verslag beschrijft de verschillende methodes voor de productie van biocomposieten plaat en 3D-structuren. Hoofdstuk 1 toont na droogtesten van vlas en vlas-PLA weefsel dat het droogproces de eerste uren snel gaat en de droogsnelheid hierna afneemt. Het is belangrijk om plantvezels voor hun verwerking enkele uren voor te drogen, bv. op 80 °C. Een exacte droogtijd is niet mogelijk om mee te geven omdat het droogproces afhangt van verschillende factoren. Verder is het belangrijk om bij de verwerking van plantvezels rekening te houden met de maximale verwerkingstemperatuur van 200°C. Vanwege de hoge smelttemperatuur van basaltvezel is bij de verwerking hiervan de procestemperatuur eerder gelimiteerd door de degradatietemperatuur van de polymeren matrix.

Hoofdstuk 2 tot 4 bespreken hoe via een hydraulische pers, multi-daylight pers, dubbele band pers en automated tape laying plaatmateriaal gemaakt en voorgeconsolideerd kan worden. Vervolgens geven hoofdstuk 5 tot 14 een overzicht van de algemene werking en de voor- en nadelen van de verschillende composietproductie methodes om 3D-structuren te maken, met hierbij concrete productieparameters waar mogelijk.

Zo komen thermovormen & persvormen, autoclaaf productie, filament winding, pultrusie, RTM, vacuüminfusie, 3D-printing, hand lay-up, spray-up en spuitgieten aan bod.

De droogtesten van zowel vlas- als vlas-PLA weefsel tonen dat in deze opstelling na 3 uur drogen reeds zo'n 90% van het oorspronkelijk geabsorbeerde vocht is verdampt. Hierna neemt de effectiviteit van het drogen sterk af. Het droogproces hangt af van het materiaalvolume, de compactheid van het materiaal, de droogoven en het type materiaal in het droogproces. Hierdoor is het niet mogelijk om een droogtijd van 3 uur mee te geven als algemene richtlijn. Het gewichtsverloop zal wel steeds een gelijkaardige curve opleveren als in Figuur 2 en 3 te zien is.

Referenties

- [1] DEHONDT Composites, „TWINFLAX P-Preg PP 500,“ PORT JEROME SUR SEINE, 2019.
- [2] J. L. Thomason en J. L. Rudeiros-Fernández, „Thermal degradation behaviour of natural fibres at thermoplastic composite processing temperatures,“ *Polymer Degradation and Stability*, nr. 188, 2021.
- [3] A. C. Long, *Composites forming technologies*, Nottingham: Woodhead Publishing 2007, 2007.
- [4] DEHONDT Composites, „TWINFLAX P-Preg PA11 500,“ PORT JEROME SUR SEINE, 2018.
- [5] Scabro, „Biotex Flax/PLA 4x4 Plain Weave 500g/m² Fabric Technical Data Sheet,“ 2013.
- [6] L. D. Vriese, „Eindrapport Bio-SRPC IWT 120628,“ Centexbel, 2015.
- [7] Linnenbrink Technik Warburg Maschinenbau, „Double belt presses,“ [Online]. Available: <https://www.linnenbrink-technik-warburg.de/en/products/laminating-lines/double-belt-presses>.
- [8] X. WANG, C. MAYER en M. NEITZEL, „Some Issues on Impregnation in Manufacturing of Thermoplastic Composites by Using a Double Belt Press,“ *POLYMER COMPOSITES*, vol. 18, nr. 6, pp. 701-710, 1997.
- [9] D. Liu, Y. Zhu, J. Ding, X. Lin en X. Fan, „Experimental investigation of carbon fiber reinforced poly(phenylene sulfide) composites prepared using a double-belt press,“ *Composites Part B*, vol. 77, pp. 363-370, 2015.
- [10] S. Tamrakar, S. M. Shaler, R. A. Lopez-Anido, D. J. Gardner, C. H. West, Y. Han en R. Edgar, „Mechanical Property Characterization of Fiber-Reinforced Polymer Wood-Polypropylene Composite Panels Manufactured Using a Double Belt Pressing Technology,“ *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING*, vol. 24, nr. 9, pp. 1193-1200, 2012.
- [11] Italtap - Hydraulic presses, „Automatic loading multi-daylight presses (MAGNUM),“ [Online]. Available: <https://www.italpresse.com/en/wood-presses/line-for-finishing-panels/multi-daylight-press/>.
- [12] mTorres, „Automatic taping machine - TORRESLAYUP,“ [Online]. Available: <https://mtorres.es/en/equipment/manufacturing-systems/lamination/automatic-wrapping-machine-torreslayup>.
- [13] T. Baumard, G. Menary, O. de Almeida, F. Schmidt, P. Martin en J. Bikard, „Towards a Coupled Heating-Forming Simulation of the Thermoforming of Thermoplastic Composites,“ Esaform, Dublin, 2018.
- [14] Argo Mold Limited, „17 Different Ways To Molding A Part,“ [Online]. Available: <http://www.argomold.com/html/17-Different-ways-to-molding-a-part.asp>. [Geopend 21 September 2023].
- [15] S. Jani, A. Senthil Kumar, M. Adam Khan, S. Jose en A., „Design and optimization of unit production cost for AWJ process on machining hybrid natural fibre composite material,“ *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Hyderabad, 2021.
- [16] F. Masoud, S. M. Sapuan, M. Khairul Anuar, M. Ariffin, Y. Nukman en E. Bayraktar, „Experimental Investigation on Dimensional Stability and Cutting Quality in Cutting

Process of Sugar Palm Fiber Reinforced Unsaturated Polyester Composites with Laser Beam and Abrasive Water Jet Cutting Technologies," *Fibers and polymers*, Selangor, 2022.

- [17] Prefa Kompozity, „PRODUCTION TECHNOLOGY - WHAT ARE COMPOSITE MATERIALS?," [Online]. Available: <https://www.prefa-kompozity.cz/en/production-technology/>. [Geopend 03 10 2023].
- [18] N. Bernet, P.-E. Bourban en J.-A. E. Månson, „COST-EFFECTIVE MANUFACTURING OF HOLLOW COMPOSITE STRUCTURES BY BLADDER INFLATION MOULDING," in *12th Int. Conf. on Composite Materials (ICCM 12)*, Lausanne, 1999.
- [19] S. Black, „Composites World - SQR™ enables net-shape parts," 31 8 2010. [Online]. Available: <https://www.compositesworld.com/articles/sqr- Enables-net-shape-parts>.
- [20] Composites Evolution, „Technical Data Sheet Evopreg ampliTex™ EPC300 Medium temperature cure flax epoxy prepregs for component," 2021.
- [21] Daxen, „COMPOSITES AUTOCLAVES OUR SOLUTIONS FOR YOUR PRODUCTS," [Online]. Available: <https://daxen.fr/en/autoclaves/autoclave-composites/>.
- [22] P.J.Halley, „Rheology of thermosets: the use of chemorheology to characterise and model thermoset flow behaviour," *Thermosets: Structure, Properties and Applications*, pp. 92-117, 2012.
- [23] E. F. Abdewi, S. Sulaiman, A. Hamouda en E. Mahdi, „Effect of geometry on the crushing behaviour of laminated corrugated composite tubes," Elsevier B.V, Lausanne, 2006.
- [24] PGM Urban Hardlandscapes, „Manufacturing Technology," [Online]. Available: <https://pgmsl.ru/en/production-technology/>. [Geopend 5 10 2023].
- [25] G. Gardiner, „CompositesWorld - HP-RTM on the rise," 14 4 2015. [Online]. Available: <https://www.compositesworld.com/articles/hp-rtm-on-the-rise>.
- [26] K. J. Channer, W. Cosgriff, G. Smith en O. Okoli, „Development of the Double RIFT Diaphragm Forming Process," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 21, pp. 1629-1635, 2002.
- [27] Eco-Technilin, „Thermoset materials Fibrimat LCM: F300".
- [28] H. Zhenyu, S. H. F. Shouzheng en F. Yunzhong, „Multi-Scale Low-Entropy Method for Optimizing the Processing Parameters during Automated Fiber Placement," MDPI Materials, Basel, 2017.
- [29] B. Brenken, E. Barocio, A. Favaloro, V. Kunc en R. Pipes, „Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review," *Additive Manufacturing*, West Lafayette, 2018.
- [30] S.K.Vignesh en E. Kumar, „DYNAMIC BEHAVIOUR OF COMPOSITE LEAF SPRING," *European Journal of Material Science*, vol. 6, nr. 1, pp. 27-42, 2019.
- [31] Fassmer, „Hand lay-up," [Online]. Available: <https://www.fassmer.de/en/wind-power/production/hand-lay-up>.
- [32] EPP composites, „Spray lay-up Process," [Online]. Available: <https://www.eppcomposites.com/spray-layup-process.html>. [Geopend 06 10 2023].
- [33] Davies Molding, „ENGINEERING SPECIFICATIONS: INJECTION COMPRESSION MOLDING," [Online]. Available: <https://daviesmolding.com/resources/engineering-specifications/plastic-molding/injection-compression-molding/>. [Geopend 06 10 2023].
- [34] Composites Evolution Ltd, „Biotex Jute Fabrics," Chesterfield, 2013.

- [35] R. Ilyas, S. Sapuan, M. Harussani, M. Hakimi, M. Haziq, M. Atikah, M. Asyraf, M. Ishak, M. Razman, N. Nurazzi, M. Norrrahim, H. Abrial en M. Asrofi, „Polylactic Acid (PLA) Biocomposite: Processing, Additive Manufacturing and Advanced Applications,” *Polymers*, vol. 1326, nr. 13, p. 34, 2021.
- [36] BPREG, „Technical Sheet - high-performing lightweight affordable natural-fiber composite solutions,” 2022.