

---

# Onderzoek naar de mogelijkheden van FDM 3D printen met zaagsel ten behoeve van interieurbouw

---

Auteur: M. Bergsma  
Studentnummer: s1217844  
Opleiding: Industrieel Ontwerpen  
Opdrachtgever: Coors Interieurbouw  
Afstudeercommissie: Dr. Ir. T.H.J. Vaneker  
Dr. Ir. D. Lutters  
Plaats: Enschede  
Datum: 10-7-2015



## Samenvatting

Dit onderzoek doet een ontwerpvoorstel van een proces waarbij zaagsel gebruikt kan worden in FDM 3D printen, ten behoeve van interieurbouw. Het zaagsel is een afvalstof van het productieproces van Coors Interieurbouw. Zij willen graag, volgens het Cradle2Cradle principe, het zaagsel verwerken in nieuwe producten. Als productieproces willen zij het 3D printen gebruiken, omdat dat een vormvrijheid geeft die met het huidige proces niet mogelijk is. Daarvoor moest een geschikt mengsel van bindmiddel en zaagsel gevonden worden, een ontwerpvoorstel gedaan worden voor de procesonderdelen van de printer en bepaald worden wat de economische eigenschappen van de voorgestelde printer zijn.

Als eerst is er een literatuuronderzoek naar lijmen uitgevoerd, daarbij is gekeken naar synthetischelijmen, natuurlijke lijmen en andere bindmiddelen. Twee componenten harslijmen blijken de beste keus te zijn. Vervolgens zijn er experimenten voor het materiaal en extrusieproces gedaan. Daarbij zijn lijmsorten en verschillende percentages zaagsel vergeleken. Een polyurethaan giethars (met viscositeit: 150 mPa\*s) met 41,2% (op gewicht) zaagsel had hierbij de beste eigenschappen. Het extrusieproces zou kunnen werken met een schroefextruder en het extrusiekanaal mag geen vernauwingen hebben. Als laatste is het ontwerpvoorstel van een geschikte 3D printer met economische aspecten gemaakt. Het proces bestaat uit opslag van het materiaal, vervoer van het materiaal door middel van pompen, mengen en extruderen met een schroefextruder en een draaibaar extrusiekanaal voor juiste depositie. Een product printen van 1000 liter kost 6 uur en 33 minuten. Een product van 1000 Kg bevat: 412 Kg zaagsel en 588 Kg lijm.

In vervolgonderzoek kan de verhouding van lijm en zaagsel geoptimaliseerd worden. Daarbij kan ook de extrudeerbaarheid verbeterd worden door het effect van grootte van de zaagseldeeltjes te onderzoeken. Om een natuurvriendelijk product te leveren zal een biologisch bindmiddel gezocht moeten worden.

# Inhoudsopgave

<b>Samenvatting</b>	<b>3</b>
<b>Huidige status van het FDM printen</b>	<b>6</b>
<i>Wat is het FDM proces?</i>	6
Categorisatie	6
Digitale voorbereiding	6
Machinale uitvoering	6
Materiaal	7
<i>Wat zijn de resultaten van eerdere testen met lijm-zaagsel mengsels?</i>	8
<i>Commerciële toepassing van hout gebaseerde FDM?</i>	8
<i>Wetenschappelijk onderzoek naar 3D geprint hout.</i>	9
Materiaal in filament	9
Extrusie van gemengd materiaal	9
Lijmen en hout gebaseerde materialen	9
<i>Wat is de huidige staat van FDM 3D printen met laagdiktes &gt; 5mm?</i>	9
<i>Conclusie</i>	10
<b>Onderzoeksvraag en -opzet</b>	<b>12</b>
<i>Wat is de situatie?</i>	12
<i>Opdracht en uitwerking</i>	12
<i>Programma van eisen</i>	12
<b>Literatuuronderzoek naar bindmiddelen</b>	<b>13</b>
<i>Eisen aan het bindmiddel</i>	13
<b>Eigenschappen van lijmen</b>	<b>14</b>
Synthetische lijm	14
<i>Natuurlijke lijmen</i>	15
<i>Hydraulische lijmen</i>	16
<i>Conclusie</i>	16
<i>Verder onderzoek</i>	16
<b>Experimenteel onderzoek naar zaagsel-lijm mengsels</b>	<b>17</b>
<i>Vorbereiding zaagsel</i>	17
<i>Experimenten</i>	18
Samenvatting experiment 1 – Verschillende soorten lijmen	18
Keuze bindmiddel	19
Samenvatting experiment 2 – Percentage zaagsel	20
Samenvatting experiment 3 - Reproduceerbaarheid	22
Samenvatting experiment 4 – Extruderen van groter volume en meerdere lagen stapelen.	23
Samenvatting experiment 5 – Hoge drukopbouw	23
Beschrijving experiment 6	25
<b>Ontwerp van het opgeschaalde printproces</b>	<b>26</b>
<i>Opslag van de materialen</i>	26

<i>Vervoer van de materialen van de opslag naar de printkop</i>	26
<i>Mengen en extruderen</i>	27
<i>Depositie</i>	29
<i>Schoonmaken</i>	31
<i>Combinatie voor de printkop</i>	31
<i>Printerconstructie</i>	33
Printerframe	33
Opbouw	35
Vervoerbaarheid	35
<i>Economische aspecten</i>	38
Eigenschappen printer	38
Kosten	38
<b>Conclusies</b>	<b>40</b>
<i>Welk bindmiddel is volgens de theorie geschikt voor de 3D printer?</i>	40
<i>Waar bestaat de slurry uit dat gedeponeed wordt?</i>	40
<i>Hoe wordt de slurry opgeslagen, getransporteerd en gedeponeed?</i>	40
<i>Hoe blijft de slurry op zijn plek en wat zijn de eigenschappen na uitharding?</i>	40
<i>Welke proces parameters resulteren in een economisch acceptabel proces?</i>	40
<b>Aanbevelingen</b>	<b>41</b>
<i>Optimalisatie van materiaal</i>	41
<i>Optimalisatie van de full-size printer</i>	41
<b>Bronnenlijst</b>	<b>42</b>
<b>Lijst van afbeeldingen</b>	<b>46</b>
<b>Bijlagen</b>	<b>48</b>
A. <i>Verslagen van studenten IO; vooronderzoeken printen met lijm-zaagsel mengsels</i>	
B. <i>Plan van aanpak</i>	
D. <i>– Planning Bacheloropdracht</i>	
E. <i>– Samenvatting Stargesprek met Coors</i>	
F. <i>– Programma van eisen</i>	
G. <i>– Hout gebaseerde filamenten</i>	
H. <i>– Eisentabel voor bindmiddelen</i>	
I. <i>– Lijmen gecategoriseerd</i>	
K. <i>– Vergelijking aankoop gietharsen</i>	
L. <i>– Eigenschappen van de Task 3 polyurethaan giethars</i>	
M. <i>– Proof of Concept</i>	
N. <i>– Uitwerkingen van de experimenten</i>	
O. <i>– Aardgas en elektriciteit, gemiddelde prijzen van eindverbruikers</i>	

## Huidige status van het FDM printen

Het interieurbouwbedrijf Coors vraagt naar de mogelijkheden van FDM 3D printen met zaagsel ten behoeve van de interieurbouw. Om daarvoor een innovatief onderzoek uit te voeren zal als eerst moet bepaald worden wat FDM is. Vervolgens wordt er uitgezocht of er al geprint wordt met materialen die hout bevatten en of er al geprint wordt op het formaat van meubels. De resultaten kunnen worden meegenomen en waar mogelijk kan de volgende stap in het onderzoek gemaakt worden.

### Wat is het FDM proces?

#### Categorisatie

Fused Deposition Modelling is een additive manufacturing (3D print-) techniek waarmee men producten opbouwt uit dunne laagjes materiaal. Zie Figure 2. Er zijn verschillende classificatiemogelijkheden, bijvoorbeeld op basis van werk materiaal of manier van printen. Binnen zeven verschillende procesgroepen is er een scheiding te maken tussen Individuele Depositie en Laag-depositie. (Wohlers, Wohlers Associates, 2012) De eerste plaatst alleen materiaal waar dat nodig is voor het product. De laatste plaatst hele lagen en daarna worden gedeeltes van die laag bewerkt zodat dat het product wordt gevormd. Het restmateriaal wordt weer verwijderd, zoals bijvoorbeeld bij Selective Laser Sintering. Onder individuele depositie vallen de extrusie processen, waaronder FDM. In Figure 1 is een classificatie op uitharding van het werkstukmateriaal te vinden. FDM behoort dan tot het uitharden van een vloeistof.

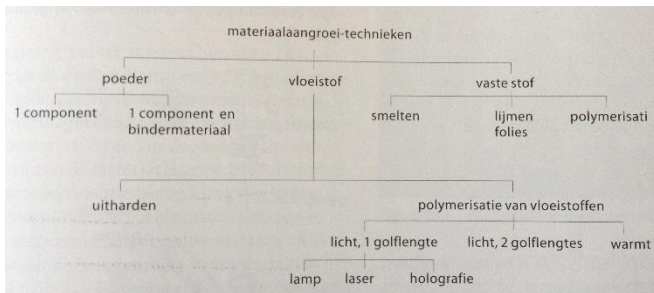


Figure 1 - Indeling van de materiaalaangroei-technieken naar wijze van uitharding van het werkstukmateriaal. (Kals, 2007)

#### Digitale voorbereiding

Alle additive manufacturing processen beginnen met een digitaal CAD model van het onderdeel. Dat model wordt geëxporteerd als .STL bestand. Een .STL bestand beschrijft de oppervlaktegeometrie van een vorm door daar vele driehoeken overheen te projecteren. Hoekpunten en zijdes worden zo veel mogelijk gelijk gelegd op het oppervlak van het CAD model. Door de vele rechte zijdes van de driehoeken worden krommes benaderd. Daardoor ontstaat een afwijking tussen het CAD model en het STL-model. De nauwkeurigheid kan worden verbeterd door de vorm door meer driehoeken te laten beschrijven. Een tweedimensionaal voorbeeld is weergegeven in Figure 3. Deze ring wordt benaderd door 16

driehoeken.

Het STL model wordt opgedeeld in plakjes (slices) die elk een laagje in het printproces voorstellen. De laagdikte van het model is dan ook gelijk aan een laagdikte die de machine kan printen.



Figure 2 - Voorbeeld voor het opbouwen van een product uit laagjes.

Voor elk laagje wordt een route bepaald die de machine zal doorlopen tijdens de productie. Vaak zijn die uitgedrukt in X- en Y-bewegingen. Variaties in de route hebben invloed op de uiteindelijke sterkte van het product.

Vervolgens wordt deze data omgezet naar machinetaal en uitgevoerd door de machine.

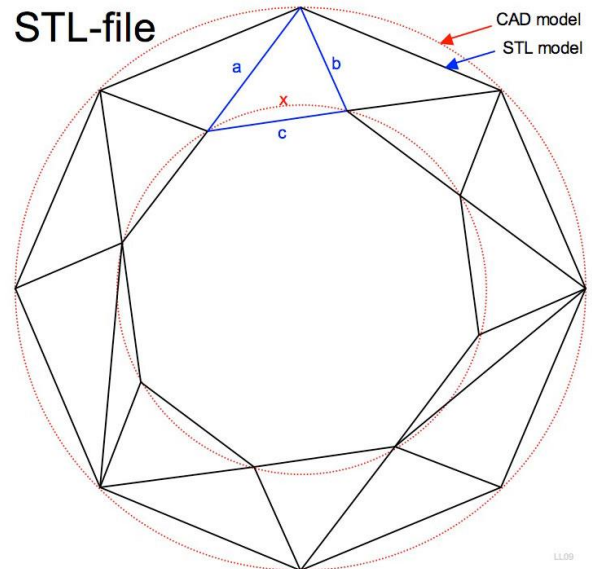


Figure 3 - Benadering van een twee dimensionaal CAD model met het STL model.

#### Machinale uitvoering

Een FDM machine kan verschillende uitvoeringen hebben. Een is de opstelling dat het printplatform beweegt in de Z-as en de printkop bewegingen in de X en Y as uitvoert. De depositie van het materiaal werkt nagenoeg altijd hetzelfde. De meeste huidige commerciële desktopprinters halen een kunststof draad van een rol en duwen dat door de printkop. Die printkop is warm gemaakt zodat het kunststof smelt en op het printplatform kan worden geëxtrudeerd. Door de bewegingen van de printkop kunnen er lijntjes worden gemaakt die samen een laagje vormen. Door meerdere

laagjes op elkaar te deponeren kunnen driedimensionale onderdelen worden geprint. Zie Figure 4 voor een afbeelding met alle belangrijke onderdelen van een FDM 3D printer.

### *Material*

Er kunnen vele materialen gebruikt worden in een FDM machine. Veelgebruikt zijn de kunststoffen ABS en het natuurlijke PLA. Er zijn speciale materialen beschikbaar zoals kunststof met houtuitstraling, gevuld met metaal en met luminescentie. Er wordt ook geëxperimenteerd met het printen van voedsel. ("Rapid Prototyping Materials", z.d.) Daarnaast is het nodig om ondersteuningsmateriaal te printen voor overhangende delen van objecten. Die materialen kunnen opgelost of gemakkelijk weggebroken worden.

De materialen zullen in de machine vloeibaar moeten zijn en zodra ze gedeponerd zijn moeten ze zo snel mogelijk stollen om de vorm te behouden. De viscositeit moet in de machine dus laag zijn, maar na depositie zo hoog mogelijk om vormvastheid te garanderen. De stollingsmethode kan

verschillen per materiaal. Kunststoffen harden meestal uit door afkoelen, maar lijmen kunnen drogen aan de lucht of door een chemische reactie zoals bij een tweecomponentenlijm.

#### **Lijst van materialen toepasselijk bij FDM:**

Standard thermoplastics: ABS, PLA, HIPS, PVA, nylon, PS, PC, PA, POM, PETG, PPSF, ULTEM9085

Special properties: carbon fiber or nanotube reinforced PLA, electrostatic dissipating, filament from recycled materials or biodegradable, wood-like or wood-based, metal filled, conductivity, flexibility, thermochromics, luminescent, flame-retardant, epoxy or polyether-based, resilient, sparkles, color change, high temperature PLA, polycarbonate-ABS alloy, high density, radiation shielding, metal simulation, appearance of silk and linen.

Bron: [www.additive3d.com/mat\\_lks.htm](http://www.additive3d.com/mat_lks.htm)

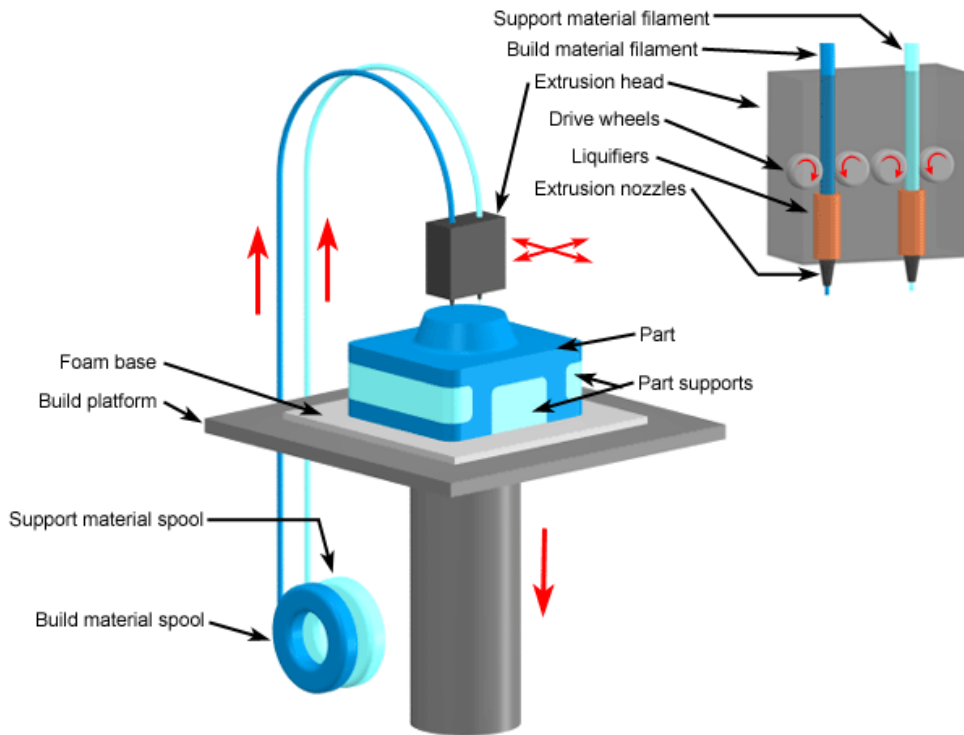


Figure 4 - Onderdelen van een FDM 3D printer

## Wat zijn de resultaten van eerdere testen met lijm-zaagsel mengsels?

In het kader van een 5-EC vak over 3D printen hebben master studenten Industrieel Ontwerpen van Universiteit Twente hebben al eerder een verslag gemaakt over 3D printen met zaagsel en een bindmiddel. De twee verslagen zijn toegevoegd in bijlage A. Een groep (Brilman, Slob; pag. 12) heeft testen gedaan voor het FDM proces, dat zijn de volgende: het bepalen van de diameter van de spuitmond en het bepalen van de verhouding zaagsel en lijm. Als lijm werd normale houtlijm gebruikt dat droogt door middel van verdamping van water en meestal twaalf uur nodig heeft om volledig uit te harden. Het tweede verslag is geeft een voorbeeld, de balie, waarmee economische berekeningen in latere hoofdstukken wordt gedaan.

Voor het eerste experiment is een mengsel gemaakt van zaagsel en lijm met een verhouding van 1:1 volumeprocent. Het mengsel is met behulp van een spuit in een lijn neergelegd. De diameter van de spuitmond is tussendoor veranderd van 2,5 mm, 5 mm en 7,5 mm. Waar bij de eerste te veel druk ontstond, de tweede in een mooie streep resulteerde en de derde streep brak open.

Vervolgens kon de juiste verhouding zaagsel-lijm bepaald worden. De verhoudingen (zaagsel:lijm) 2:1, 1:1 en 3:4 volumeverhouding werden getest. Er werden drie lijnen getrokken en vrijwel direct drie lijnen daar bovenop. De verhouding 2:1 was moeilijk te extruderen en de lagen lijmden niet goed. Dat ging wel goed bij de verhouding 1:1. Het mengsel met verhouding 3:4 was te laagviskeus en stortte direct in.

Het is aangetoond dat een zaagsel-lijm mengsel geëxtrudeerd kan worden en dus mogelijk gebruikt kan worden in een FDM proces. Maar zowel de lijm (geen snelle uitharding) als de mengverhouding (aandeel hout te laag) zijn nog niet ideaal. Daarom zal allereerst een lijm gevonden moeten worden die snel uithard na extrusie, bijvoorbeeld die uitharden door middel van UV licht of op temperatuur. Ook moet deze goedkoop zijn, snel uitharden en het toestaan dat een hoog percentage zaagsel wordt verwerkt in het extrudaat.

## Commerciële toepassing van hout gebaseerde FDM?

Om het onderzoek te starten is het nodig te weten of hout wordt gebruikt als printmateriaal in commerciële 3D printers. De eigenschappen van die materialen bieden een startpunt daarvanuit kan onderzoek gedaan worden voor een verbeterd materiaal.

Er zijn op dit moment geen resultaten bekend van FDM printers die zaagsel rechtstreeks verwerken. De varianten die er wel zijn gebruiken hout in een tweetraps proces. Eerst wordt hout verwerkt in een filament en dat wordt vervolgens weer in een normale FDM printer voor kunststof gebruikt.

Dat soort houtfilament is in enkele merkvarianten te koop. Bij het overgrote deel daarvan word heel fijn houtzaagsel (wood flour) gemengd met een kunststof, bijvoorbeeld PLA. Daarbij bestaat het resultaat voor maximaal 40% uit hout en de overige 60% uit een kunststof of een mengsel van meerdere kunststoffen. Zie Figure 5 voor een vergelijking.

Waarschijnlijk zijn de verhoudingen op volume, maar dat is

Product	Material mixture based on:	Material 1	Percentage 1 (%)	Material 2	Percentage M2 (%)	Working temp. (°C)	Glass Trans. Temp. (°C)	Print speed (mm/s.)	Checked on:
woodFill	PLA	PLA/PHA	70	fine pinewood fibres	30	195-220	55	40-100	9-Apr
BambooFill	PLA	PLA/PHA	80	recycled bamboo fibres	20				9-Apr
Timberfill	biodegradable material based on wood					170-185			9-Apr
Laywoo - D3		binding polymer	60	recycled wood	40	175-250			9-Apr
wood filament for 3D printer	wood filament					220-260			10-Apr
fabEpoxy	Epoxy		50		50	<250°F			10-Apr
Wood-plastic filament						200-220			10-Apr
PolyWood	foaming material, no wood, prop. like PLA					210-220		30	10-Apr
wood pulp kt 001	thermoplastic resin	plastic composite		cellulose fiber	40	180-195			10-Apr
wood filament		binding polymer		recycled wood	35	230-260			10-Apr
BioFila Linen	Biopolymers, no PLA					180			10-Apr

Figure 5 - Eigenschappen van filamenten die hout bevatten.



niet gespecificeerd. De verwerkingstemperatuur ligt tussen de 170 en 260 graden Celsius. Een leuke eigenschap is het 'verbranden' van het hout bij de hogere temperaturen. Door het verhogen van de temperatuur krijgt het filament een donkerdere kleur en dat maakt het mogelijk om houtnerven te simuleren. (*3D printing wood with varying temperature (owl timelapse)* - Ultimaker, 2012)

Bij een enkel filament is gevonden dat de glas overgangstemperatuur ligt op 55 graden Celsius en de printsnelheid rond 40-100mm/s zou moeten liggen. Zie Figure 5; Woodfill.

Enkele bedrijfjes maken specialere filamenten. Bijvoorbeeld; in plaats van houtsnippers worden cellulose vezels gebruikt (Figure 5; wood pulp kt 001) of de thermoplasten worden van biopolymeren gemaakt (Figure 5; Biofila – Linen). Filamenten met grof zaagsel of met hout gevuld voor machines groter dan de thuis-3D printers bestaan niet.

De standaard afmetingen voor deze filamenten zijn 1,75 mm of 3,00 mm.

Samenvattend maken deze filamenten alleen gebruik van houtmeel. Dat is een klein deel is van het door Coors aangeboden zaagsel. Daar zit ook grof zaagsel en kunststof in. Het houtpercentage van de filamenten is laag (<40% op volume) en de te behalen verwerkingssnelheid is te laag (40-100 mm/s. met 1,75 of 3,00 mm filament) voor de beoogde toepassingen van Coors.

## Wetenschappelijk onderzoek naar 3D geprint hout.

### *Materiaal in filament*

In de wetenschap worden specifieke problemen onderzocht. De FDM methode biedt verwerkingsmogelijkheden voor vele thermoplastische materialen, ook in combinatie met keramiek of metaalpoeders. Het is gelukt om een nieuw composiet materiaal te maken met HAP (hydroxyapatiet)-gevulde deeltjes in een nylon polymeer. Met een zelfgebouwde extruder is het filament gemaakt, dat daarna direct gebruikt werd in een FDM machine. (Dudek, 2013) Met een mengsel van 30% houtmeel, 60% HDPE, 7% MAPP en 3% stearine smeermiddel, zouden grote producten met behulp van FDM gemaakt kunnen worden. Voorwaarde is wel dat het geen hoge sterkte eisen mag hebben. (Hui, Yuan, Long, & Wen, 2011)

### *Extrusie van gemengd materiaal*

Met een spuitgietmachine zijn de eigenschappen van PLA met houtvulling onderzocht. Met een mengsel van PLA 80%-houtmeel 20% gewichtsverhouding waren de resultaten op treksterkte goed. De buigsterkte gaf de hoogste waarde bij een mengsel van PLA 60%- Houtmeel 40% gewichtsverhouding. Een verhoging van de hoeveelheid houtmeel tussen de 20 en 40% beïnvloedt de buigsterkte en hardheid. (Ibrahim, Badrishah, Sa'ude, & Ibrahim, 2014) Een hoog percentage hout in het mengsel vermindert de hardheid en de buigsterkte van het materiaal.

## *Lijmen en hout gebaseerde materialen*

Er kunnen vele soorten bindmiddelen gebruikt worden. Bijvoorbeeld gips, methyl cellulose, natrium silicaat en cement. Volgens dit onderzoek is vooral cement een goed bindmiddel. Hierbij is ook gebleken dat als het bindmiddel alleen over de stof gespoten wordt het heel slecht de leegtes tussen de korrels van het droge materiaal opvult. (Henke & Treml, 2012)

Nieuwe 'groene' lijmsorten die bestaan uit mengsel van o.a. tannine en lignine zouden hele goede composteerbare oplossingen zijn. In dit onderzoek is een geperste houten plaat gemaakt met een combinatie van: 60% commerciële mimosa tannine met hexamine en 40% glyoxilaat naaldhout lignine. Dat resulteerde in een interne lijmkracht van 0,53 MPa. Dat is voldoende voor de waarde gesteld in de Europese standaard voor pershout. (Bertaud, Tapin-Lingua, Pizzi, Navarrete, & Petit-Conil, 2012)

Concluderend, het is dus mogelijk om zelf composiet materialen te maken en te gebruiken in een standaard FDM printer. Een mengsel met hout zou gebruikt kunnen worden voor grote meubels, maar de sterkte van het materiaal moet nog verbeterd worden, volgens (Hui e.a., 2011). Bij vergelijking van verschillende verhoudingen is er een piek te vinden in de sterkte-eigenschappen van het composiet materiaal met hout en kunststof (PLA), voor buigsterkte 60% PLA en 40% hout en voor treksterkte 80% PLA en 20% hout. Composieten met hoge percentages zaagsel hebben dus niet ook een hoge sterkte. Er zou een meest geschikte verhouding tussen prijs en materiaaleigenschappen gevonden kunnen worden.

In de onderzoeken blijkt dat het bindmiddel niet met een laag vaste stof mengt als het bindmiddel erover heen gespoten wordt. Het bindmiddel moet dus actief met de vaste stof gemengd worden. Een onderzoek laat ook zien dat cement een goed bindmiddel is. Door ook naar cement te kijken, naast de standaard lijmen, kunnen nieuwe toepassingen worden gevonden. Een bio-lijm is dus mogelijk ook in FDM printers te gebruiken om hout te binden. De sterkte is geschikt voor meubels. De lijm is echter alleen nog een product van onderzoek, een productievariant is niet bekend.

## Wat is de huidige staat van FDM 3D printen met laagdiktes > 5mm?

Op basis van de beoogde toepassing is berekend dat er geprint moet gaan worden met een spuitmond diameter range tussen de 5 en 20 mm. Door kennis te hebben van het printen op dit formaat kan dit nieuwe onderzoek hierop voortbouwen en de volgende stap zetten. Omdat bij het 3D printen op huidige schaal, de desktop 3D printers, zo veel mogelijk detail gehaald moet worden zijn er in verhouding weinig bronnen die het hebben over laagdiktes groter dan 5 mm.

Er zijn al wel een aantal meubels en gebouwen geprint. De gebouwen bestaan vooral uit bouwafval zoals puin en glas, samengevoegd met sneldrogend cement en een verharder. Het bedrijf Visun is daar al een langere tijd mee bezig. (3D

*printers print ten houses in 24 hours,* 2014)(*houseprinter.mov*, 2011) Het gaat dan om laagdiktes van ongeveer 10 cm. Hierbij wordt de Contour Crafting techniek gebruikt. Dat is een FDM proces waarbij de zijwanden van het geëxtrudeerde materiaal direct vlakgestreken wordt tijdens het printen. De printkop extrudeert het materiaal meestal naar een richting, het materiaal wordt dan begeleid door wandjes of een bocht in de spuitmond. Dat heeft als gevolg dat de printkop actief moet draaien om een nette bocht te kunnen maken. Drie voorbeelden zijn te zien in Figure 6.



Figure 6 - Het printen van producten van cement met Contour-Crafting

Een pionier op het gebied van meubels is de Nederlander Dirk van der Kooij, hij print met een robotarm (Zie Figure 7) meubels van kunststof. De printkop is een extruder die korrels kunststof verhit, smelt en druk opbouwt om te printen. De meubels worden opgebouwd uit lagen tot wel 3 cm. (*Dutch Profiles*, 2013)(*Stoelen uitprinten met 3D-printer*, 2013)

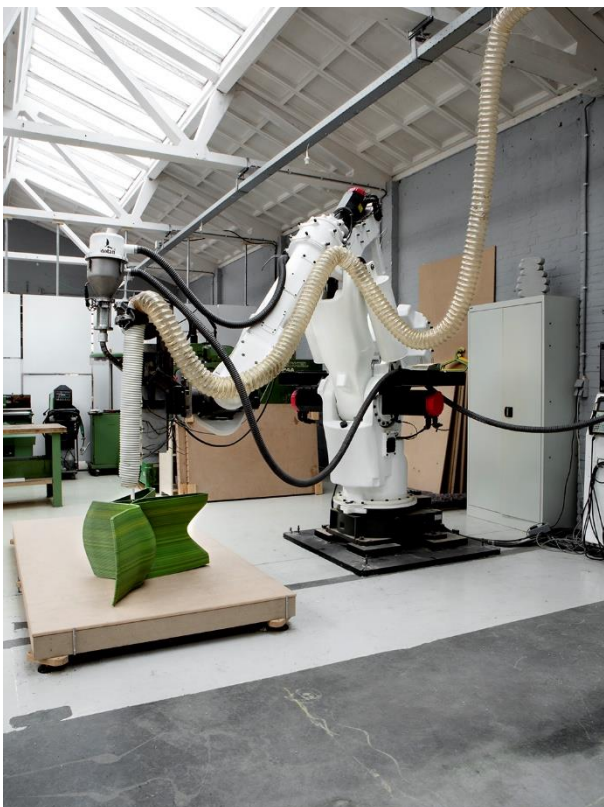


Figure 7 - De robot die Dirk van der Kooij gebruikt voor het produceren van meubels

Op YouTube zijn er ook vele filmpjes te vinden van 3D printers die klei of keramiek verwerken. Die hebben een spuitmond van ongeveer 2 mm tot 1 cm. (*Ceramic 3D Printing @ Medalta*, 2013)(*Ceramic Printing*, 2011)(*3D Clay Printer Fast Build*, 2013) De Potterbot is een printer die speciaal voor het printen van klei gemaakt is en kan met spuitmondjes vanaf 3,5 tot en met 16 mm printen. ("3D PotterBot Clay 3D Printer and Ram — DeltaBots", z.d.) In Figure 8 een afbeelding van een Potterbot en de test met een 16 mm spuitmond.



Figure 8 – Links een Potterbot, rechts een test met een spuitmond van 16 mm.

Het printen van laagdiktes die groter zijn dan 5 mm is mogelijk met meerdere machines en materialen. Met hout printen wordt vooralsnog alleen gedaan met de kleine commerciële 3D printers (laagdikte <1 mm).

## Conclusie

De grote printers worden voor grote producten gebruikt en het zijn unieke machines. Ze maken gebruik van opgeschaalde X, Y, Z tafels zoals in de standaard FDM printers of het zijn alternatieven zoals robotarmen en portaalkranen. Daarbij maken ze gebruik van bulk materiaal, niet van filament. Om daarmee te kunnen printen hebben ze een unieke printkop met speciaal materiaal voedingssysteem nodig. Er wordt geen gebruik gemaakt van steunmateriaal. En de oppervlakken worden soms tijdens het proces al verbeterd, zoals bij Contour Crafting.

Er kan worden gezegd dat het gebruik van kunststof filament, of een mengsel van houtmeel en kunststof extruderen geen opties zijn. De kosten van kunststof is te hoog en houtmeel is maar een klein percentage van het te gebruiken zaagsel. Lijmen worden alleen gebruikt bij producten met kleine

volumes. Mogelijk zijn lijmen wel geschikt voor grote houtsnippers en zijn er lijmen die kostentechnisch voldoen. Op basis van deze analyse zijn de volgende uitdagingen vastgesteld:

- Het verhogen van het percentage zaagsel naar >50% op gewicht.
- Het verhogen van de toelaatbare variatie in grootte van de houtsnippers.
- Het vinden van een goedkope lijm
  - o Die voldoende viskeus is.
  - o Waarvan het geëxtrudeerde mengsel vormvast is.
  - o Die belastbaar is met een volgende laag.
  - o Waarbij het uitgeharde mengsel voldoende sterkte heeft.
  - o Waarbij het uitgeharde mengsel na te bewerken is.

# Onderzoeksvraag en -opzet

## Wat is de situatie?

Coors interieurbouw is op zoek naar nieuwe mogelijkheden in de productie van interieurdelen. Vooral 3D printen is veelbelovend door de mogelijkheid om snel kromme vlakken te creëren. Dat geeft de ontwerpers meer vrijheid. Daarnaast heeft Coors zaagafval dat in het huidige systeem wordt afgevoerd. Bij 3D printen lijkt het een prima vulmiddel te zijn om nieuwe producten uit op te bouwen. Door het zaagsel opnieuw te gebruiken in producten zet Coors een stap verder in de Cradle to Cradle certificering. Een laatste doel dat Coors heeft is het ter plekke bij de klant bouwen van de interieurdelen door middel van 3D printen. Op die manier kunnen grote delen geprint worden die niet daar naar toe te transporteren zijn en kan de ontwerpvrijheid worden behouden.

## Opdracht en uitwerking

Er wordt door Coors op meerdere vlakken onderzoek gedaan naar het maken van interieurdelen met behulp van 3D printen. Zoals het printen met een natuurlijk kunststof (PLA), kunststof en mengsels van PPC met zaagsel. Daarbij zijn voornamelijk nog problemen met krimp van het materiaal tijdens het afkoelen, het niet-consistente mengsel van zaagsel en de verhouding van bind- en vulmiddel.

Om dat onderzoek te verdiepen is er een 3D printproces bepaald; Fused Deposition Modelling (FDM), waar de grootste potentie lijkt te liggen. In dit onderzoek worden de basiselementen van dit proces in combinatie met een nieuw zaagsel-lijm mengsel uitgetest voor toepassing in de interieurbouw en vervolgens wordt er een vooruitzicht geschetst van de mogelijkheden van de machine in de praktijk.

Er zijn vijf doelstellingen geformuleerd die de belangrijkste vragen van Coors zullen beantwoorden en structuur geven aan het onderzoek. De doelstellingen zijn:

- Waar bestaat de slurry (het zaagsel-lijm mengsel) uit dat gedeponeed wordt?
- Hoe wordt de slurry opgeslagen, getransporteerd en gedeponeed? (Interne onderdelen)
- Hoe blijft de slurry op zijn plek en wat zijn de eigenschappen na uitharding?
- Welke proces parameters resulteren in een economisch acceptabel proces?
- Welke onderdelen zijn nodig voor een opgeschaalde printer?

Om deze doelstellingen te halen zal met de kennis uit vorige hoofdstukken en de eisen van Coors een Programma van eisen worden opgesteld. Vervolgens wordt er per onderdeel van de 3D printmachine uitgezocht wat de eigenschappen daarvan moeten zijn voor de interieurbouw. Te beginnen met de juiste lijm, alle volgende eigenschappen hebben daar mee te maken. Daartoe hoort ook het zoeken naar de juiste

verhouding van lijm en zaagsel. De juiste lijm wordt eerst gezocht via een literatuuronderzoek, waaruit een aantal aanbevelingen zullen komen. Vervolgens wordt met eenvoudige experimenten bepaald welke goedkope, direct beschikbare lijm de juiste eigenschappen heeft. Na de depositie moet het mengsel op de plek uitharden tot een stevige constructie en is bewerkbaarheid een belangrijke factor. Met het gekozen bindmiddel wordt in verdere experimenten uitgezocht welke machineonderdelen nodig zijn voor een goed transport en depositie van het mengsel. De laatste hoofdstukken ondersteunen de opschaling van het proces. Er wordt uitgezocht voor welke proces parameters het voor Coors een economisch acceptabel proces is. En dat zal vertaald worden naar een voorstel voor een in de praktijk te gebruiken machine. Voor een volledige uitwerking van de aanpak van dit onderzoek zie het Plan van aanpak in bijlage B.

## Programma van eisen

Coors heeft een aantal doelen voor het project opgesteld. De belangrijkste eisen vertaalt uit de doelen van Coors zijn:

- Een nieuw proces en de bijbehorende beperkingen moeten ontwikkeld en uitgezocht worden.
- De Cradle 2 Cradle kringloop moet worden gesloten door het zaagafval te verwerken in nieuwe producten.
- Coors kan met het proces complexere interieurelementen maken zonder hogere kosten.
- Grote interieurdelen moeten op locatie geprint kunnen worden.

Naar aanleiding van het startgesprek met Coors zijn er specifiekere eisen geformuleerd:

- Het bindmiddel (de lijm) mag niet krimpen, moet snel uitharden in dikke lagen en moet recyclebaar zijn.
- De machine moet 1 liter materiaal per minuut kunnen deponeren. Voor een product van 1000 liter is de printer dan 16,7 uur bezig. Dat is een acceptabele tijd voor Coors.
- Het gedeponeede materiaal moet vormvast zijn, stapelbaar binnen een minuut en goed hechten aan de vorige laag.
- Het geprinte onderdeel moet verspanend na te bewerken zijn en oppervlakteverbetering moet uitgevoerd kunnen worden.
- Het geprinte onderdeel moet sterk genoeg zijn om de krachten van dagelijks gebruik te houden.

De volledige lijst eisen is te vinden in bijlage F.

## Literatuuronderzoek naar bindmiddelen

Om zaagsel te kunnen 3D printen is er een bindmiddel nodig waarmee de vezels aan elkaar worden bevestigd. Het bindmiddel is een materiaal met belangrijke eigenschappen, het is de matrix die het zaagsel vasthoudt en het geeft het product zijn sterkte. De gewenste eigenschappen van het bindmiddel worden niet alleen bepaald door het eindproduct, maar ook door het productieproces met de 3D printer. In dit hoofdstuk wordt een start gemaakt voor het kiezen van een juist bindmiddel. Vanuit theoriebronnen wordt er gezocht naar de perfecte lijm. Hierbij wordt ook contact gezocht met bedrijven. Een zo groot mogelijke variatie aan bindmiddelen wordt meegenomen. Bijvoorbeeld: Naast lijmen, wat de belangrijkste groep bindmiddelen is, bestaan er aantal hydraulische bindmiddelen. Die harden uit door middel van een reactie met water. Deze worden behandeld, maar zijn vooral interessant voor specifieke toepassingen. Bijvoorbeeld als een betonnen uiterlijk wordt gevraagd.

### Eisen aan het bindmiddel

Om de geschikte lijmen te bepalen is een lijst met eisen opgesteld waar aan de lijmen moeten voldoen. De ervaring in de werkplaats leert dat hobbylijmen een stuk zwakker zijn dan twee componenten epoxylijmen. Om te beginnen kan uit worden gegaan van de eigenschappen van de epoxylijm. Bij het startgesprek bij Coors zijn er voorbeelden gegeven van meubels die met PLA geprint zijn. Door de krimp van het materiaal bij het afkoelen ontstaan er spanningen en breekt het product. Volgens (CES Edupack, z.d.) heeft een "General PLA" een krimpfactor van 126-145 microrek/°C. PLA wordt geprint op ongeveer 220 graden en koelt af naar kamertemperatuur, ongeveer 20 graden. De hoeveelheid krimp is dan:

$$1,3 * 10^{-2} * 200 = 2,6\%$$

Om te voorkomen dat de spanningen ontstaan moet de krimp zeer klein gehouden worden. Vanzelfsprekend moet het bindmiddel een goede hechting kunnen verkrijgen met het zaagsel, maar ook met zichzelf omdat het in dikke lagen wordt toegepast. Door het mengen van een vloeistof met een bepaalde mate van vaste (poeder)stof wordt de viscositeit van het mengsel

hoger. Als de vaste stof niet aangepast kan worden moet de vloeistof zo laag viskeus mogelijk gekozen worden, zodat er zo veel mogelijk vaste stof doorheen gemengd kan worden. Door middel van experimenteren kunnen de waardes hiervoor bepaald worden.

Een van de belangrijkste eigenschappen is de uithardingssnelheid van het bindmiddel. Het bindmiddel moet direct na het deponeren zo snel mogelijk uitharden, maar mag dat niet in de 3D printer doen. In het hoofdstuk Economische aspecten is een voorbeeld gegeven van een product van 1000 liter en dat 1200 mm hoog is. De uithardingssnelheid per laag is te berekenen. De laagdikte wordt gesteld op 15 mm.

$$Aantal\ lagen = \frac{1200}{15} = 80$$

De productietijd is vastgesteld op 6,55 uur. (Zie hoofdstuk Economische aspecten)

$$Tijd\ per\ laag = \frac{6,55}{80} * 60 = 4,91\ minuten$$

Het mengsel moet dus een volgende laag kunnen dragen binnen 5 minuten.

In tegenstelling tot de lijm zelf moet het mengsel van lijm en zaagsel een hoge viscositeit hebben. Daardoor kan een gedeponeerde deel in zijn vorm blijven zonder uitgehard te zijn. Als het sterk genoeg is voor een tweede laag kan de uithardingstijd langer zijn doordat de vormvastheid al gegarandeerd is. Vormvastheid is een eis die vanaf het deponeren geldt, voor en na het uitharden. Uiteindelijk is het doel om milieubewuste producten te maken, daarom is er een voorkeur voor recyclebare lijmsorten.

Kortom; Er is voor gekozen dat de krimp van het materiaal na deponeren niet groter mag zijn dan 1%. Een deel van de krimp komt door uitzetting onder invloed van warmte, daarom hebben bindmiddelen die geen warmte nodig hebben de voorkeur. Dat de lijmen goede hechteigenschappen hebben met hout en goede vuleigenschappen (hoge interne hechting) hebben is een belangrijke eigenschap. De lijm moet laagviskeus zijn om het meeste zaagsel te kunnen bevatten. (Viba, Movam, z.d.) Maar het mengsel moet hoogviskeus zijn om tot uitharding vormvast te zijn. De uithardingstijd moet binnen vijf minuten liggen of de vormvastheid van het materiaal moet een langere tijd toelaten.

Een tabel van deze eisen is te vinden in bijlage H. **Error! Reference source not found.**

# Eigenschappen van lijmen

## Synthetische lijm

### Classificatie van lijmsorten

Als consument zijn er een aantal lijmen bekend, bijvoorbeeld de hobbylijm, de Pritt stift, houtlijm en de siliconenkit. Dat is eigenlijk maar een heel klein deel van het hele assortiment. Naast de consumentenmarkt is er een markt voor vakmensen in de bouw en de markt voor industriële lijmen. Classificatie van lijmen kan op vele manieren. Onder andere op manier van uitharding, de staat van de lijm bij kamertemperatuur of de origine van de lijm. Voor een overzicht van lijmsorten, in Figure 9 is een classificatie van lijmen weergegeven op basis van herkomst en uithardingsprincipe.

### Geschikte lijmen

Een groep lijmen met de sterkste eigenschappen zijn de constructielijmen. Die hebben over het algemeen de sterkste verbindingen en de volgende lijmen vallen daar onder: Epoxylijmen (één en twee component formules); Acrylaatlijmen (twee component en twee-stap formules); Urethaanlijmen (twee component formules); en Cyanoacrylaten ("instant lijmen"). Ze worden in de bouw en industrie gebruikt voor toepassingen met veel trillingen, krimp en uitzetting van materialen en toepassingen waar veel kracht op staat. Daarnaast geeft (Kals, 2007) aan dat fenol- en epoxylijmen de meest hoogwaardige verbindingen leveren.

Doordat de constructielijmen zo sterk zijn, geven ze een ideale basis voor grote constructies zoals meubels.

### Geavanceerde lijmen en toevoegingen

Lijmen die te gebruiken zijn bij het 3D printen zullen aan een aantal eisen moeten voldoen. Daarvan zijn de belangrijkste, weinig tot geen krimp vertonen, snel een basisuitharding hebben na extrusie en volledig uitharden. Er zijn technologieën binnen de lijmbranche die die eisen mogelijk maken.

De eerste heet Cure-on-demand, dat geeft aan dat een lijm uithard op het exacte moment dat de gebruiker dat wil. Dit kan gedaan worden met een aantal technologieën in de lijm. Een aantal lijmen zijn geschikt om uit te harden door middel van UV licht. De lijm wordt dus op de plek aangebracht en daarna wordt het met een sterke UV lamp beschenen, waardoor een chemische reactie start en de lijm uithard. De lijm kan van te voren in een donkere kamer bewaard en gemengd worden. In plaats van UV licht kan ook gebruik worden gemaakt van warmte dat een reactie zal versnellen of activeren. De bron daarbij kan verschillen, zoals een oven, een infrarood lamp of een inductiemethode. Een meer hightech methode is het gebruik van een lijm met microcapsules. In de microcapsules zit de verharder of de katalysator van de lijm. De capsules zijn in de lijm gemengd. Door warmte of druk uit te oefenen op de lijm breken de microcapsules, komt de katalysator vrij en wordt de reactie in gang gezet.

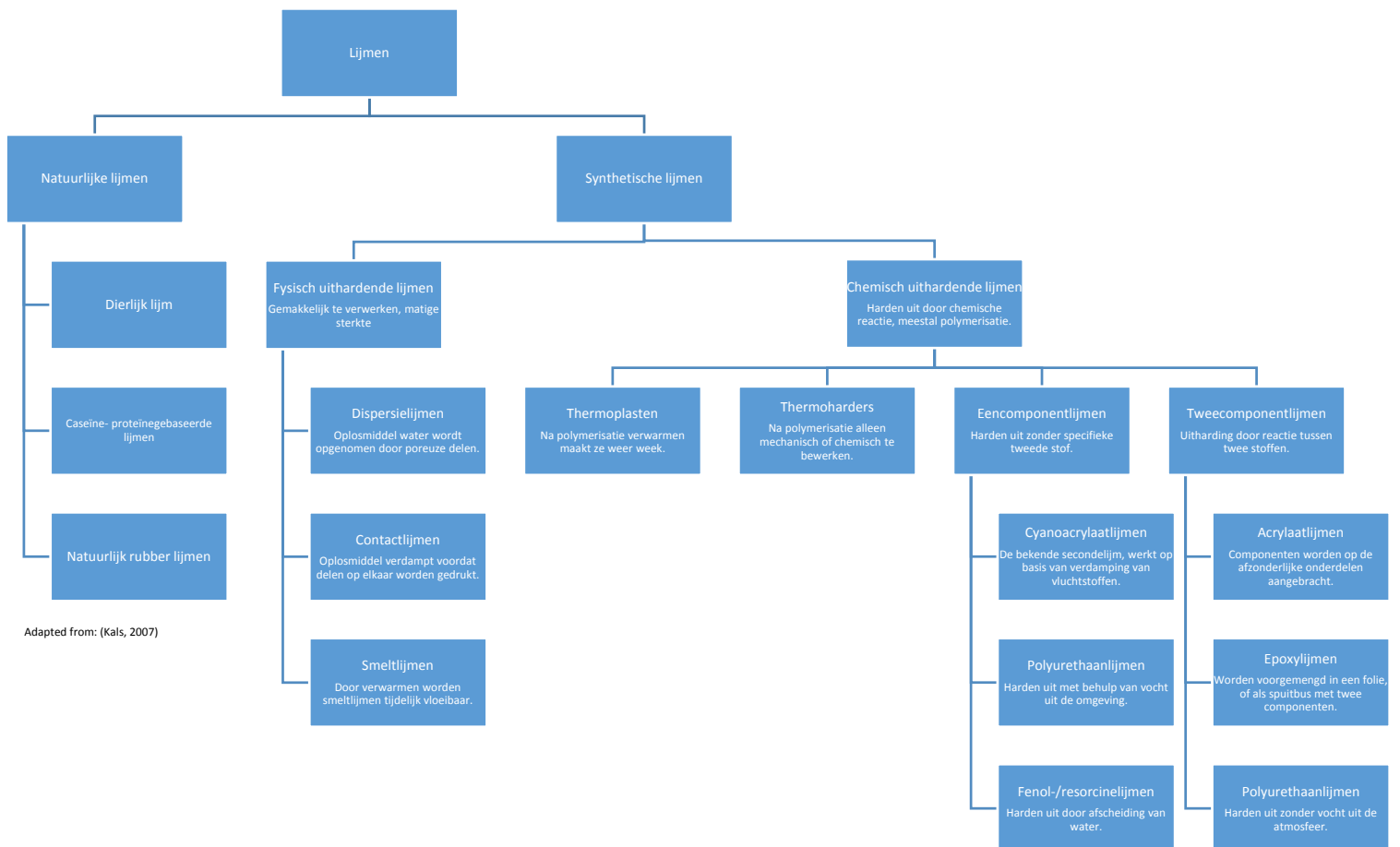


Figure 9 - Categorisatie van lijmen door herkomst en uithardingsprincipe. De belangrijkste eigenschap is beschreven.

De tweede technologie is het Shadow Curing proces, vooral toepasselijk bij UV-uithardende lijmen. In grotere laagdiktes of als de lijm gevuld is met een vaste stof kan het UV licht niet volledig doordringen of alle plekken lijm bereiken, met als gevolg dat de lijm niet volledig uithardt en zijn maximale sterkte dus niet behaald. Het dan nodig een secundair uithardingsmechanisme toe te passen. Bijvoorbeeld wordt er gebruikt gemaakt van anaerobe uitharding, lijmen die uitharden zodra ze geen contact met lucht meer hebben. Of het verhitten van de lijmverbinding voor lijmen die uitharden door middel van warmte. (by & Ebnasajjad, 2009b)

Deze technologieën hebben wel een prijs, de kosten voor de lijm worden snel verdrievoudigd. Daarnaast moet nog apparatuur aangekocht worden, zoals de UV lampen. De kosten voor twee component epoxylijmen liggen rond €50,- tot 100,- per kilo volgens (Viba, Movam, z.d.), echter geeft ("Best Quality Construction Clear Epoxy Resin Ab Glue For Ceramic Tiles - Buy Clear Epoxy Resin Ab Glue For Ceramic Tiles, Best Clear Epoxy Resin Ab Glue For Ceramic Tiles, Construction Clear Epoxy Resin Ab Glue For Ceramic Tiles Product on Alibaba.com", z.d.) €0,90/Kg aan, UV lijmen zijn prijziger met €300,- tot 800,- per kilo. Een hotmelt lijm begint rond de €200,- en is gemiddeld €300,-. (Viba, Movam, z.d.)

Eigenschappen van lijmen zijn veelal te verbeteren door de juiste lijm mengsels te maken. Voor elke lijm zijn er een tal van additieven die de eigenschappen kunnen verbeteren. Daarbij is veel chemische kennis nodig om goede resultaten te behalen.

Toevoegingen zijn: dikmakers (verhoog viscositeit of stijfheid), verdunners (verlaag viscositeit), weekmakers en verharders en versnellers kunnen de uithardingstijd beïnvloeden. ("Choosing and using a structural adhesive", z.d.) Verder zijn er ook: Vullers, dragers of versterkers, remmers, vertragers, kleefkrachtversterkers, filmvormers, antioxidanten, antischimmelmiddelen en oppervlakte-actieve stoffen; die de eigenschappen van de lijm kunnen verbeteren. (by & Ebnasajjad, 2009a)

## Natuurlijke lijmen

"*Biologisch afbreekbare lijmen zijn op basis van natuurlijke producten, zoals: polysacharide of zetmeel, cellulose, lignine, bepaalde proteïnen, natuurrubber, gefermenteerde suikers en andere. De lijmsorten worden vooral gebruikt voor de consumenten- en papierverpakkingsnijverheid.*" (Clement, z.d.)

PLA is een natuurlijk kunststof uit polylactide (polymelkzuur). Bij het maken van meubels voor Coors uit PLA zorgt de krimp voor een vervormd product. Op het forum van Ultimaker wordt een krimp opgemerkt van 0,2-3% ("PLA shrinking | Ultimaker", z.d.) en 0,25-0,3% ("PLA shrink factor | Ultimaker", z.d.). Onder het kopje Eisen aan het bindmiddel is aangegeven dat "General PLA" een krimp heeft van 2,6%. Dus de printervaringen zijn dus vrij positief. 30% glass filled PLA heeft volgens (CES Edupack, z.d.) een krimp van 87-91,5 microstrain/°C. Dat maakt:

$$90 * \frac{200}{10000} = 1,8\% \text{ krimp}$$

De krimp wordt dus minder naarmate er meer vaste stoffen in het mengsel aanwezig zijn. Dit wordt ook bevestigd door mensen die met WoodFill of LayWoo-3D printen, de filamenten met ongeveer 30% houtvulling bij PLA kunststof. ("ColorFabbs new WOODFILL PLA ... hehehe", z.d.) Dus door PLA te vullen kan een deel van de krimp voorkomen worden. Waardoor het toch geschikt kan worden voor het 3D printen van meubels.

PHA staat voor polyhydroxyalkanoaten. Het zijn kunststoffen die worden gemaakt door fermentatie van o.a. suikers door microbacteriën. Door verschillende soorten te mixen en toevoegingen te gebruiken kunnen mechanische en bio-eigenschappen worden aangepast. PHA's zijn thermoplastisch, stabiel onder UV-licht, kunnen temperaturen van 180°C aan en zijn te verwerken op conventionele machines. ("Polyhydroxyalkanoates", 2015)

Lignine is het onderdeel van planten dat de stevigheid geeft. Met bepaalde chemische processen wordt daar lijm van gemaakt. Dat wordt voornamelijk in kleine volumes gedaan door de Universiteit van Wageningen. Daar is een onderzoeksgroep bezig met de verwerking en nieuwe toepassingen van lignine, zo ook in producten van hout. (Contactformulier, z.d.) Commerciële productie van hun lijm is nog niet gestart. Volgens (Pizzi, 2006) heeft lignineliem een zeer lange productietijd bij plaatmateriaal, door lange uithardtijden. Echter, geeft (Imam, Bilbao-Sainz, Chiou, Glenn, & Orts, 2013) aan dat lijmen met aangepaste lignines voldoen aan de EN 314-1:1993 standaard voldoen en dus vergelijkbaar zijn met fenol-formaldehyde lijmen met synthetische fenolen. En dat deze lijmen door een aantal bedrijven wordt gebruikt in de productie.

Caseïne wordt in de industrie gebruikt voor etiketterlijmen. Dat is voornamelijk door de steile viscositeitscurve. Met geringe warmte is deze lijm al zeer vloeibaar en wordt na afkoelen snel hoogvisceus. Met bepaalde toevoegingen is deze lijm geschikt voor redelijk belastende toepassingen, maar de weerstand tegen water en warmte zijn slechter dan bij de synthetische lijmen. ("Caseïnes", z.d.) Caseïnes zijn deels natuurlijke lijmen met enkele kunstmatige toevoegingen. De lijmen zijn erg hoogvisceus, bijvoorbeeld 90.000 mPa\*s. (Sauer, z.d.)

Naar soja-gebaseerde lijmen wordt veel onderzoek gedaan. (Xiaofeng Ren en Mark Soucek, 2014) (Frihart & Birkeland, 2014) (Huang & Li, 2007) (Liu & Li, 2007) (Zhu & Damodaran, 2014) en volgens (Pizzi, 2006) en (Imam e.a., 2013). Als basis heeft het weinig hechtkracht, maar met toevoegingen worden de hechtkracht en de waterafstotende eigenschappen sterk verbeterd. Daarnaast blijft de composteerbaarheid behouden. Er zijn enkele van deze onderzoeken geven aan te hebben getest met houten platen en boeken resultaten die toepasbaar zijn in de meubelbouw. En zelfs standaarden van de houtlijm industrie overtreffen. (Imam e.a., 2013)

Zetmeellijmen zijn opgelost in water, verhouding: 30% poeder, 70% water.) Het drogingsproces is daardoor minimaal 1 dag. (Sauer, z.d.) Daarnaast zal de lijm weer loslaten als het in contact komt met water. Een voorbeeld van gebruik van deze lijmsoort is behanglijm, lijm voor papieren zakken en enveloppenlijm. ("Adhesive applications", z.d.)

## Hydraulische lijmen

Cement is een bindmiddel voor beton en metselspecie. Er zijn verschillende varianten van cement, zoals: Portlandcement, Portlandvliegascement en hoogovencement. Elk heeft ander eigenschappen, waarbij Portlandcement het snelste uithard. Cement verhard door toevoeging van water en verlijmt dan de toeslagmaterialen zoals zand en grind. ("cement", z.d.) Cement wordt gemengd met grind voor beton, waarschijnlijk kan ook hout als vuller werken voor producten die een lagere sterkte eisen. Producten van cement zijn op dit moment een trend, vooral als woonartikelen. Het hoeft dus geen nadeel te zijn dat producten niet op hout lijken. Cement kan goedkoop zijn (0,50€/Kg), maar heeft dan 15 minuten nodig om uit te harden.

Gips en Kalk zijn ook veelgebruikte bindmiddelen in de bouw. ("bindmiddel", z.d.) De werking is gelijk aan die van cement. Door de opname en reactie met water harden de hydraulische stoffen uit en lossen vervolgens niet meer op in water. Deze materialen zijn alleen zwakker dan uitgehard cement.

Anhydriet is een watervrij gips dat veel wordt gebruikt als gietvloer voor grote oppervlakken of ter reparatie van het oppervlak. Voor die toepassingen is het zeer geschikt door de vloeibare eigenschappen, die veel beter zijn dan bij een zandcementvloer. De chemische formule is  $\text{CaSO}_4$  en bevat ook een paar procent calciumfluoride en de gedehydrateerde vorm van gips. Gips is de gehydrateerde vorm:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Anhydriet heeft tijdens de droging en verharding een grote vormvastheid. De drogingstijd is 1cm per week, echter zijn de vloeren na 1 dag al beloopbaar. Er wordt wel een film gevormd als toplaag die verwijderd moet worden om het anhydriet goed te laten drogen. Als hulpstof bij cement wordt het gebruikt als bindtijdregelaar, zodat de reactie van cement met water afremt. ("anhydrietvloer", z.d.)

De eigenschappen van bio-lijmen doen op dit moment nog onder voor de anorganische lijmen. Bijvoorbeeld door de slechte weerstand tegen water. Deze eigenschappen kunnen verbeterd worden door toevoegingen, waardoor ze standaard houtlijmen kunnen overtreffen, maar hoofdzakelijk zijn deze lijmen nog in onderzoek voor een door de industrie algemeen geaccepteerde lijm.

3D printen met cement is volop in ontwikkeling. Het wordt vooral in grote producten, met weinig detail toegepast. Cement kan een oplossing zijn voor niche producten, maar voor producten van Coors is de houtverwerking het belangrijkste.

## Conclusie

Cement als lijm gebruiken wordt niet aangeraden doordat het waarschijnlijk niet voldoende vormvast is en weinig belastbaar is.

Door de slechte beschikbaarheid en hoge kosten van natuurlijke lijmen is het aan te raden om voorlopig de synthetische lijmen te gebruiken.

Speciale technologieën zoals uitharden bij UV licht, micro-encapsulated lijmen en Shadow curing zijn heel snel. Maar daartegenover zijn ze erg duur. De kosten voor een UV lijm ligt tussen de €300,- tot 800,- per kilo. Daarom wordt er niet voor deze lijmen gekozen.

Twee component epoxylijmen zijn een stuk goedkoper: tussen €0,90 en 100,- per kilo. Ze kunnen worden gebruikt als vulmiddel dus ze hebben weinig krimp en ze kunnen laagviskeus zijn. Daarom wordt er aan geraden om gebruik te maken van twee componentenlijmen. Zoals epoxy, polyester of polyurethaan.

## Verder onderzoek

Er is veel specialistische kennis nodig, vooral als er naar nieuwe toepassingen of mengvormen van lijm wordt gekeken. Een lijmspecialist of chemicus kan waarschijnlijk een stap verder gaan en een lijm samenstellen met de juiste eigenschappen. Bijvoorbeeld uitharden door middel van infrarood straling zonder veel invloed te hebben op de krimp van het materiaal.

Kunststoffen, dus ook lijmen trekken vocht aan, een probleem zou kunnen zijn dat het ingekapselde hout onder de invloed van dat vocht komt te staan en zou kunnen uitzetten of schimmelen. (Viba, Movam, z.d.)



## Experimenteel onderzoek naar zaagsel-lijm mengsels

In het vorige hoofdstuk is er door middel van een theorieonderzoek gezocht naar het meest geschikte bindmiddel. In dit tweede deel van de opdracht wordt er door middel van experimenteel onderzoek gezocht naar een materiaal en proces dat met een FDM 3D printer uitgevoerd kan worden. De basis van het materiaal is het zaagsel. Voor het bindmiddel wordt er gestart met goedkope, algemeen verkrijgbare lijmen. Met de conclusies van de experimenten worden oplossingen gezocht om toe te passen in het volgende experiment. Op deze manier kan er met weinig middelen een concept voor een 3D printproces opgezet worden en er wordt een basis van informatie gelegd die inbreng geeft voor een opgeschaalde printer. In bijlage N zijn de volledige beschrijvingen van de experimenten toegevoegd.

### Vorbereiding zaagsel

Voordat de experimenten gedaan kunnen worden is het nodig om het zaagsel van Coors te controleren of het direct geschikt is voor de experimenten.

In het ruwe zaagsel dat direct uit de fabriek van Coors kwam zijn er stukjes hout gevonden die meer dan 2 cm lang waren en 2 mm breed. De andere stukjes zijn kleiner tot zo fijn als houtmeel. Figure 10 is een afbeelding van het zaagsel.



Figure 10 - De grootte van de zaagseldeeltjes is gevarieerd.

Om verstoppingen in de experimenten te voorkomen zijn van de ruwe mix 3 grofheden gezeefd. De zeven hadden gaatjes van 10 mm (

Figure 11), 3mm (

Figure 12) en 2mm (

Figure 13). De 10 mm zeef haalt alleen de grote (harde) stukken uit het zaagsel. Dan is bekend wat de afmetingen van de grootste stukken zijn, zodat het zonder verstoppingen of schade gebruikt kan worden in experimenten. De andere

twee zeven behalen een fijnere graad zaagsel, waarbij het filtraat van de 2mm zeef twee maal is gezeefd. Door met alle drie de variaties te experimenteren kan het effect van deeltjesgrootte op het mengsel zichtbaar worden. Er is niet gemeten welk percentage zaagsel overblijft, maar door het te malen in plaats van te zeven zou in theorie alles gebruikt kunnen worden.



Figure 11 - Zeef met 10 mm gaatjes.



Figure 12 - Zeef met 3mm gaatjes



Figure 13 - Zeef met 2mm gaatjes. De fijne graad is hiermee twee maal gezeefd.

Verwacht wordt dat fijner zaagsel mogelijk betere eigenschappen heeft dan groffer zaagsel, zoals lager lijmvverbruik en betere vloeibaarheid als gevolg van kleinere tussenruimtes en minder in elkaar grijpende vezels. Als het mengsel groffer is zal ook het oppervlak van het product groffer zijn en is er een grotere kans dat er luchtopsluitingen ontstaan. Dat verhoogt de mate van benodigde nabewerking.

Uiteindelijk is alleen het filtraat van de 3 mm zeef gebruikt bij de experimenten. De duur van de experimenten gaf geen mogelijkheid om daarin te variëren. De invloed van de grofheid is daarom niet bekend en zal in verder onderzoek gevonden kunnen worden.

## Experimenten

In dit hoofdstuk worden de experimenten kort beschreven en de belangrijkste resultaten voor het onderzoek gepresenteerd. De volledige beschrijvingen van de experimenten kunnen gevonden worden in bijlage N.

### Samenvatting experiment 1 – Verschillende soorten lijmen

Het eerste experiment onderzoekt welke algemeen verkrijgbare lijmsorten het beste presteren op de gebieden: uithardingstijd, stapelbaarheid, vormvastheid, extrudeerbaarheid.

De lijmen die zijn gebruikt in het experiment zijn: muurvuller, allesvuller, polyesterplamuur, behanglijm en contactlijm. In Figure 14

zijn de percentages zaagsel dat toegevoegd kon worden aangegeven. Figure 15 is een foto van de opstelling van het experiment. De lijmen en het zaagsel zijn afgemeten op volume en in de bakjes gedaan. Vervolgens wordt het zaagsel bij het lijm gevoegd en gemengd met een roerstokje. Zie

Figure 16. Daarna wordt het mengsel in een kitkoker gedaan en het kitpistool gaat daar om heen. Met de kitspuit worden drie strepen op de plank gedeponerd. (Figure 20) Tussendoor wordt de spuitmond afgesneden, zodat de spuitmond 5, 10 en 13 mm groot was. Met het materiaal dat nog over is worden twee strepen van 13 mm. op elkaar gedeponerd. (Figure 19) Doordat er geen meetapparatuur is gebruikt zijn alle waarnemingen, behalve de uithardingstijd, verhoudingsgewijs en zonder waarden.

Lijm	Percentage zaagsel (vol.%)
Muurvuller, Alabastine	15-25%
Behangplaksel, Base Line	40%
Contactlijm, Bison Kit	50%
Polyesterplamuur, Soriso	~<10%
Allesvuller, Alabastine	40%

Figure 14 - Tabel met de lijmsorten die gebruikt zijn in experiment 1 met het percentage zaagsel op volume.



Figure 15 – Experimentopstelling



Figure 16 - Zaagsel gemengd met behanglijm

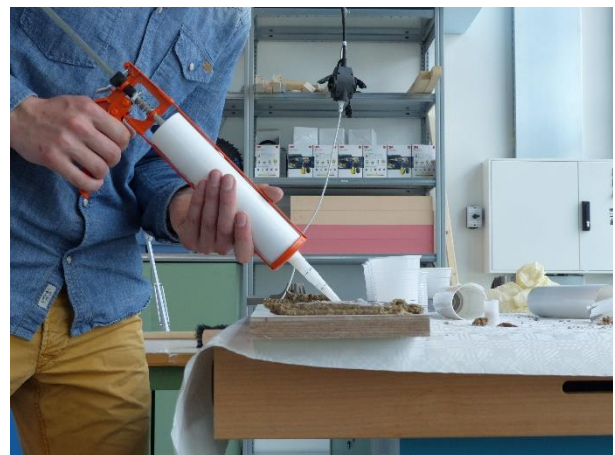


Figure 17 - Deponeren van de strepen

Het resultaat is dat polyesterplamuur relatief de beste eigenschappen heeft; binnen 15 minuten heeft het een basisuitharding, na 90 minuten is het volledig uitgehard. De viscositeit is hoog, het is al een pasta. Daardoor is de vormvastheid uitstekend, geen verandering te zien. Er wordt verwacht dat de stapelbaarheid geen probleem is met deze viscositeit, dat is echter niet getest door de snelle uitharding. Het extruderen was door de hoge viscositeit ook het zwaarst van te geteste lijmen. En door de hoge viscositeit van deze twee componenten harslijm kan er weinig zaagsel doorheen gemengd worden, maximaal 10% zaagsel op volume. Sterke tweede keus is de muurvuller, vormvast, stapelbaar, maar ook iets bros. De contactlijm en behanglijm zakken in

doordat de grote hoeveelheid oplosmiddel in de lijm verdamp. Deze vormverandering is onacceptabel. De allesvuller heeft de slechtste eigenschappen, die is zeer bros na uitharding en daarom ongeschikt om een meubel mee te bouwen.



Figure 19 - Testen van de stapelbaarheid van verschillende lijmsoorten. V.o.n.b.: Contactlijm, polyesterplamuur, behangplaksel, muurvuller, allesvuller

#### Conclusie experiment 1

De polyesterplamuur heeft de beste resultaten gehaald. Een groot probleem is de hoge viscositeit, waardoor er weinig zaagsel doorheen gemengd kan worden. Harslijmen, zoals polyesterplamuur, zijn in vele viscositeiten beschikbaar. Dus door een nieuwe harslijm te kiezen kunnen de goede eigenschappen behouden worden en kan voor een juiste viscositeit gekozen worden.

#### Keuze bindmiddel

##### Eigenschappen van het bindmiddel

Polyesterplamuren hebben volgens ("Vosschemie", z.d.) een viscositeit van ongeveer 40.000 mPa\*s. In het eerste experiment is gevonden dat dat veel te hoog is. Het bindmiddel moet in ieder geval vloeibaar zijn en beter is een zo laag mogelijke viscositeit.

Met behulp van de tabel in Figure 18 wordt geschat dat de viscositeit van het bindmiddel ongeveer hetzelfde zal kunnen zijn als van olijfolie, dus rond 85 mPa\*s. Bij deze viscositeit worden harslijmen vooral als giethars gebruikt. Er wordt daarom in die productgroep verder gezocht.

Geschat wordt dat een spuitmond van 15 mm zal voldoen voor de printer. Om er zeker van te zijn dat de giethars goed uithard zal een laagdikte van 30 mm, het dubbele van de spuitmond, geen probleem moeten zijn.

Krimp mag geen probleem opleveren dus de eis van een krimp <1% staat ook voor de gietharsen.

De verwerkingstijd van de hars zal tussen de 10 en 30 minuten moeten liggen. Daardoor is er genoeg tijd om te

Stof	[mPas*]
Water	1
Bloed	4-25
Olijfolie	85
Verf	100
Yoghurt	150
Latex	200
Chocoladesaus	280
Botercreme (zuur)	550
Gelatine	1200
Appelmoes	1500
Glycerine	1500
Bijenhoning	2000
Mayonaise	2500
Handcreme	8000
Boter	30.000
Asfalt	$10 \cdot 10^5$
Bitumen	$10 \cdot 10^{11}$
Glas	$10 \cdot 10^{18} - 10 \cdot 10^{20}$

**\*) Waarden afhankelijk van temperatuur en afschuifkracht**

Overgenomen en aangepast van: ("Wat is viscositeit", z.d.) en ("Viscosity\_EN\_2012\_lijst\_viscositeiten.pdf", z.d.)

Figure 18 - Tabel Viscositeiten van bekende stoffen



Figure 20 – De gedeponeerde strepen. Stukjes zijn afgesneden om de uitharding te bekijken. V.l.n.r: Allesvuller, muurvuller, behangplaksel, polyesterplamuur, contactlijm.

testen. Tijdens het gebruik in een 3D printer zal de lijm veel sneller verwerkt kunnen worden en is een kortere verwerkingstijd mogelijk. Die optimalisatiepunten kunnen worden doorgevoerd als een 'Proof-of-concept' is gegeven. Als laatste is de aanschafprijs een onderdeel waarop een keuze gemaakt kan worden. Voor de gietharsen die gebruikt worden tijdens de proef wordt de keuze gemaakt op basis van viscositeit, verwerkingstijd en kostprijs.

### Gietharsen

Er zijn drie veelgebruikte gietharsen, op basis van: polyester, polyurethaan en epoxy. ("Poly-Service de shop voor polyester, epoxy, glasmatt, coatings en meer", z.d.)("Polyesterhars & epoxyhars - Harjonpolyester.nl", z.d.)("Polyestershoppen.nl - Leverancier in polyester en epoxy", z.d.)("Carbonwinkel.nl", z.d.)("polyester en epoxy online polyester epoxy kopen", z.d.) De vergelijking van gietharsen voor de aankoop is te vinden in bijlage K. Polyesterhars is de goedkoopste variant, maar zou wel meer krimpen dan de andere harsen, echter is dat in deze vergelijking niet terug te vinden. De polyesterhars heeft dezelfde viscositeit als de epoxyhars en is daarom met een gelijke hoeveelheid vulstof te mengen: 50%. Epoxy is geschikt voor vele doeleinden, maar heeft het nadeel dat het na verloop van tijd vergeeld onder invloed van UV licht. De maximale laagdikte is ongeveer 30 mm voor alle gietharsen. Als de giethars wordt gevuld kan de laagdikte oplopen tot ongeveer 100 mm. Polyurethaan is ook veelzijdig, deze hars kan een lage viscositeit halen en heeft een korte uithardtijd. Door de lage viscositeit is hierbij ook het meeste vulstof aan toe te voegen. Zonder vuller is de uithardtijd tussen de 6 tot 8 minuten en met vuller rond de 10 minuten. ("Giethars Academie Polyesterigant: Alles over gietharsen en gieten", z.d.) Dat maakt het testen met veel handelingen lastig. Polyurethaan is de duurste harssoort in deze vergelijking.

De polyurethaan giethars van Smooth-On heeft een lage viscositeit terwijl het 20 minuten verwerkingstijd heeft. Binnen deze vergelijking is dat de beste combinatie. Daarom wordt voor die giethars gekozen om verder mee te experimenteren. De uithardtijd van de giethars is 90 minuten, hiervan wordt geen probleem verwacht doordat de viscositeit van het zaagsel hoog genoeg wordt om een vormvaste streep te maken.

Een bijkomend voordeel is dat deze giethars onderdeel is van de Task serie, dat is de serie voor hoog belastbare gietharsen. De eigenschappen van de Task 3 zijn in bijlage L toegevoegd. De flessen van de Task 3 giethars zijn weergegeven in Figure 21.

Er wordt nu verder geëxperimenteerd met synthetische lijmen, omdat die beter beschikbaar en goedkoper zijn dan biologisch verantwoorde varianten. Als na de experimenten een geschikte lijm is gevonden, zijn de benodigde eigenschappen bekend en kan via een directere route een bio-lijm gezocht worden.



Figure 21 - Task 3 polyurethaan giethars van Smooth-On

### Samenvatting experiment 2 – Percentage zaagsel

Voor het tweede experiment is de Smooth-On Task 3 twee componenten giethars uitgezocht die een viscositeit heeft van 150 mPa\*s. Door de lage viscositeit kan er veel vaste stof -het zaagsel- doorheen gemengd worden.

Bij dit experiment is het doel het geschikte percentage zaagsel te bepalen voor het mengsel.

In een bakje en met een mengstokje worden mengsels gemaakt van de giethars met het zaagsel. Er wordt steeds 18,3 gram giethars gebruikt, waarvan 10 gram component A, 8,3 gram component B. De hoeveelheid toegevoegd zaagsel per mengsel staat in Figure 22. Er worden vanaf dit experiment gewichtsverhoudingen gebruikt, omdat die exacter af te meten zijn.

Zaagsel (gram)	Zaagsel (%)
1,83	9,1
3,66	16,7
7,32	23,1
5,49	28,6
9,15	33,3
12,81	41,2

Figure 22 - Tabel met hoeveelheden toegevoegd zaagsel

Met kleine spuitjes van 10 mL wordt het mengsel geëxtrudeerd. Enkele spuitmondjes zijn opgeboord naar 13 mm. Bij andere spuitjes is de kop afgesneden, waardoor de opening ongeveer 15 mm is. Het verschil is te zien in Figure 23.

Door het randje bij de opgeboorde spuitjes van 13 mm is een mengsel met meer dan 23,1% zaagsel niet uit de spuit te persen. Daarom zijn voor de hogere percentages zaagsel de spuitjes met afgesneden kop gebruikt.

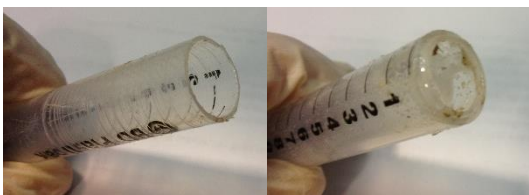


Figure 23 - Kleine spuiten met een afgesneden kop en met een 13mm uitgeboorde kop

Voor de eerste serie is de spuit in een hoek van 45 graden gehouden ten opzichte van het oppervlak. Zie

Figure 24. Deze mengsels, onder 23,1% zaagsel, verliezen hun vorm doordat het giethars uit de streep vloeit. Duidelijk te zien bij de 9,1% zaagsel-streep in

Figure 25.



Figure 24 - Spuit wordt schuin gehouden bij extrusie



Figure 25 - Geëxtrudeerde strepen, lage percentages. V.l.n.r.: 9,1%; 16,7%; 28,6%; 33,3%, 2x 23,1% zaagsel.

In de tweede serie worden de mengsels met meer dan 23,1% zaagsel gedeponeerd. Hierbij wordt de spuit eenmaal vlak tegen de oppervlakte gehouden en eenmaal loodrecht op het oppervlak. Dat laat het effect van de richting van de spuitmond zien. Vlak houden geeft een nette, gladde streep, maar loodrecht ontstaat er een zeer groffe en lastig controleerbare streep. Zie Figure 26 en Figure 27. Deze strepen met veel zaagsel behouden perfect hun vorm en de lijm is bijna niet zichtbaar. Een foto in Figure 28.

Voordat de streep wordt gedeponeerd wordt het mengsel in de spuit even geperst, daardoor wordt de hechting en de dichtheid van de strepen verbeterd.



Figure 26 - Horizontale extrusie



Figure 27 - Verticale extrusie



Figure 28 - Geëxtrudeerde strepen, hoge percentages. V.l.n.r.: 2x 23,1%; 2x 41,2%; 2x 33,3% zaagsel.

#### Conclusie experiment 2

Bij experiment 2 is het duidelijk geworden dat zaagselpercentages onder 23,1% niet acceptabel zijn voor de 3D printer. Bij deze mengsels loopt het lijm tussen het zaagsel uit en dat zorgt ervoor dat de hele streep inzakt. Boven de 23,1% zijn de strepen vormvast. Daar staat tegenover dat de mengsels hoog viskeus zijn. De hoek van extrusie heeft een grote invloed te zijn op de kwaliteit van de streep. De streep krijgt een vlakker oppervlak als de bewegingsrichting van de spuit hetzelfde is als de richting van extruderen.

De eigenschappen van de mengsels met meer dan 23,1% lijken geschikt voor extrusie met een 3D printer. Alleen de hoge viscositeit kan daarbij een probleem worden. Om te laten zien dat het tweede experiment niet een toevallig succes was is de reproduceerbaarheid getest in het derde experiment.

### Samenvatting experiment 3 - Reproduceerbaarheid

Dit experiment is de reproduceerbaarheidstest voor het vorige experiment. Hierbij is gekozen om alleen de mengsels met hoge percentages te herhalen. Die mengsels zijn hebben de beste resultaten en zijn per volume het goedkoopst door de hoeveelheid zaagsel. Het doel is om met hetzelfde proces weer dezelfde resultaten te krijgen als in het vorige experiment.

Op dezelfde manier als in het vorige experiment is weer een mengsel met 41,2% (gewicht) zaagsel aangemaakt: eerst in de hoeveelheden: component A:20 gr., component B: 16,6 gr., Zaagsel: 25,62 gr. In een tweede serie met de helft van die hoeveelheden. Het 33,3% (gewicht) mengsel wordt in de derde serie herhaald in de hoeveelheden: A:10 gr., B:8,3 gr., Z: 12,81 gr. Met deze mengsels zijn weer met de 10 mL spuitjes gedeponereerd op een plank. Zie Figure 31 bovenste plank, er is gewerkt van rechts naar links, waarbij de strepen horizontaal, verticaal en onder 45° zijn geëxtrudeerd. Er zijn twee maal twee strepen bovenop elkaar neergelegd om de stapelbaarheid te controleren. De eerste drie strepen van links hebben 33,3% zaagsel, de rest op die plank 41,2%.

Er is extra gelet op hoe de strepen zich vormen als de spuit loodrecht wordt gehouden. Hierbij blijkt dat het verticaal extruderen van het materiaal op een horizontaal oppervlak niet gemakkelijk gaat. De nette cilinder die uit de spuit komt breekt in plakjes om de bocht te maken naar het oppervlak toe. Een schematische tekening hiervan in Figure 29. De cilinder breekt snel als er afschuifkrachten in één vlak komen te staan. Door de breekranden wordt het oppervlak grof.

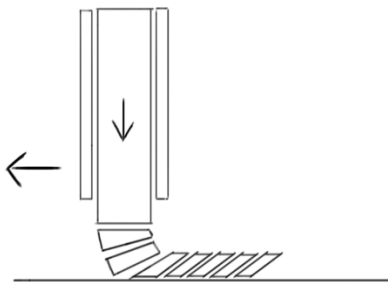


Figure 29 – Bij afschuiving in een vlak breekt de cilinder, waardoor er een groffe streep gevormd wordt

Een verbetering kan gehaald worden door extra materiaal te extruderen en weinig voort te bewegen wordt het mengsel vanuit de spuit op het oppervlak geperst. Daardoor wordt de dichtheid vergroot en ontstaat er een bredere sterkere streep. Echter blijft de streep wel grof.

De gestapelde strepen zijn helemaal vormvast, de onderste is dus belastbaar met een tweede laag. Zie Figure 30.



Figure 30 - Close-up resultaten reproduceerbaarheidstest. Het verschil tussen verticaal en horizontaal extruderen is duidelijk te zien. De gestapelde strepen zijn vormvast, de onderste laag belastbaar.

Figure 31 - Vergelijking van de reproduceerbaarheidstest (boven) met de strepen met hoger percentages uit experiment 2 (onder).



### Conclusie experiment 3

Er is geen significant verschil met het vorige experiment te zien. De reproduceerbaarheid is beoordeeld als voldoende. De resultaten zijn veelbelovend, want ze zijn hard, vormvast en licht belastbaar.

De horizontaal geëxtrudeerde strepen hebben een heel net oppervlak en kunnen direct als product gebruikt worden. De verticaal geëxtrudeerde strepen hebben een zeer grof oppervlak. De zichtbare kant zal daarom nabewerkt moeten worden.

De volgende stap is het werken met grotere volumes. Daarvoor wordt in een vierde experiment geprobeerd om met de kitspuit muurtjes te bouwen.

### Samenvatting experiment 4 – Extruderen van groter volume en meerdere lagen stapelen.

In experiment vier wordt geprobeerd om een muurtje te bouwen met een kitspuit. Daarmee wordt onderzocht of de strepen door meerdere lagen belastbaar zijn. Daarnaast kan onderzocht worden of het muurtje sterk is en blijft staan. Door een kitspuit te gebruiken kan er een volume van tot wel 300 mL binnen korte tijd gedeponeerd worden. Omdat de kitkokers een bijna platte onderkant hebben en de spuitmond daarin erg klein is, wordt verwacht dat het hoog viskeuze mengsel daar niet doorheen gaat. Er wordt daarom een insert gemaakt die het mengsel naar de spuitmond begeleid. Deze heeft een holle kegelvorm, zodat de diameter langzaam van de volle breedte naar die van de spuitmond toe gaat.

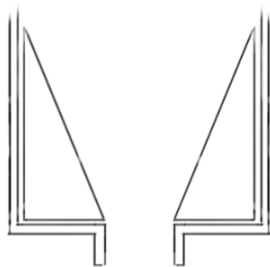


Figure 32 - Doorsnede van een kitkoker met de insert



Figure 33 - Insert voor het begeleiden van het mengsel naar de spuitmond

Voor dit experiment wordt het 41,2% (gewicht) mengsel gebruikt, dat weer aangemaakt wordt door de componenten bij elkaar te mengen en vervolgens het zaagsel erbij te mengen. In de kitkoker gaat eerst de insert, dan het mengsel en vervolgens de plunjer. De koker gaat in het kitpistool en daarmee wordt de druk opgebouwd voor extrusie op een plankje. Het mengsel wordt dan onderin de koker samengeperst, maar het gaat het niet door de spuitmond. Om het probleem te verhelpen wordt het gat is van 10,5 naar

16 en vervolgens naar 22 mm diameter uitgeboord. Ook met het grotere gat voor de spuitmond kan het mengsel daar nog steeds niet doorheen geperst worden. Het handvat van het kitpistool verbuigt al eerder. Er staat dus veel druk op.



Figure 34 - De uitgeboorde insert, kitkoker en een reststuk van het mengsel

Het mengsel heeft een hoge viscositeit en is niet vloeibaar. Het behoudt ook zijn vorm nadat het is geperst. Het mengsel vloeit niet (door de spuitmond). De stukken die uit de kitspuit zijn gehaald worden wel weer hard en laten zien dat het resultaat sterk genoeg is om er iets mee te kunnen bouwen.

### Conclusies experiment 4

Experiment 4 laat zien dat het mengsel zo viskeus is dat het niet door een kleiner gat te persen is. Dat komt doordat het mengsel niet vloeibaar is. Waarschijnlijk is de interne afschuiving van het mengsel is bijna nul. Om een laagje langs een ander laagje van het mengsel te verplaatsen is dan een grote kracht nodig. Om dat te verbeteren zijn er drie oplossingen: Meer lijm toevoegen, zodat de viscositeit lager wordt; geen vernauwing in de extrusiepijp hebben, zodat het mengsel niet constant moet afschuiven voor de versmalling; of een hogere druk proberen, waardoor de afschuifkrachten overwonnen worden.

De eerste oplossing wordt niet als eerste verder onderzocht, omdat een lager percentage zaagsel de beoogde toepassing niet ondersteunt.

De tweede oplossing zou het ontwerpen van een specifieke extrusiekop inhouden. Dat wil zeggen dat na het mengen van de lijm met het zaagsel geen vernauwing in het extrusiekanaal mag voorkomen. Dit kan een mogelijke oplossingsrichting zijn.

De derde oplossing is mogelijk ook interessant. De kitspuit is niet ontworpen voor het opbouwen van deze hoge drukken. Er kan gekeken worden naar alternatieve manieren om de druk op te bouwen. Dan kan ook onderzocht worden of de benodigde afschuiving bij deze hoge drukken wel mogelijk is.

### Samenvatting experiment 5 – Hoge drukopbouw

In het vijfde experiment wordt de derde oplossing uit experiment vier getest. Dat houdt in dat er wordt geprobeerd een hogere druk op te bouwen om het mengsel te

extruderen dan in experiment vier gedaan is. Ter vervanging van de kitspuit wordt nu een vleesmolen gebruikt. De vleesmolen bouwt de druk op met een schroef. De schroef ligt bovenin in Figure 39. In plaats van de kleine hefboom bij de kitspuit, wordt bij de vleesmolen de kracht versterkt door de arm van de hendel en de schroefgeometrie.

De gatenschijf die in vleesmolen zit is vervangen door een schijfjes die zo veel mogelijk open zijn, zodat die geen hinder vormen voor het mengsel. Ze liggen links van het midden in Figure 39. Daardoor vervalt ook de functie van de mesjes voor de gatenschijf en wordt dat onderdeel weggelaten. Als spuitmond wordt een worstvultrechter gebruikt die een 12 mm uitstroom opening heeft. Ondanks de oplossingen van experiment vier heeft deze nog wel een versmalling, te zien in Figure 35.



Figure 35 - Opstelling van het experiment

Nadat alles is klaar gezet wordt het mengsel aangemaakt in de hoeveelheden: A: 30 gr., B: 34,9 gr. en Z: 38,43 gr.. Dat is in de verhouding van 41,2% (op gewicht) zaagsel, maar wel extra veel zodat er genoeg is om de ruimte van de tuit en de vleesmolen te vullen en de werking te garanderen. Vervolgens wordt onder constant draaien van de hendel het mengsel in de vleesmolen gedaan. De schroef transporteert het mengsel uitstekend naar voren en de vultrechter wordt gevuld. Maar door de versmalling in die vultrechter blijft het mengsel daar steken en kan er alleen nog meer zaagsel tegenaan geperst worden totdat de druk te hoog wordt. De vultrechter scheurt open. (Figure 36 en Figure 38) Hierna was de trechter niet meer bruikbaar, daarom is de test stopgezet en zijn de onderdelen schoongemaakt. Het mengsel lijkt sterk geperst te zijn, want het blijft in de vorm van de schroef staan, zie Figure 37.

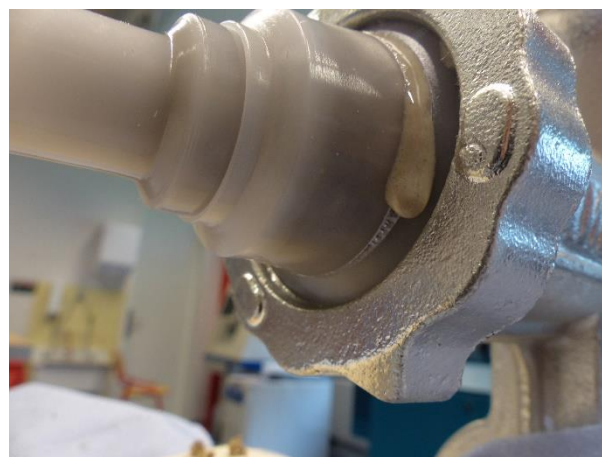


Figure 36 - De vultrechter is gescheurd.



Figure 37 - Het mengsel is geperst, het blijft in de vorm van de schroef staan.



Figure 38 - De scheur in de trechter zit voor de versmalling.





Figure 39 - De onderdelen van de vleesmolen na schoonmaken. Vanaf links met de klok mee: Gescheurde deel van de trechter, ringen ter vervanging van de gatenschijf, de schroef met materiaalverplaatsing van rechts naar links, tweede deel trechter, blokje van het uitgeharde mengsel, schroefring om de hendel vast te zetten, schroefring om de onderdelen in de molen te vast te zetten, de hendel.

#### Conclusie experiment 5

Het is in experiment vijf niet gelukt om het mengsel te extruderen. Het mengsel kon niet door de vernauwing in de trechter geperst worden. Dit is nogmaals een bevestiging dat er geen vernauwing in het extrusiekanaal mag zitten. De schroef lijkt goed te werken voor het transporteren en het persen van het zaagsel. Een hogere druk is dus geen oplossing. Daarom zal vorm van het extrusiekanaal verbeterd moeten worden.

#### Beschrijving experiment 6

In de vorige experimenten blijkt dat een hoge druk niet het mengsel door een vernauwing heen geperst krijgt. Volgens de oplossingen van experiment vier kan het percentage zaagsel aangepast worden of de vorm van het extrusiekanaal. Een lager percentage zaagsel is niet wenselijk, dus wordt eerst het extrusiekanaal verbeterd.

Om het mengsel te kunnen extruderen wordt een nieuwe spuitmond gemaakt die een constante vernauwing heeft over een langere afstand. De vernauwing is nodig omdat de opening van de vleesmolen te groot is. Een constante vernauwing zou ideaal moeten zijn voor dit mengsel. In dit experiment wordt de nieuwe spuitmond op de vleesmolen geplaatst en hetzelfde uitgevoerd als experiment vijf. In dit experiment moet blijken of de nieuwe vorm van de spuitmond werkt of dat er een aanpassing in het mengsel gedaan moet worden.

Dit experiment is niet uitgevoerd.

## Ontwerp van het opgeschaalde printproces

Vanuit het experimenteren op kleine schaal komen waardevolle gegevens om een 3D printer te bouwen die op grote schaal kan werken. De ervaringen moeten geëxtrapoleerd worden met behulp van kennis van productieprocessen om een volwaardige 3D printer te kunnen ontwerpen. In dit hoofdstuk worden onderdelen van de full-size 3D printer behandeld en wordt er een voorstel gedaan voor de werking en constructie van die 3D printer. Elk onderdeel is naar beste weten kennis gekozen, maar er is verder onderzoek nodig om de exacte mogelijkheden en toepassing te bepalen.

### Opslag van de materialen

De gebruikte materialen voor het mengsel zijn zaagsel, gietharscomponent A en gietharscomponent B. Het zaagsel tussen de experimenten afgesloten opgeslagen in een kunststof bewaardoos. Er is geen verandering te merken aan het zaagsel, dan wel het mengsel tijdens het testen; als gevolg van het opslaan of het geregeld open maken van de bewaardoos. Coors slaat het zaagsel in metalen containers van 30 m<sup>3</sup> op. Die zijn afgedekt tegen regen en andere weersinvloeden. Voor de printer is het, naar de genoemde voorbeelden, aan te raden het zaagsel in een afgesloten container te bewaren.

De gietharscomponenten moeten vanzelfsprekend los van elkaar bewaard worden om te voorkomen dat de chemische reactie start en de componenten uitharden. Volgens ("TASK\_2\_3\_TB.pdf", z.d.) moeten de volgende aanwijzingen gevolgd worden:

*"De materialen zouden opgeslagen en gebruikt moeten worden in een warme omgeving (73°F/23°C). De producten hebben een beperkte houdbaarheid en moeten zo snel mogelijk gebruikt worden. Alle vloeibare urethanen zijn gevoelig voor vocht en zullen vocht uit de lucht opnemen. Gereedschap en containers zouden schoon moeten zijn en van metaal, glas of kunststof gemaakt moeten worden. Het mengen moet gedaan worden in een goed geventileerde ruimte."*

Ondanks de aanbeveling worden de flessen met de gietharscomponenten open gelaten tijdens de experimenten. Tussen de experimenten zijn ze afgesloten. De beperkte houdbaarheid uit zich twintig dagen na opening van de flessen in een beetje huidvorming op de A component. Er wordt verder geen vermindering van de werking waargenomen. Er wordt aanbevolen de giethars binnen twintig dagen te gebruiken om problemen, zoals verstopping, te voorkomen.

De gietharscomponenten worden geleverd in flessen van kunststof. De aanbeveling geeft aan dat metaal en glas, naast kunststof, ook geschikt zijn voor contact met de gietharscomponenten. De containers waar de

gietharscomponenten in worden opgeslagen zullen van die materialen gemaakt moeten worden.

Voor de opslag en het vervoer van de materialen kunnen Intermediate Bulk Containers en kunststof of metalen vaten worden gebruikt (Zie Figure 41). De vaten hebben een kleine opening en zijn goed afsluitbaar, ideaal voor de beperkt houdbare giethars. Een vat heeft een inhoud van 200 liter en kan daarmee ruim 3 producten voorzien, 62,5 liter per component per product. ("Vatenhandel > Stalen vaten kopen", z.d.) Zie berekening in hoofdstuk Economische aspecten. Een IBC voor vaste stoffen heeft een stortuitgang aan de onderkant voor gemakkelijk ontladen. Deze zijn onder andere verkrijgbaar in een volume van 550 liter. Het zaagsel kan hierin worden opgeslagen. Een product verbruikt 875 liter zaagsel, dus er kan met twee IBC's per product worden gewerkt. ("ibc-catalogue-12015.pdf", z.d., p. 13)



Figure 41 - Metalen vat



Figure 41 - Intermediate Bulk Container voor vaste stoffen

### Vervoer van de materialen van de opslag naar de printkop

Het zaagsel is een zeer lichtgewicht materiaal. Het is bepaald op 160 kg/m<sup>3</sup>. Zie berekening in het hoofdstuk: Economische aspecten. Granen hebben een dichtheid van 750 kg/m<sup>3</sup> en die kunnen met vacuüm transportsystemen worden verplaatst. ("Vacuüm transport", z.d.) ("Lijst: soortelijke massa van ladingen", z.d.) Een vacuüm transportsysteem (zie

Figure 42) kan worden gebruikt voor het vervoer van het zaagsel vanuit de container naar de printkop. Een groot voordeel is dat een hoogteverschil geen probleem vormt, waardoor het zaagsel naast de printer kan worden opgeslagen.

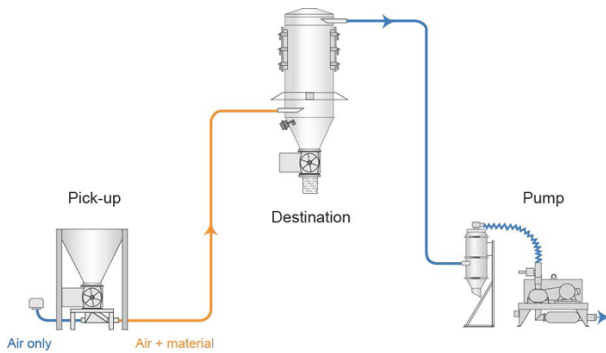


Figure 42 - Vacuüm transportsysteem voor lichte materialen, zoals granen, zaden en pellets.

De gietharscomponenten zijn vloeibaar en hebben na menging een viscositeit van  $150 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ . Omdat dit vergelijkbaar is met een gemiddelde motorolie, kunnen de componenten met een vloeistofpomp naar de printkop worden gepompt. ("smeermiddelen.pdf", z.d., p. 13) Een geschikte pomp daarvoor is een peristaltische (slangen) pomp. Alleen de buis waar de vloeistof doorheen loopt wordt plantgedrukt en die afknelling wordt naar voren verplaatst. De vloeistof wordt dan gedwongen om mee te gaan. Het voordeel is dat het mechaniek droog blijft en alleen de slang schoongemaakt hoeft te worden. Deze pomp zou rond €450,- kunnen kosten. ("Peristaltic Dosing Pump - Buy Peristaltic Dosing Pump, Dosing Pump, Peristaltic Pump Product on Alibaba.com", z.d.)

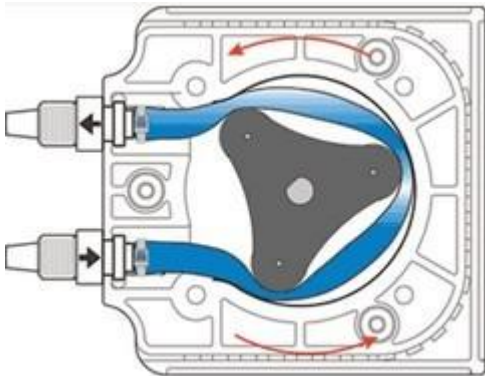


Figure 43 - Peristaltische pomp. Het grijze deel draait rond, waardoor de afknellingen in de slang worden verplaatst en de opgesloten vloeistof wordt rondgepompt.

## Mengen en extruderen

Het mengen van de materialen wordt tijdens de experimenten handmatig gedaan. Als eerst worden de twee gietharscomponenten in een beker bij elkaar gegoten. Met een roerstokje worden de componenten geroerd totdat er een egale massa ontstaat. Vervolgens wordt het zaagsel in stappen bij de giethars gedaan en wordt er tussendoor gemengd totdat de massa egaal is. Het mengen van de giethars is zeer gemakkelijk, maar zodra er zaagsel

toegevoegd wordt stijgt de viscositeit en wordt het zwaar om te mengen. De viscositeit is niet bepaald. In een machine kunnen roerbewegingen worden nagebootst door mengbladen door het mengsel te laten bewegen. Voorbeelden zijn de paddelmenger, Nautamenger en lintmenger. De lintmenger wordt gebruikt voor het toevoegen van een additief bij een grote massa. Veelal bij tere producten. Poeders, kleverige stoffen en pasta's worden gemengd door de paddelmenger. De Nautamenger wordt gebruikt voor stromende componenten. ("Mengers - Klinkenberg B.V.", z.d.) Voor mengsel met een hogere viscositeit worden zogenaamde kneders gebruikt. ("LIST KneaderReactor | LIST Dry Processing | High Viscosity Processing", z.d.) Een voorbeeld is de sigma kneder. Al deze mengers kunnen niet in de printkop verwerkt worden door de afmetingen en horizontale opbouw.

Nadat het experiment, waarbij het mengsel met de kitspuit werd geëxtrudeerd, mislukte is in het volgende experiment een vleesmolen gebruikt. Bij de vleesmolen werkte de schroef die het materiaal naar voren bracht zonder problemen. Daarom is het aan te bevelen om ook in de 3D printer een schroef, waarvan de vorm gelijk is aan de schroef in de vleesmolen, te gebruiken voor de verplaatsing van het mengsel en de drukopbouw voor extrusie. Wat opvalt aan de schroef is de vertraging van de spoed. Daardoor wordt het zaagsel snel naar voren verplaatst en tegelijkertijd kan een hoge druk opgebouwd worden.

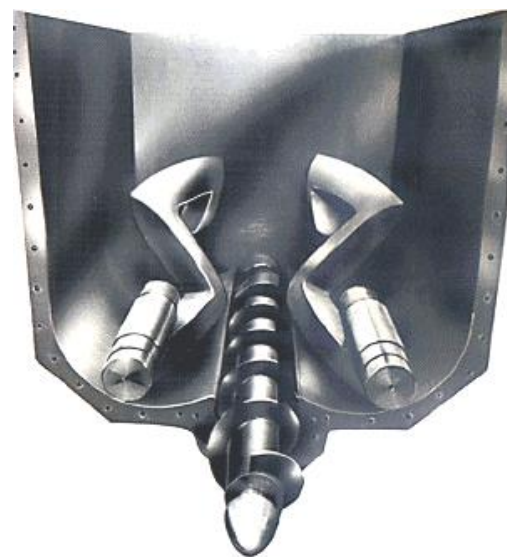


Figure 44 - Sigma kneder met extrusieschroef.



Figure 45 - De schroef van de vleesmolen, extrusierichting is van rechts naar links.

Vergelijkbare principes worden al jaren gebruikt bij het extruderen van kunststof. De schroefextruder werkt voornamelijk met granulaten van kunststof. Het kunststof wordt door de flens naar voren gedrukt. Daarbij neemt de diameter van de schroefkern toe zodat er steeds minder ruimte is voor het kunststof. De druk wordt opgebouwd en door de wrijving die daarbij ontstaat smelt de kunststof. Zodra het einde bereikt is wordt de kunststof door de matrijs gedrukt en vervolgens afgekoeld met water of lucht om vervorming tegen te gaan. Hiermee worden bijvoorbeeld lineaire profielen gemaakt in een continu proces. (Kals, 2007)

Voor het zaagsel-giethars mengsel met twee componentenhars is er geen toegevoegde warmte nodig. Dus de diameter van de schroefkern kan hetzelfde zijn over de gehele lengte en er hoeft geen warmte toegevoegd te worden. Voor het semi-continue 3D printproces heeft de schroefextruder een voordeel dat het een continu proces is. Doordat het toevoegen van materiaal kan gedaan worden als de schroef in werking is hoeft het niet te stoppen voor een

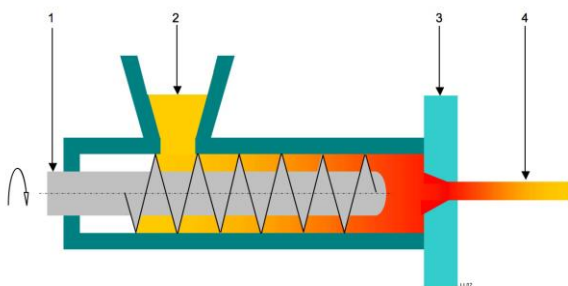


Figure 46 - Schematische tekening van het kunststof-extrusieproces; 1. Aangedreven schroef; 2. Granulaat; 3. Extrusiematrijs; 4. Extrusieprofiel

wisseling van een batch.

Schroefextruders hebben een geringe mengende werking. Dat komt door geringe distributieve menging (= mate van afschuiving in het materiaal) als gevolg van een lage stuwdruk en lage achterwaartse drukstroming, en een geringe dispersieve menging als gevolg van de lage afschuifspanningen. De menging kan verbeterd worden door toevoeging van speciale schroeven en meng- of kneedelementen. ("Spuitsieten.pdf", z.d.) Zoals pinnen op de schroefkern, speciale flensvormen (Dulmage mixer, Pulsar

mixer, Barrier screw) of statische mixers (Kenics mixer) die na het schroefelement bevestigd worden. (Rosato & Rosato, 2012)

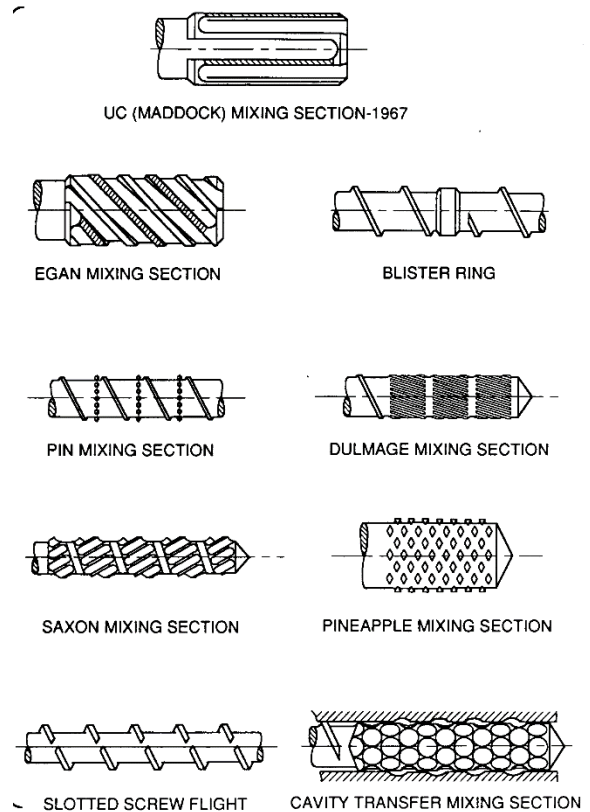


Figure 47 - Verschillende mengelementen voor kunststofextrusie

Gesmolten kunststof heeft een lagere viscositeit dan het zaagsel mengsel. De mengelementen voor kunststoffen zijn waarschijnlijk niet geschikt. Een alternatief voor mengsels met een hoge viscositeit zijn excentrische mengelementen.



Figure 48 - Een excentrisch mengelement voor modulaire extrusieschroeven

Door mengelementen toe te voegen aan de schroef, kunnen twee functies door een machine worden uitgevoerd. Het

mengen en de druk opbouwen voor extrusie. De schroef ziet er dan uit zoals in Figure 49, verplaatsingselementen op het begin en eind en daartussenin mengelementen.



Figure 49 - Dubbele schroef extruder met mengelementen.

Bij het vullen van de vleesmolen was het nodig om het mengsel licht aan te drukken zodat de schroef het materiaal meenam. In de schroefextruder kunnen de materialen gemengd worden, dus ze worden los van elkaar aangevoerd.

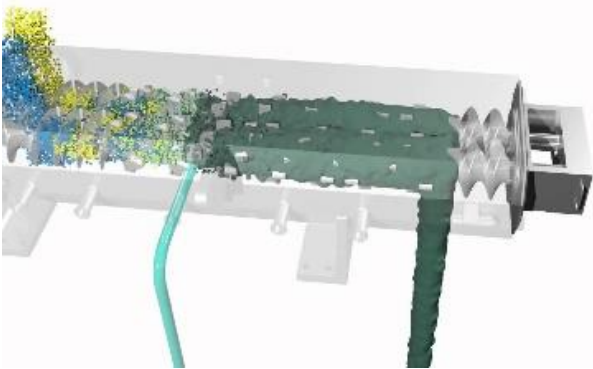


Figure 50 - Een dubbele schroefextruder met mengelementen, 2 soorten vaste stof en een vloeistof worden gemengd.

Het zaagsel is een zeer los mengsel en zal onder de zwaartekracht de extruder in kunnen vallen, waar het wordt meegenomen door de schroef. Enkele windingen verder in de extruder kunnen de gietharscomponenten toegevoegd worden. Zie Figure 50. Daarbij kan gebruik gemaakt worden van de druk van de pompen. Voor elke component kan in de huls van de extruder een inspuitsmond worden gemaakt. Op deze manier kan het bindmiddel in de extruder worden ingespoten, waarin het direct wordt gemengd met het zaagsel. Onder welke hoek de extruder staat maakt voor het proces niet uit.

Als de mengfunctie van de schroefextruder niet voldoende is kan er een dubbele schroef extruder gebruikt worden voor een sterkere mengfunctie. Zie Figure 50. Is de mengfunctie nog niet voldoende, dan moet er in batches worden gemengd worden met behulp van de sigma kneder. Het mengsel kan dan niet onder druk de schroefextruder in gepompt worden. Om de schroef het mengsel te laten grijpen moet de schroef verticaal gezet worden en het mengsel moet in een trechervorm vallen naar de schroef toe. Het mengsel wordt dan met behulp van de zwaartekracht meegenomen in de extruder. Hieronder zijn de twee processen schematisch weergegeven.

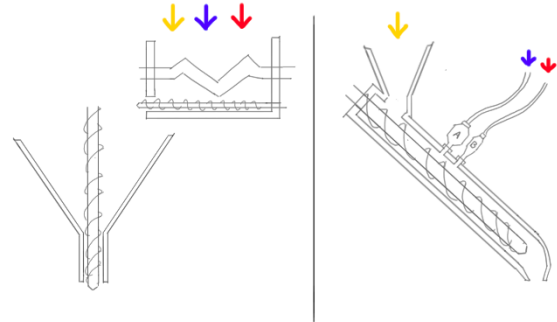


Figure 51 - Schematische tekening van mengproces in combinatie met extruder; Geel = zaagsel; Rood = Giethars comp. A; Blauw = Giethars comp. B.

Links: Een sigma kneder met extrusieschroef en een verticale extruder opstelling. Rechts: Extruder met mengelementen en inspuitspunten voor gietharscomponenten.

## Depositie

De depositie van het mengsel is sterk afhankelijk van de vorm van de spuitmond. In de experimenten is het mengsel meermaals verstopt geraakt doordat er een vernauwing in de spuitmond aanwezig was. Het mengsel blijkt een interne afschuiving van bijna 0 te hebben. Daardoor is het weinig vloeibaar en kan het niet door een sterke vernauwing heen geperst worden. De oplossing kan gezocht worden in een aanpassing van het materiaal of in een verbetering van het verwerkingsproces.

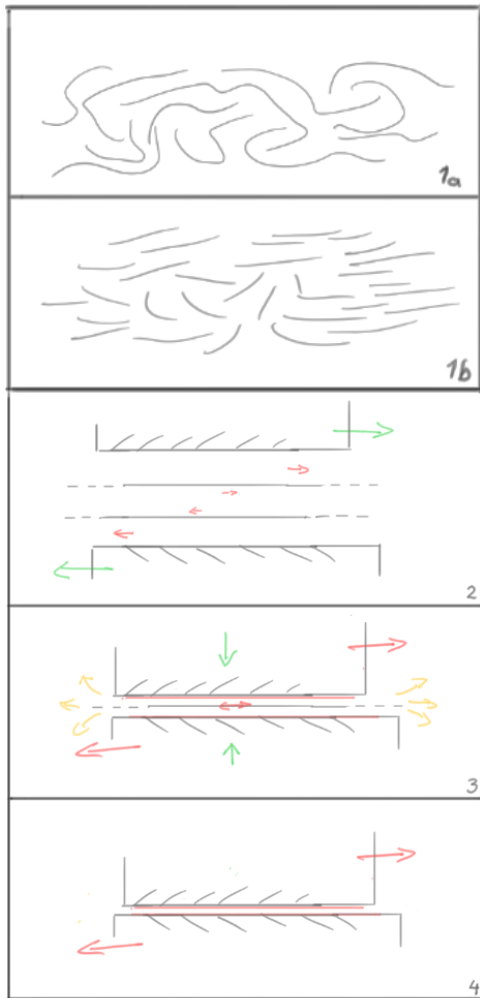


Figure 52 – 1a. Lange vezels die in elkaar verstrikt zitten.  
 1b. Korte vezels, zonder verstriking.  
 2. Te hoge viscositeit bindmiddel; weinig afschuiving.  
 3. Te lage viscositeit bindmiddel; bindmiddel tussen de vezels uit, vezels op elkaar geeft hogere weerstand.  
 4. Te weinig bindmiddel; vezels op elkaar geeft hoge weerstand.

In het materiaal kunnen er verschillende oorzaken voor de grote afschuifkrachten zijn. Namelijk:

- De vezels zijn te lang, waardoor ze in elkaar grijpen en niet langs elkaar kunnen bewegen. De oplossing is dan het gebruik van fijner zaagsel.
- Of de viscositeit van het mengsel is te hoog. De viscositeit van de vloeistof (het bindmiddel) kan dan te hoog zijn, waardoor de totale viscositeit na menging te hoog wordt.
- De viscositeit van de vloeistof kan ook te laag zijn, waardoor het tussen de vezels uit geperst wordt. Dat heeft als gevolg dat de vezels elkaar raken en de viscositeit sterk stijgt.
- Er kan ook simpelweg te weinig vloeistof in het mengsel zijn om vloeieigenschappen te verkrijgen. Meer vloeistof toevoegen is dan de oplossing. Deze

oplossingen zijn niet getest en zijn aanbevelingen voor verder onderzoek.

In het verwerkingsproces zijn twee mogelijke oplossingen. Een hogere druk uitoefenen, zodat het mengsel toch door de vernauwing wordt geperst. En een spuitmond gebruiken die geen sterke vernauwingen bevat, waardoor het materiaal geen kans heeft om zich ergens op vast te zetten. Voor het laatste zijn in de experimenten al enkele verbeteringen gedaan. De doorsneden van de gebruikte spuitmonden laten de veranderingen zien. Desondanks liep het mengsel vast in de eerste vier spuitmonden. Bij de laatste moet blijken of weinig vernauwing het probleem oplost, die is alleen nog niet getest.

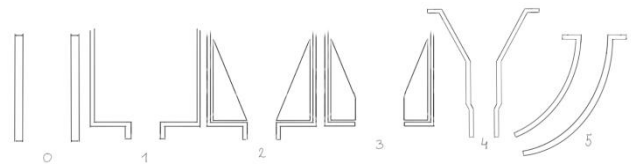


Figure 53 - Verschillende spuitmonden gebruikt bij de experimenten. V.l.n.r.: Kleine spuit afgesneden, kittoker, kittoker met insert, kittoker met insert uitgeboord, vultrechter bij vleesmolen, kromme spuitmond.

Voor de 3D printer wordt aanbevolen de mate van vernauwing zeer beperkt te houden en de nodige vernauwing over een lange afstand te voorzien, zodat het geleidelijk gaat. Er is echter een kleine vernauwing nodig om de dichtheid te verhogen door middel van de benodigde druk, zodat het gedeponeerde materiaal consistent is.

Tijdens de experimenten is ondervonden dat het extruderen van het mengsel lastig verloopt als de extrusierichting haaks op het oppervlak staat. Het materiaal 'breekt' na extrusie en de plakjes blijven liggen. Zie nr. 2 in Figure 54. Daardoor ontstaat een ruw oppervlak aan de streep. Hierbij komt dus, in tegenstelling tot bij de vernauwingen in de spuitmond, wel afschuiving voor. In deze situatie is de afschuiving niet continu en in een vlak. Daarnaast is er geen compressie van het mengsel en heeft het de vrijheid om te breken. Als de extrusierichting bijna gelijk is aan het oppervlak blijft het gedeponeerde materiaal in de cilindervorm en is het oppervlak daarvan egaal. Zie nr. 1 van Figure 54.

Een spuitmond van een 3D printer staat normaliter verticaal, om de goede oppervlaktekwaliteit te verkrijgen moet die horizontaal extruderen. Om dat te kunnen doen wordt er een bocht in de spuitmond gemaakt. Zie nr. 5 in Figure 53 en Figure 55.

Deze oplossing brengt echter problemen met zich mee voor de aansturing van de printkop. Door een spuitmond met een bocht te gebruiken moet de richting van extruderen gelijk zijn aan de richting van verplaatsing van de printkop. De spuitmond moet dan actief worden aangedreven om in de juiste hoek te staan en de software moet compenseren voor

de geometrie van de spuitmond.

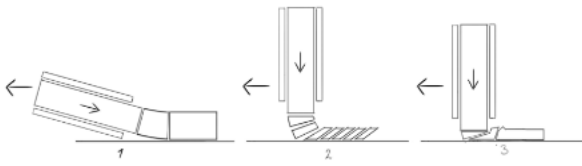


Figure 54 - Variaties in extruderen. 1. Horizontale extrusie, kleine bocht behoudt nette streep. 2. Verticale extrusie met te snelle beweging, breekt de streep in plakjes. 3. Verticale extrusie met langzame beweging, materiaal wordt op oppervlak geperst.

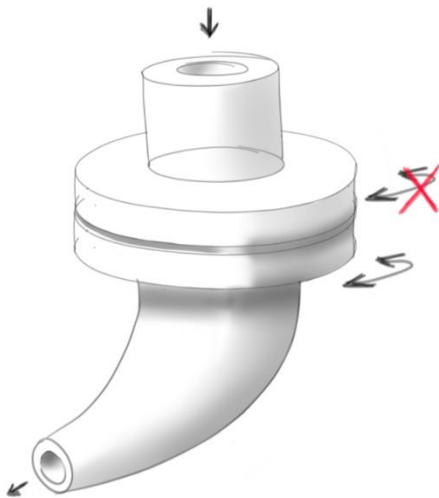


Figure 55 - Kromme spuitmond die meedraait met de printrichting.

Een alternatieve oplossing is het extruderen van extra materiaal, zonder de bewegingssnelheid van de printkop te verhogen. Daardoor wordt het materiaal tegen het oppervlak geperst en worden de plakjes in een nieuwe vorm geduwd. Ondanks dat er met de kleine spuitjes weinig perskracht uitgeoefend kon worden, is in de experimenten de ervaring opgedaan dat door het persen van het materiaal tegen de oppervlakte een laag ontstaat die een acceptabele dichtheid en sterkte heeft. Een nadeel is dat het oppervlak hierbij wel ruw blijft. Zie deel 3 in Figure 54.

## Schoonmaken

Na het gebruik van de printer zal het systeem schoongemaakt moeten worden. Wordt dat niet gedaan, dan zal het bindmiddel na verloop van tijd de machine verstopen en onbruikbaar maken.

Bij de experimenten was het schoonmaken een lastige klus. Grote stukken geperst materiaal kunnen vrij gemakkelijk van de onderdelen worden afgekrabd. Dunne laagjes kunnen met een beitel voorzichtig worden afgekrabd, bijvoorbeeld tussen het schroefdraad van de vleesmolen. De kunststof trechter is na uitharding gemakkelijk schoon te maken door de stukjes

af te breken. Het mengsel hecht niet goed aan het gladde oppervlak van het kunststof.

Het schoonmaken kan dus met de hand gedaan worden, maar dat is arbeidsintensief.

Om de hechting te verminderen kunnen de onderdelen ook van gladde oppervlakken worden voorzien. In de experimenten is ook gebruik gemaakt van een lossingsmiddel. Daardoor zou de giethars minder goed binden aan de onderdelen.

Er zijn andere methodes voor het schoonmaken van de onderdelen gevonden die minder arbeidsintensief zijn. Hard kunststof beschermstukken kunnen de wand van de machine bedekken, zodat de wanden niet in aanraking komen met het mengsel.

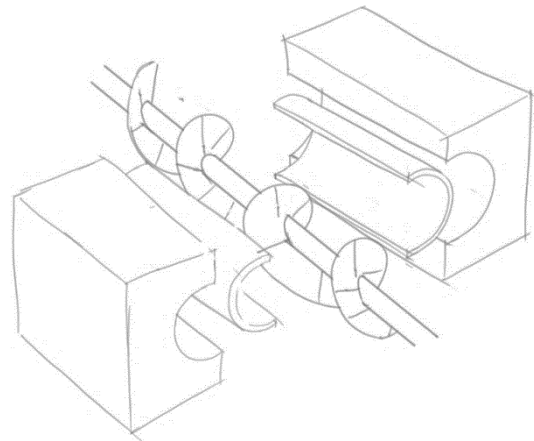


Figure 56 – Voorbeeld van extrusieschroef en behuizing met kunststof bescherm delen.

In de industrie worden ook oplosmiddelen, zoals: SURF X FLUSH 2000™ en Dynasolve CU-6, gebruikt voor het schoonmaken van machines die polyurethanen verwerken. Deze middelen lossen niet-uitgeharde en uitgeharde resten op. Dat kan gedaan worden door de machine te spoelen of de onderdelen in de oplosmiddelen te laten weken. Een voordeel is dat ze herbruikbaar zijn en sneller en veiliger zijn dan aceton, MEK, chloor gebaseerde oplosmiddelen of bijtende middelen. ("SURF-X-FLUSH-2000-TDS-APRIL-2015tf.pdf", z.d.)("Dynasolve CU-6 | Dynaloy", z.d.)

## Combinatie voor de printkop

Door de onderdelen uit de vorige paragrafen te combineren kan een voorstel voor een printerkop met aanvoer van materiaal gedaan worden.

Afhankelijk van de grootte van het te printen product kunnen voor de opslag 200 liter gebruikt worden of de grotere Intermediate Bulk Containers. Vanuit deze containers worden de materialen naar de printkop gepompt met vloeistofpomp en een vacuüm transportsysteem voor het zaagsel. De materialen komen dan als eerst in de schroefextruder terecht. Daarin worden ze gemengd en wordt de druk opgebouwd voor extrusie. Het mengsel gaat daarna door de draaibare, kromme spuitmond en wordt gedeponeed in de richting van bewegen van de printkop. Het verwerkingsproces is hieronder getekend.

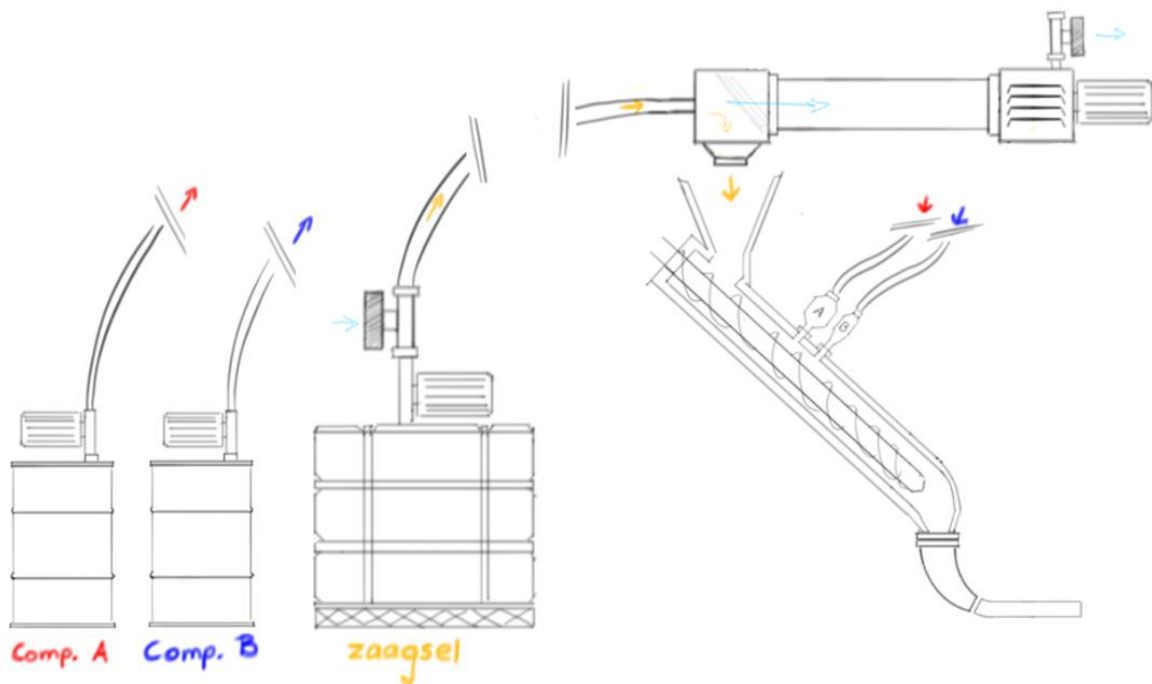


Figure 57 - Schematische weergave van het proces dat het materiaal doorloopt; vanuit de IBC en vaten wordt het materiaal met vloeistofpompen en vacuümpomp naar de printkop getransporteerd. Lucht-materiaal scheider van vacuümsysteem, lost het zaagsel in de extruder. De extrusiebuis met schroef met mengelementen en inspuitspunten voor gietharscomponenten, mengt het zaagsel met de giethars. Daarbij wordt druk opgebouwd voor extrusie door de draaibare spuitmond heen. (Rood = Gietharscomp. A; Blauw = gietharscomp. B; Geel = zaagsel)

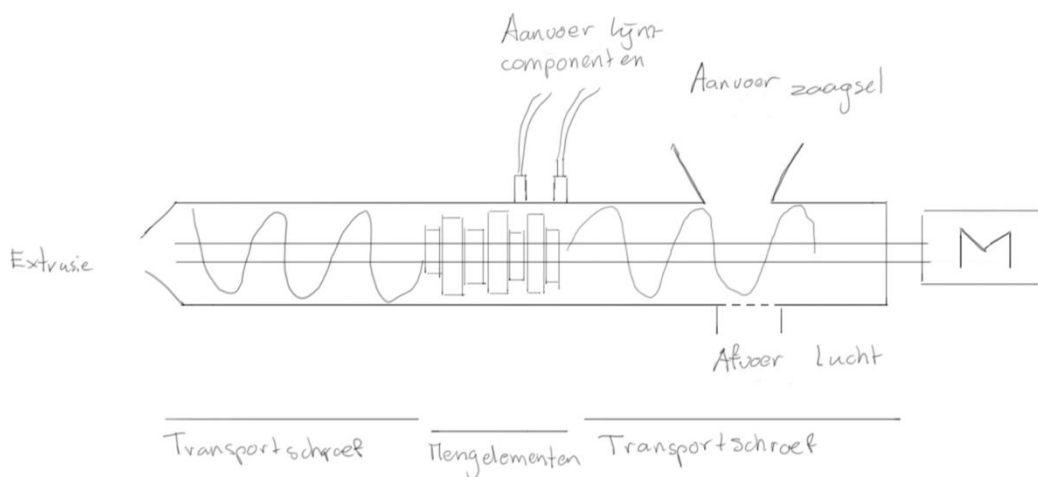


Figure 58 - Detail extrusieschroef. Met transportdelen en mengdelen in de schroef. Aanvoer van zaagsel en lijmcomponenten. Afvoer van lucht.



## Printerconstructie

### Printerframe

Op het formaat van complete meubels zijn er maar enkele keuzes die handelbaar zijn. Restricties voor de 3D printer die grote meubels print op locatie en de fused deposition modelling techniek gebruiken zijn: efficiënte benutting van de printruimte, een printbereik hebben van enkele meters, licht verplaatsbaar zoals in een lift en de snelheid van het printen. De printkop moet alle bewegingen doen, omdat er geen bewegende grondplaat kan zijn.

De meest gebruikte assenstelsels bij 3D printers zijn; Cartesiaans (Figure 59), delta (Figure 60), SCARA (Figure 61), polar (Figure 62) en robotarm (Figure 63). De cartesiaanse printers zijn het bekendst en hebben de vorm van een kubus of een balk. Het printgebied ligt daarbinnen en de printkop wordt aangedreven door een motor voor elke lineaire as X, Y en Z. Een deltaframe is driehoekig met in elke hoek een verticale aandrijving. Door de ophanging van de printkop heeft de printer toch een (driehoekig) bereik in X en Y richting. SCARA gevormde robotarmen hebben een vast draaipunt en een knikpunt in de arm. Deze draaipunten zorgen voor het bereik in de X en Y richting. Het vaste draaipunt wordt bij 3D printers verticaal bewogen zodat een bereik in de Z richting ontstaat. Polair georiënteerde 3D printers beschrijven minimaal een van hun assen als punten op een circulair rooster. Er is daarom minimaal een deel dat een roterende beweging heeft. Als laatste zijn er de multi-assige robotarmen die al zeer veel in de (auto)industrie gebruikt worden. Bij deze armen wordt het bereik niet bepaald door het frame, maar door de lengte van de arm. Doordat de printkop in elke richting gedraaid kan worden is printen in een andere richting dan verticaal mogelijk. Alle 3D printervarianten zijn gebaseerd of gecombineerd uit deze technieken.



Figure 59 - Cartesiaanse 3D printer



Figure 60 - Delta 3D printer

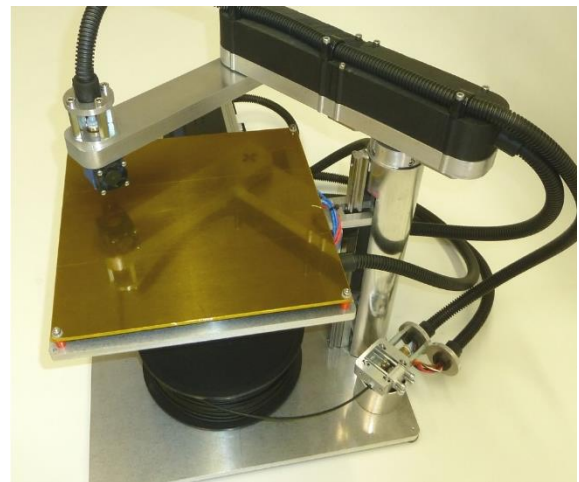


Figure 61 - SCARA-arm 3D printer



Figure 62 - Polar 3D printer



Figure 63 - Robotarm met grijper

3D Printers voor groot formaat producten, zoals meubels, maken vooral gebruik van cartesiaanse systemen, robotarmen en een enkele van het delta systeem. Een

voorbeeld van een grote cartesiaanse 3D printer is een aangepaste overheadkraan, zoals in Figure 64.

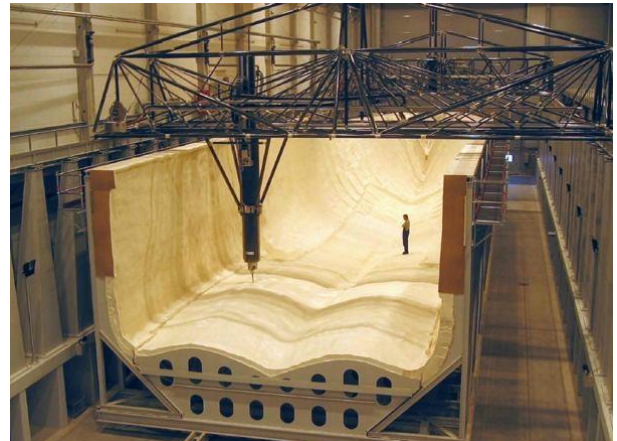


Figure 64 - EEW ProTec overhead CNC machine. Gemakkelijk om te bouwen naar een 3D printer.

Dirk van der Kooij gebruikt een robotarm om meubels te printen van kunststof. Hij gebruikt daarbij zijn zelfgemaakte kunststof extruder printkop. Zie Figure 66.

Van de delta printers wordt een nieuwe variant onderzocht die werkt met de printkop aan kabels. Dit is vergelijkbaar met de 'vliegende' camera's in stadions en bij concerten. Minimaal drie kabels zijn verbonden met het platform vanuit de hoeken van de printruimte. Door de kabels op te rollen kan het platform in de juiste richting bewogen worden. Deze printers zouden hele stadions kunnen bouwen.

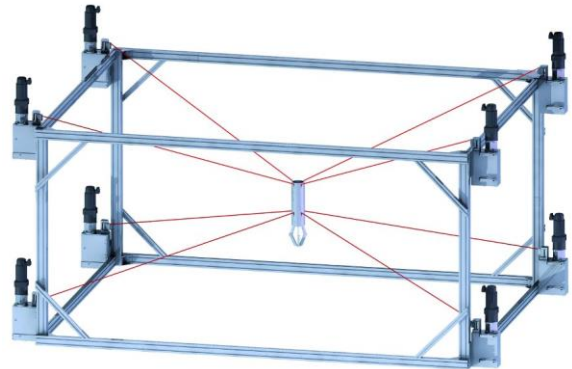


Figure 65 - SkyCam-gebaseerde 3D printer waarvan de plaatsing door middel van het aantrekken van de kabels plaatsvindt.



Figure 66 - Robotarm 3D printer met kunststof extruder van Dirk van der Kooij

Voor de printer van Coors is er gekozen om een cartesiaanse printer te gebruiken. Deze printers zijn modulair te maken waardoor ze gemakkelijk te vervoeren zijn, op te bouwen en uit te breiden. De robotarmen zijn een goede tweede keus, maar die hebben een beperkt en vast bereik. Delta printers hebben een beperkt printoppervlak, mede doordat ruimtes meestal rechthoekig zijn en de printers die ruimte niet optimaal kunnen benutten.

### Opbouw

De printer kan modulair worden opgebouwd met standaard buis of frame materiaal; zoals: 'trusses' (zoals gebruikt bij lichtbruggen), I- of aluminium profielen of buismateriaal van staal. (Figure 67) Het belangrijkste is dat ze zeer stijf zijn, zodat ze de afmetingen van een groot meubelstuk kunnen overbruggen.



Figure 67 - Truss en buismateriaal voor constructies

Hieruit kan een frame worden gebouwd zoals de printer van Enrico Dini. (Figure 68) Dat is een printer die gebruik maakt van het 'Powder bed 3D printing' proces op het formaat van enkele meters. Door de printkop te veranderen kunnen andere manieren van 3D printen met hetzelfde frame toegepast worden.

Hierbij ondersteunen vier palen een vierkant frame. Dat gehele frame kan, door middel van een motor in elke paal, verticaal verplaatst worden. Een balk kan over het frame rijden. Op de balk is een printkop gemonteerd die langs de balk kan bewegen. Het frame zorgt dus voor de verticale beweging, de Z-as. De balk voert de eerste horizontale beweging uit, de X-as. En de beweging van de printkop is de tweede horizontale verplaatsing, de Y-as.



Figure 68 - Cartesiaanse 3D printer van Enrico Dini die werkt met een powder bed systeem

### Vervoerbaarheid

Om de full-size printer te gebruiken voor printen op locatie is het nodig om de printer kunnen vervoeren. Bij het vervoeren van materiaal zijn afmetingen en gewicht cruciale factoren. Die eigenschappen bepalen hoe het materiaal vervoerd moet worden en waar het kan komen. Daarnaast is het belangrijk dat het efficiënt vergaat, de menselijke belasting minimaal is en de kwaliteit niet wordt beïnvloed door de verplaatsbaarheid.

### Afmetingen

Coors bouwt onder andere interieur voor grote projecten, zoals stadskantoren en bedrijfspanden. In elk kantoor, of op elke verdieping zijn er interieurstukken nodig. Allereerst zal de printer en het materiaal naar het pand gebracht moeten worden. Dat zal per busje of per vrachtwagen gedaan worden. Bij het pand aangekomen moet het materiaal met de lift naar de juiste verdieping worden gebracht. En als laatste zal het door de deur moeten van het kantoor. Deze vervoersmiddelen en bestemmingen geven de beperkingen aan die voor de printer en de reservoirs gelden. De maximale afmetingen voor de onderdelen worden met een aantal situaties bepaald.

Een lift moet voor gebouwen die rolstoelers toe laten minimaal 1,05 m. bij 1,35 m. zijn. ("Artikel 4.28 Afmetingen liftkooi", z.d.) Echter, bij Schindler is de deurbreedte van de kleine lift 0,8 meter.

("BNL.3100.NL.06.14\_10062014\_LR.pdf", z.d.) De hoogte van

het bouwwerk moet 2,3 meter zijn, maar de lifttoegang mag lager zijn. ("Bouwbesluit 2012 definieert toepassing liften nader | Liftinstituut", z.d.) De maximale beschikbare ruimte met een lift is: 1,35 x 0,8 x 2,3 m.

Vrachtwagens hebben een laadruimte van: ruim 13,0 m. diep, 2,55 m. hoog en 2,45 breed. Omdat een bestelbus gemakkelijker in te zetten is wordt daarmee rekening gehouden. Een bestelbus (Referentie Mercedes Vito kort) heeft een laadruimte van: 2,586 m. diep, 1,38 m. hoog en 1,53 m. breed. ("Mercedes-Benz - Technische gegevens & uitrusting - Afmetingen & gewichten", z.d.)

Standaardafmetingen voor deuren beginnen bij: 0,83 meter breed en 2,015 meter hoog. Echter, oude gebouwen kunnen deuren met kleinere afmetingen hebben, tot wel 0,530 meter. ("Standaard deurmaten of deuren op maat? | Skantrae", z.d.)

Het is aan te bevelen dat de afmetingen van de printer tijdens vervoer en niet groter zijn (in een van de richtingen) dan: diepte 1,20 m., breedte 0,60 m. en hoogte 1,90 meter.

Een printer van meerdere meters diep, hoog en breed zal niet in die vorm vervoerd kunnen worden. Het is dus nodig om de printer demonteerbaar te maken, zodat het in delen vervoerd kan worden. De delen kunnen dan op karretjes, bijvoorbeeld rolcontainers, tussen de vrachtwagen en plek van printen verplaatst worden.

Ook motoren en de printkop kunnen losgekoppeld worden om apart te kunnen vervoeren. Voor een groep onderdelen is een rolcontainer op maat gemaakt, zodat onderdelen een plek hebben en op- en afbouwen met ervaring steeds sneller gaat. Als de afmetingen van hiervoor aangehouden worden, kunnen er vier karretjes in een bestelbus. De hoogte wordt dan beperkt tot 1,38 m.

Het printmateriaal kan door het flexibele vacuümtransportsysteem in losse containers in de buurt van de printer worden gezet.

De printer is modulair. Het framemateriaal van de printer kan dus opgedeeld worden. De maximale lengte van een deel van het frame is ongeveer 2 meter door de vastgestelde maximale afmetingen. Deze lengte past ook in de bestelbus. Daarnaast zijn de meeste plafonds minimaal 2 meter hoog. Een standaard printer zou een printvolume kunnen hebben van bijna 2x4x2 meter, daar passen de meeste meubelstukken in. Zoals de balie in het voorbeeld in het volgende hoofdstuk. Om extra lengte in een van de richtingen te verkrijgen kunnen de assen verlengd worden.

Voor deze printer zouden 11 framedelen van 2m nodig zijn. Als er een truss-systeem wordt gebruikt zijn de afmetingen van een deel: 290x290x2000 mm, dat is: 0,1682 m<sup>3</sup>. ("Global Truss America, LLC- High Quality Lighting and Stage Trussing", z.d.)

Geschat is dat de printkop binnen een ruimte van 500 x 500 x 200 mm past, dat is: 0,05 m<sup>3</sup>. Een elektromotor past binnen een ruimte van 300 x 300 x 400 mm lengte, dat is: 0,036 m<sup>3</sup>. Daarvan zijn er zeven nodig.

De uitgezochte IBC is: 1,215 x 1,015 x 1,200 m, dat is 1,48m<sup>3</sup>.

("ibc-catalogue-12015.pdf", z.d.) Een vat is rond 585 x 883 mm, dat is 2,69\*10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>. ("Vatenhandel > Stalen vaten kopen", z.d.) Daarvan zijn er twee nodig. Het totale vacuümtransportsysteem wordt geschat op 0,5 m<sup>3</sup>. Het totale systeem heeft dan 1,8502+0,05+ 0,252+1,48+ 0,000538= 3,63 m<sup>3</sup> volume nodig. Zonder materiaalopslag is het 2,16 m<sup>3</sup>.

Een karretje, dat met de bestelbus mee kan, heeft een inhoud van 1,20 x 0,60 x 1,38 m, dat is: 0,9936 m<sup>3</sup>. Voor de printer zijn dan (excl. Materiaalopslag) 3 karretjes nodig. Hierbij wordt de ruimte ideaal benut. Waarschijnlijk is dus een vierde karretje nodig, maar toch zou de printer in een bestelbus kunnen passen.

#### *Gewicht*

Het gewicht van de printer zit vooral in specifieke onderdelen. Het frame kan worden gemaakt van holle buizen en is daardoor relatief licht. Zware onderdelen zijn de printkop, waar het materiaal verwerkt wordt, en de motoren die de printer aandrijven. Het totaalgewicht zal geen probleem zijn voor het overgrote deel van de gebouwen waar de printer wordt ingezet. In het op- en afbouwen en het vervoer van de printer zijn er wel kritieke situaties te vinden. Maar doordat de 3D printer deelbaar is wordt het totale gewicht verdeelt en zijn die overkomelijk.

Een elektro- of servomotor zou ongeveer 30 kilogram wegen. Alle motoren samen zijn dan 210 Kg. Een truss is ongeveer 7 kilogram per meter. ("Global Truss America, LLC- High Quality Lighting and Stage Trussing", z.d.) Dat maakt 154 Kg voor het printerframe. De printkop zou naar schatting niet meer dan 80 kilogram te wegen. Het vacuümtransportsysteem wordt geschat op 100 Kg. De printer is dan 210+154+80= 444 Kg. Ter vergelijking met de vervoersmiddelen:

De Mercedes Vito kort heeft een nuttig laadvermogen van ongeveer 1000 kg. ("Mercedes-Benz - Technische gegevens & uitrusting - Afmetingen & gewichten", z.d.) Kleine personenliften zijn berekend op ongeveer 450 kg.

De printmaterialen zijn echter zwaarder. De lijm die wordt gebruikt heeft een iets hogere dichtheid dan water. Dat kan dus maximaal in verpakkingen van 450 liter worden vervoerd als het de lift in moet. Dat betekent dat ongeveer 1/3 van het volume van de karretjes (1.368m<sup>3</sup>; hiervoor bepaald) gevuld kan worden met lijm.

Een belangrijke factor bij het op- en afbouwen is de lichamelijke belasting voor de medewerkers. Om dat in de gaten te houden kan de NIOSH formule voor maximaal tilgewicht worden gebruikt om het gevaar voor overbelasting in beeld te krijgen. Standaard is het maximaal tilgewicht is 23 kilogram. De printkop en de motoren moeten daarom met een takel worden opgetild om te worden bevestigd.

De volledige printer kan dus op gewicht met alle vervoersmiddelen mee, maar door de afmetingen van de lift en deuren moet de printer in delen worden vervoerd.

In Figure 69 een tekening hoe de printer er uit zou kunnen zien.

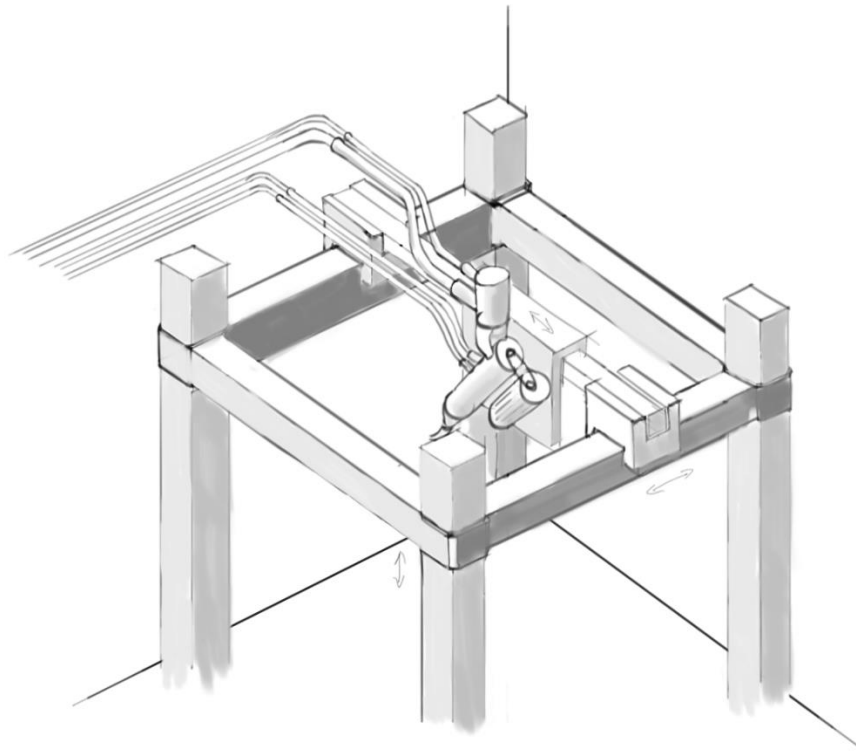


Figure 69 - Tekening van hoe de volledige printer er uit kan zien.

## Economische aspecten

Om een beeld te krijgen van capaciteiten van een opgeschaalde 3D printer, worden in dit hoofdstuk productie-eigenschappen van de printer berekend. Daarmee wordt het inzichtelijk gemaakt of de printer voor een bedrijf als Coors een nuttige aankoop zou kunnen zijn.

### Eigenschappen printer

#### Printsnelheid

De oppervlakte van de spuitmondopening in combinatie met de extrusiesnelheid bepalen het depositievolumen per tijdseenheid. De experimenten zijn handmatig uitgevoerd waarbij de snelheid niet is gemeten en er is nog geen data bekend van een test met een 3D printer. Desktop 3D printers kunnen snelheden halen van 30 tot 300 mm/s. ("Ultimaker 2 Family | Ultimaker", z.d.) Een schatting is dat de 3D printer van Coors een snelheid van 200 mm/s. kan halen.

#### Depositievolumen

De depositiesnelheid moet daarbij ook minimaal 200 mm/s. zijn, anders wordt het materiaal uit elkaar getrokken en dan breekt de streep. Om een nette streep te leggen, die ook goed hecht met de andere lagen moet er meer volume geëxtrudeerd worden dan de afstand die afgelegd wordt. Dan wordt het materiaal iets op elkaar geperst. Er wordt geschat dat dat 20% extra materiaal is. De extrusiesnelheid moet dan 240 mm/s. worden.

In de experimenten is geëxtrudeerd met spuitmonden van 5, 10 en 13 mm in diameter. Met elke spuitmond ging dat goed en de verwachting is dat er geen significante problemen ontstaan als de spuitmond naar 15 mm wordt opgeschaald. Er van uitgaande dat de spuitmond 15 mm in diameter is en de extrusiesnelheid 240 mm/s. is het volume dat per seconde wordt geproduceerd:

$$\begin{aligned} \text{Oppervlakte} &= \pi * r^2 = \pi * 7,52 = 176,71 \text{ mm}^2 \\ \text{volume cilinder} &= \text{Opp.} * L = 176,71 * 240 \\ &= 42410,4 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Per seconde wordt 42410.4 mm<sup>3</sup> materiaal gedeponereerd. Omgerekend is dat 152,68 L/uur.

#### Productietijd

Om een beeld te geven van de capaciteit van de 3D printer wordt gebruik gemaakt van het voorbeeld uit een artikel uit het vooronderzoek, toegevoegd in bijlage A. In het artikel wordt een balie als voorbeeld genomen. Met afmetingen van 2500 x 1500 x 1200 mm (lxbxh) en een geschat volume van 1000 liter. De printer moet in het formaat: 4000 x 2000 x 2000 mm worden opgebouwd. Als de printer wordt aangezet en met 200 mm/s. print, waarbij 240 mm/s. wordt gedeponereerd dan is het product in 6,55 uur klaar.

$$\begin{aligned} \text{Productietijd} &= \frac{\text{aantal liter product}}{\text{liter/uur}} = \frac{1000}{152,68} = 6,55 \\ &= 6 \text{ uur en } 33 \text{ minuten} \end{aligned}$$

#### Materiaalverbruik

Het dikste mengsel heeft een verhouding op gewicht van 41,2% zaagsel en 58,8% lijm. Daarmee zijn de laatste

experimenten uitgevoerd.

De dichtheid van het zaagsel is gemeten op 0,16 kg/L → 6,23 L/kg. Dit is bepaald met een proef. Een beker werd gevuld met zaagsel en het gewicht is gemeten, exclusief het gewicht van de beker. Daarna wordt de beker gevuld met kraanwater en daarvan wordt ook het gewicht genoteerd, exclusief het gewicht van de beker. De dichtheid van water is bekend: 0,998 kg/L. Vervolgens wordt uit deze gegevens berekend wat de dichtheid van het zaagsel is.

De dichtheid van de lijm is 1,12 gram/cc = 1,12 kg/L → 0,89 L/kg. ("TASK\_2\_3\_TB.pdf", z.d.)

De verhouding in volume is dan: 6,23 liter zaagsel op 0,89 liter lijm, oftewel: 7 L zaagsel op 1 L lijm. Een product van 1000 liter bevat dan 875 liter zaagsel en 125 liter lijm. Een volle container met zaagsel van 30 m<sup>3</sup> is dan met 34,29 producten leeg.

### Kosten

#### Materiaalkosten

De polyurethaan giethars dat gebruikt is als bindmiddel bij de experimenten is voor 7,26 Kg: €157,36, exclusief 21% BTW. Dit zijn de kosten voor een grootverpakking voor consumenten. Grotere verpakkingen, bijvoorbeeld standaard vaten van 200 Kg kunnen aanzienlijk goedkoper zijn. Per kilogram en per liter zijn de kosten:

$$\text{Prijs giethars} = \frac{157,36}{7,26} = €21,67/\text{Kg} \rightarrow €24,35/\text{L}$$

Een product zoals hiervoor berekend kost dan:

$$\begin{aligned} \text{Lijmkosten per product} &= \text{aantal liter product} * €24,35 \\ &= €3043,75 \end{aligned}$$

Het zaagsel werd eerst verkocht voor een bepaalde prijs, tegenwoordig moet Coors bijbetalen omdat het zaagsel een afvalproduct is dat afgevoerd moet worden. Bij hergebruik van het zaagsel in nieuwe meubels blijft het materiaal in het bedrijf. Daarbij wordt er vanuit gegaan dat het als restproduct gezien wordt en daarom al afgeschreven is. De kosten voor het zaagsel zijn daarom gesteld op €0,-.

#### Energiekosten

Voor elke paal in het frame is er 1 elektromotor nodig. Daarnaast nog een om de balk te bewegen, een om de printkop te bewegen en de laatste voor de aansturing van de extrusie. Dat betekent dat er 7 elektromotoren nodig zijn. Als elke motor 3 kW levert en voor 6,55 uur aan staat verbruikt de printer:

$$\begin{aligned} \text{Energieverbruik per product} &= 3 \text{ kW} * 6,55 \text{ uur} \\ &= 19,65 \text{ kWh} \end{aligned}$$

De gemiddelde energieprijzen voor consumenten in 2014 was: €0,177/kWh. ("Aardgas- en elektric\_240615162925.xlsx", z.d.) Per product zijn de energiekosten dan:

$$\text{Energiekosten per product} = €0,177 * 19,65 = €3,48$$

### Loonkosten

Het geschatte gemiddelde maandsalaris van een machinebediener met een aantal jaren ervaring is: €2600,- bij een 38 werkweek. Het bruto uurloon is dan €15,79. Het aantal werkuren voor werknemers bestaat uit het op- en afbouwen van de printer en het aanvullen of verwisselen van de materiaalcontainers. Een schatting is te vinden in Figure 70.

Er zijn twee volledige dagen aan manuren nodig om 1 product te printen op locatie.

$$\text{Kosten manuren per product} = €15,79 * 16 = €252,64$$

Bij deze berekening is de machine onbeheerd actief. Dat kan alleen als de printer goed ingeregeld is en er zekerheid is dat het product direct perfect uit de printer komt. Als er tijdens het printen iemand bij de machine moet zijn komt er het volgende bij:

$$\begin{aligned} \text{Kosten manuren tijdens printen per product} \\ = €15,79 * 6,55 = €103,42 \end{aligned}$$

De manuren zijn voor 1 persoon. Bij het opbouwen zijn er minimaal twee personen nodig om het binnen de gestelde tijd af te krijgen. De kosten worden dus verdubbeld.

### Afschrijving

De afschrijving voor de printer is onbekend en wordt daarom niet meegenomen in deze berekening.

### Totale kosten

De totale kosten van de hiervoor genoemde categorieën zijn:

$$\begin{aligned} \text{Totale kosten per product} &= €3043,75 + €3,48 + 505,28 \\ &= €3551,51 \end{aligned}$$

Deze totale kosten zijn de optelling van de hiervoor genoemde categorieën. Daar komen nog veel overheadkosten bij, zoals kosten voor brandstof.

Activiteit	Benodigde tijd (uren):	Totaal (uur):
Voorbereiding/inladen	1	
Reistijd	3	
		4
<b>Opbouwen:</b>		
De palen	1	
Frame	1	
Balk	½	
Printkop	1	
Aansluiten en starten	1	
		5,5
<b>Afbouwen:</b>		
Stoppen en afkoppelen	1	
Printkop	1	
Balk	½	
Frame	1	
De palen	1	
		5,5
Product herplaatsen	½	
Vervangen materiaalcontainer	½	
		1
		16 uur

Figure 70 - Tabel schatting werkuren bij een printopdracht

## Conclusies

Om het verslag af te ronden wordt er teruggegrepen naar de vijf doelstellingen die opgesteld zijn in de opdrachtstelling.

### Welk bindmiddel is volgens de theorie geschikt voor de 3D printer?

Twee componentenlijmen, zoals polyurethaan, epoxy en polyester zijn het meest geschikt. Ze beschikken over de juiste eigenschappen. Namelijk: lage viscositeit, weinig krimp, sterk en een acceptabele kostprijs tussen €1,- en €100,- per kilogram.

Ten opzichte van specialistische lijntechnologieën, zoals uitharding door middel van UV licht, zijn ze een stuk goedkoper.

Bio-lijmen zijn in opkomst, maar de eigenschappen en beschikbaarheid kunnen nog niet concurreren met de synthetische lijmen.

Bindmiddelen zoals cement zijn interessant voor specifieke toepassingen, maar voor het doel van dit onderzoek hebben ze geen duidelijke meerwaarde.

### Waar bestaat de slurry uit dat gedeponerd wordt?

De slurry is het materiaal waaruit de producten gemaakt worden door middel van FDM printen. Het bestaat uit het zaagsel dat overblijft uit het proces van meubels maken in de productiehal van Coors. Het zaagsel wordt gezeefd met een fijnheid van 3 mm. Vervolgens wordt het gemengd met een giethars dat wordt gebruikt als bindmiddel. Het is gebleken dat 41,2% zaagsel (op gewicht) bij de giethars kan worden toegevoegd. De giethars heeft een viscositeit van 150 mPa\*s.

### Hoe wordt de slurry opgeslagen, getransporteerd en gedeponerd?

De aanvoer van het printmateriaal wordt gedaan vanuit de containers die het bindmiddel en het zaagsel bevatten. Het zaagsel wordt verplaatst met een vacuüm transportsysteem, het vloeibare giethars met een peristaltische pomp. In de printkop worden de materialen verwerkt door middel van een schroef met verplaatsingselementen en mengelementen. Het zaagsel valt in de schroef en in twee stappen wordt het bindmiddel toegevoegd. De schroef mengt de materialen en bouwt de druk op voor extrusie. Als laatste wordt het materiaal door de draaibare spuitmond en op de vorige lagen geperst. Het printerframe en de aandrijving daarvan zorgen voor de juiste plaatsing van de spuitmond.

### Hoe blijft de slurry op zijn plek en wat zijn de eigenschappen na uitharding?

De aandrijving van de printer bepaald de positie van deponeren van het materiaal. De slurry moet op die plek blijven staan en vormvast zijn, zodat het product gelijk wordt aan het CAD model. Door een hoog percentage zaagsel toe te voegen aan het vloeibare bindmiddel, wordt het mengsel viskeus genoeg om belastbaar te zijn na extrusie. Het is dan

mogelijk om direct een tweede laag er bovenop te deponeren. Om meerdere lagen te kunnen dragen zal de slurry uitgehard moeten zijn.

De oppervlaktes van de producten zullen grof zijn door het effect van de laagjes. Dit kan nabewerkt worden door dicht te smeren of op te schuren.

### Welke proces parameters resulteren in een economisch acceptabel proces?

Om te bepalen of de printer in praktijk ingezet kan worden voor de productie van meubelstukken is een balie als voorbeeldproduct gekozen. De balie heeft een volume van 1000 liter en kan daarmee een opdracht van een klant zijn. De printer kan een printsnelheid halen van 200 mm/s., dat resulteert in een extrusiesnelheid van 240 mm/s. In combinatie met een spuitmond van 15 mm kunnen producten van 1000 liter in 6 uur en 33 minuten worden geprint. De verwerkingssnelheid van de printer is daarbij: 152,68 L/uur. Om de printer voor die opdracht op en af te bouwen zijn er twee volledige werkdagen van 8 uur nodig. Bij een opdracht zijn de kosten voor het bindmiddel het hoogste, ongeveer €3300,- voor een product van 1000 L. Van dit product is dan 825 liter zaagsel en 175 liter is lijm. Daar is echter nog een verbetering te behalen door materiaal aan te kopen in bulk en het percentage zaagsel te maximaliseren.



## Aanbevelingen

Dit onderzoek is een start om een productiegerichte zaagselprinter te maken. Bij de experimenten en het literatuuronderzoek zijn nog richtingen niet onderzocht of is het opgevallen dat onderdelen nog beter gemaakt kunnen worden. Om daar in een richting te voorzien, worden hier de onderdelen genoemd waar nog een significante optimalisatie te behalen is.

### Optimalisatie van materiaal

Het materiaal is op het moment van opleveren van het verslag goed werkbaar, maar niet perfect. Een van de belangrijkste eigenschappen daarvan is de verhouding tussen het zaagsel en de lijm. Door meer zaagsel toe te voegen aan een hoeveelheid lijm wordt het product goedkoper. Bij hogere percentages dan 42% op gewicht wordt het mengsel al snel droog. In een onderzoek kan dit gehalte gemaximaliseerd worden, terwijl het nog wel werkbaar blijft voor de machine.

Daarmee te maken heeft de vloeibaarheid van het zaagsel. Des te vloeibaarder het mengsel des te gemakkelijker het te verwerken is. De grofheid van het zaagsel lijkt daar invloed op hebben, het is dus nodig om uit te zoeken welke grofheid het zaagsel mag hebben voor de meest optimale prestaties. In de huidige economie is natuurvriendelijkheid van producten een belangrijke eigenschap geworden. Zodoende is het beter om een afvalstroom te hebben die zo puur mogelijk is. Het zaagsel uit de fabriek is een mengsel van meerdere materialen, als dat alleen uit hout zou bestaan kunnen producten gemaakt worden die herbruikbaar zijn. Een lijmsort die biologisch afbreekbaar, composteerbaar of recyclebaar is in combinatie met een pure zaagselstroom brengt producten voort die volledig hernieuwbaar zijn. Een biologisch verantwoord product heeft een goede marketingwaarde en kan daarom een belangrijk onderzoeksonderwerp zijn.

Naar aanleiding van het onderzoek wordt er geacht dat er een tweecomponentenlijm nodig is om een goede uitharding in het product te verkrijgen. Tweecomponentenlijmen brengen lastige eigenschappen met zich mee, zoals dat de reactie in de machine niet stopt, waardoor de lijm binnen een bepaalde tijd verwerkt moet zijn en de machine altijd schoongemaakt moet worden na gebruik. Er kan nog een dieper onderzoek gedaan worden naar lijmen die het gebruik simpeler maken, maar toch de juiste goede eigenschappen behouden.

### Optimalisatie van de full-size printer

Het belangrijkste is dat de mengwerking van de extrusieschroef voldoende is. Dat moet gecontroleerd worden. Om dit te testen kan een schaalmodel gebouwd worden. Met dat schaalmodel kan ook het effect van de kromme spuitmond bepaald worden. Daarmee kunnen de parameters voor de kwaliteit van het printen geoptimaliseerd worden.

## Bronnenlijst

- 3D Clay Printer Fast Build. (2013). Geraadpleegd van [https://www.youtube.com/watch?v=F2TORakJDpU&feature=youtube\\_gdata\\_player](https://www.youtube.com/watch?v=F2TORakJDpU&feature=youtube_gdata_player)
- 3D PotterBot Clay 3D Printer and Ram — DeltaBots. (z.d.). Geraadpleegd 7 juli 2015, van <http://www.deltabots.com/products/potterbot>
- 3D printers print ten houses in 24 hours. (2014). Geraadpleegd van [https://www.youtube.com/watch?v=SObzNdyRTBs&feature=youtube\\_gdata\\_player](https://www.youtube.com/watch?v=SObzNdyRTBs&feature=youtube_gdata_player)
- 3D printing wood with varying temperature (owl timelapse) - Ultimaker. (2012). Geraadpleegd van [https://www.youtube.com/watch?v=CUh5q2UQwGU&feature=youtube\\_gdata\\_player](https://www.youtube.com/watch?v=CUh5q2UQwGU&feature=youtube_gdata_player)
- Aardgas-en\_elektric\_240615162925.xlsx. (z.d.).
- Adhesive applications. (z.d.). Geraadpleegd 20 mei 2015, van <http://www.avebe.com/adhesives/>
- anhydrietvloer. (z.d.). Geraadpleegd 15 mei 2015, van <http://www.joostdevree.nl/shtmls/anhydrietvloer.shtml>
- Artikel 4.28 Afmetingen liftkooi. (z.d.). Geraadpleegd 21 juni 2015, van [http://www.bouwbesluitonline.nl/Inhoud/docs/wet/bb2012\\_nvt/artikelsgewijs/hfd4/afd4-4/art4-28](http://www.bouwbesluitonline.nl/Inhoud/docs/wet/bb2012_nvt/artikelsgewijs/hfd4/afd4-4/art4-28)
- Bertaud, F., Tapin-Lingua, S., Pizzi, A., Navarrete, P., & Petit-Conil, M. (2012). Development of green adhesives for fibreboard manufacturing using tannins and lignin from pulp mill residues. *Cellulose Chem. Technol*, 46(7-8), 449–455.
- Best Quality Construction Clear Epoxy Resin Ab Glue For Ceramic Tiles - Buy Clear Epoxy Resin Ab Glue For Ceramic Tiles,Best Clear Epoxy Resin Ab Glue For Ceramic Tiles,Construction Clear Epoxy Resin Ab Glue For Ceramic Tiles Product on Alibaba.com. (z.d.). Geraadpleegd 10 juli 2015, van [http://www.alibaba.com/product-detail/Best-quality-construction-clear-epoxy-resin\\_60176991253.html](http://www.alibaba.com/product-detail/Best-quality-construction-clear-epoxy-resin_60176991253.html)
- bindmiddel. (z.d.). Geraadpleegd 20 mei 2015, van <http://www.joostdevree.nl/shtmls/bindmiddel.shtml>
- BNL.3100.NL.06.14\_10062014\_LR.pdf. (z.d.). Geraadpleegd van [http://www.schindler.com/content/netherlands/internet/nl/mobiliteitsoplossingen/producten/liften/schindler-3100/\\_jcr\\_content/rightPar/downloadlist/downloadList/101\\_1345813346034.download.asset.101\\_1345813346034/BNL.3100.NL.06.14\\_10062014\\_LR.pdf](http://www.schindler.com/content/netherlands/internet/nl/mobiliteitsoplossingen/producten/liften/schindler-3100/_jcr_content/rightPar/downloadlist/downloadList/101_1345813346034.download.asset.101_1345813346034/BNL.3100.NL.06.14_10062014_LR.pdf)
- Bouwbesluit 2012 definieert toepassing liften nader | Liftinstituut. (z.d.). Geraadpleegd 21 juni 2015, van <http://www.liftinstituut.nl/vakinformatie/wetgeving-nl-arbo-bouw-etc/bouwbesluit-2012-definieert-toepassing-liften-nader>
- by, E., & Ebnesajjad, S. (Red.). (2009a). Chapter 4 - Classification of Adhesives and Compounds. In *Adhesives Technology Handbook (Second Edition)* (pp. 47–62). Norwich, NY: William Andrew Publishing. Geraadpleegd van <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780815515333500074>
- by, E., & Ebnesajjad, S. (Red.). (2009b). Chapter 5 - Characteristics of Adhesive Materials. In *Adhesives Technology Handbook (Second Edition)* (pp. 63–135). Norwich, NY: William Andrew Publishing. Geraadpleegd van <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780815515333500086>
- Carbonwinkel.nl. (z.d.). Geraadpleegd 2 juli 2015, van <http://www.carbonwinkel.nl/nl/>
- Caseïnes. (z.d.). Geraadpleegd 18 mei 2015, van <http://www.intercol.eu/adhesives/producten/caseïnes.html>
- cement. (z.d.). Geraadpleegd 20 mei 2015, van <http://www.joostdevree.nl/shtmls/cement.shtml>
- Ceramic 3D Printing @ Medalta. (2013). Geraadpleegd van [https://www.youtube.com/watch?v=\\_8IMB16lcvo&feature=youtube\\_gdata\\_player](https://www.youtube.com/watch?v=_8IMB16lcvo&feature=youtube_gdata_player)

*Ceramic Printing*. (2011). Geraadpleegd van [https://www.youtube.com/watch?v=alyxH5QwAME&feature=youtube\\_gdata\\_player](https://www.youtube.com/watch?v=alyxH5QwAME&feature=youtube_gdata_player)

CES Edupack. (z.d.). (Versie 2014).

Choosing and using a structural adhesive. (z.d.). Geraadpleegd van <http://multimedia.3m.com/mws/media/7956930/choosing-and-using-a-structural-adhesive-white-paper.pdf?fn=White%20Paper%20-%20Choosing%20and%20Using>

Clement, D. (z.d.). Natuurlijke lijmen.

ColorFabbs new WOODFILL PLA ... hehehe :-)| Ultimaker. (z.d.). Geraadpleegd 24 april 2015, van <https://ultimaker.com/en/community/view/4316-colorfabbs-new-woodfill-pla-hehehe->

Contactformulier, C. dr ing Rjag. (z.d.). Valorisation van lignine. Geraadpleegd 18 mei 2015, van <http://www.wageningenur.nl/nl/show/Valorisation-van-lignine.htm>

Dudek, P. (2013). FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements. *Archives of Metallurgy and Materials*, 58(4), 1415–1418.

*Dutch Profiles: Dirk van der Kooij*. (2013). Geraadpleegd van [https://www.youtube.com/watch?v=CJ0RqJknFhU&feature=youtube\\_gdata\\_player](https://www.youtube.com/watch?v=CJ0RqJknFhU&feature=youtube_gdata_player)

Dynasolve CU-6 | Dynaloy. (z.d.). Geraadpleegd 30 juni 2015, van <http://www.dynaloy.com/products/dynasolve-cu-6>

Frihart, C. R., & Birkeland, M. J. (2014). Soy Properties and Soy Wood Adhesives. In R. P. Brentin (Red.), *Soy-Based Chemicals and Materials* (Vol. 1178, pp. 167–192). Washington, DC: American Chemical Society. Geraadpleegd van <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/bk-2014-1178.ch008>

Giethars Academie Polyesterigant: Alles over gietharsen en gieten. (z.d.). Geraadpleegd 26 mei 2015, van <http://www.polyesterigant.nl/55-giethars-academie>

Global Truss America, LLC- High Quality Lighting and Stage Trussing. (z.d.). Geraadpleegd 9 juli 2015, van <http://globaltruss.com/ProductDetails.aspx?ItemNumber=41&MainId=1&Category=1>

Henke, K., & Tremel, S. (2012). Wood based bulk material in 3D printing processes for applications in construction. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71(1), 139–141. <http://doi.org/10.1007/s00107-012-0658-z>

*houseprinter.mov*. (2011). Geraadpleegd van [https://www.youtube.com/watch?v=QxqROe8tevo&feature=youtube\\_gdata\\_player](https://www.youtube.com/watch?v=QxqROe8tevo&feature=youtube_gdata_player)

Huang, J., & Li, K. (2007). A New Soy Flour-Based Adhesive for Making Interior Type II Plywood. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 85(1), 63–70. <http://doi.org/10.1007/s11746-007-1162-1>

Hui, Z., Yuan, Z. H., Long, Z. Y., & Wen, W. Q. (2011). Research of Wood Plastic Composites application based on Fused Deposition Modeling technology (pp. 1560–1562). IEEE. <http://doi.org/10.1109/EMEIT.2011.6023394>

ibc-catalogue-12015.pdf. (z.d.). Geraadpleegd van <http://www.schaefer-container-systems.com/fileadmin/redakteur/Container-Systems/DOWNLOAD/IBC/ibc-catalogue-12015.pdf>

Ibrahim, M., Badrishah, N. S., Sa'ude, N., & Ibrahim, M. H. I. (2014). Sustainable Natural Bio Composite for FDM Feedstocks. *Applied Mechanics and Materials*, 607, 65–69. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.607.65>

Imam, S. H., Bilbao-Sainz, C., Chiou, B.-S., Glenn, G. M., & Orts, W. J. (2013). Biobased adhesives, gums, emulsions, and binders: current trends and future prospects. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27(18-19), 1972–1997. <http://doi.org/10.1080/01694243.2012.696892>

Kals, H. J. J. (2007). *Industriële productie : het voortbrengen van mechanische producten* (4e herz. dr..). Den Haag: Academic Service.

Lijst: soortelijke massa van ladingen. (z.d.). Geraadpleegd 29 juni 2015, van [http://www.debinnenvaart.nl/binnenvaarttaal/lijsten/sd-ladingen.html#sd\\_graan](http://www.debinnenvaart.nl/binnenvaarttaal/lijsten/sd-ladingen.html#sd_graan)

LIST KneaderReactor | LIST Dry Processing | High Viscosity Processing. (z.d.). Geraadpleegd 1 juli 2015, van <http://www.listdryprocessing.com/plug-flow-reactor-technology/list-kneaderreactor.html>

Liu, Y., & Li, K. (2007). Development and characterization of adhesives from soy protein for bonding wood. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27(1), 59–67. <http://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2005.12.004>

Mengers - Klinkenberg B.V. (z.d.). Geraadpleegd 1 juli 2015, van <http://www.klinkenbergbv.nl/producten/mengers>

Mercedes-Benz - Technische gegevens & uitrusting - Afmetingen & gewichten. (z.d.). Geraadpleegd 21 juni 2015, van [http://www.mercedes-benz.nl/content/netherlands/mpc/mpc\\_netherlands\\_website/nl/home\\_mpc/van/home/new\\_vans/models/vito\\_447/panel\\_van/data/dimensions.0001.html](http://www.mercedes-benz.nl/content/netherlands/mpc/mpc_netherlands_website/nl/home_mpc/van/home/new_vans/models/vito_447/panel_van/data/dimensions.0001.html)

Peristaltic Dosing Pump - Buy Peristaltic Dosing Pump,Dosing Pump,Peristaltic Pump Product on Alibaba.com. (z.d.). Geraadpleegd 10 juli 2015, van [http://www.alibaba.com/product-detail/Peristaltic-Dosing-Pump\\_60159075998.html](http://www.alibaba.com/product-detail/Peristaltic-Dosing-Pump_60159075998.html)

Pizzi, A. (2006). Recent developments in eco-efficient bio-based adhesives for wood bonding: opportunities and issues. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 20(8), 829–846. <http://doi.org/10.1163/156856106777638635>

PLA shrink factor | Ultimaker. (z.d.). Geraadpleegd 24 april 2015, van <https://ultimaker.com/en/community/view/7984-pla-shrink-factor>

PLA shrinking | Ultimaker. (z.d.). Geraadpleegd 24 april 2015, van <https://ultimaker.com/en/community/view/1853-pla-shrinking>

polyester en epoxy online polyester epoxy kopen. (z.d.). Geraadpleegd 2 juli 2015, van <http://www.polyestergigant.nl/>

Polyesterhars & epoxyhars - Harjonpolyester.nl. (z.d.). Geraadpleegd 2 juli 2015, van <http://www.harjonpolyester.nl/>

Polyestershoppen.nl - Leverancier in polyester en epoxy. (z.d.). Geraadpleegd 2 juli 2015, van <https://polyestershoppen.nl>

Polyhydroxyalkanoates. (2015, januari 2). In *Wikipedia, the free encyclopedia*. Geraadpleegd van <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Polyhydroxyalkanoates&oldid=640625761>

Poly-Service de shop voor polyester, epoxy, glasmat, coatings en meer. (z.d.). Geraadpleegd 2 juli 2015, van <http://www.polyservice.nl/home.php>

Rapid Prototyping Materials. (z.d.). Geraadpleegd 20 juni 2015, van [http://www.additive3d.com/mat\\_lks.htm](http://www.additive3d.com/mat_lks.htm)

Rosato, D. V., & Rosato, M. G. (2012). *Injection Molding Handbook*. Springer Science & Business Media.

Sauer, M. (z.d.). Caseïnes en zetmeellijmen. [smeermiddelen.pdf](http://www.kmyca.be/tips/smeermiddelen.pdf). (z.d.). Geraadpleegd van <http://www.kmyca.be/tips/smeermiddelen.pdf>

Spuitgieten.pdf. (z.d.). Geraadpleegd van [https://dub128.afx.ms/att/GetAttachment.aspx?file=4d34ab80-cbd1-440e-b5fb-d6f0dbfb57ef.pdf&ct=YXBwbGljYXRpb24vcGRm&name=cGRmX2JlcmdodWlZxZlucGRm&inline=0&rfc=0&empty=False&cid=174523d9f907b0b9&entryPt=download&biciPrevious=d6b4e2e2-347e-4ac7-8d88-30113818a5c1\\_0337258c3d5\\_10420&hm\\_\\_login=martijn1092&hm\\_\\_domain=hotmail.com&ip=10.148.146.8&d=d2898&mf=0&hm\\_\\_ts=Tue%2c%2002%20Jun%202015%2009%3a25%3a02%20GMT&st=martijn1092&hm\\_\\_ha=01\\_3ad56af7c1aad6218d1016ae17c7b2c51b58e2a3b9b8ba589efb20d0b98a2e33&oneredir=1](https://dub128.afx.ms/att/GetAttachment.aspx?file=4d34ab80-cbd1-440e-b5fb-d6f0dbfb57ef.pdf&ct=YXBwbGljYXRpb24vcGRm&name=cGRmX2JlcmdodWlZxZlucGRm&inline=0&rfc=0&empty=False&cid=174523d9f907b0b9&entryPt=download&biciPrevious=d6b4e2e2-347e-4ac7-8d88-30113818a5c1_0337258c3d5_10420&hm__login=martijn1092&hm__domain=hotmail.com&ip=10.148.146.8&d=d2898&mf=0&hm__ts=Tue%2c%2002%20Jun%202015%2009%3a25%3a02%20GMT&st=martijn1092&hm__ha=01_3ad56af7c1aad6218d1016ae17c7b2c51b58e2a3b9b8ba589efb20d0b98a2e33&oneredir=1)

Standaard deurmaten of deuren op maat? | Skantrae. (z.d.). Geraadpleegd 21 juni 2015, van [http://www.skantrae.com/service\\_center/veelgestelde\\_vragen/standaard\\_deurmaten.aspx](http://www.skantrae.com/service_center/veelgestelde_vragen/standaard_deurmaten.aspx)

*Stoelen uitprinten met 3D-printer.* (2013). Geraadpleegd van [https://www.youtube.com/watch?v=kPFnPBW\\_omg&feature=youtube\\_gdata\\_player](https://www.youtube.com/watch?v=kPFnPBW_omg&feature=youtube_gdata_player)

SURF-X-FLUSH-2000-TDS-APRIL-2015tf.pdf. (z.d.). Geraadpleegd van <http://gsp-usa-inc.com/wp-content/uploads/2015/05/SURF-X-FLUSH-2000-TDS-APRIL-2015tf.pdf>

TASK\_2\_3\_TB.pdf. (z.d.). Geraadpleegd van [http://www.smooth-on.com/tb/files/TASK\\_2\\_3\\_TB.pdf](http://www.smooth-on.com/tb/files/TASK_2_3_TB.pdf)

Ultimaker 2 Family | Ultimaker. (z.d.). Geraadpleegd 23 juni 2015, van <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-2-family>

Vacuüm transport. (z.d.). Geraadpleegd 29 juni 2015, van <http://www.agratechniek.nl/?p=85>

Vatenhandel > Stalen vaten kopen. (z.d.). Geraadpleegd 1 juli 2015, van <http://www.blomamsterdam.nl/vatenhandel/stalen-vaten>

Viba, Movam. (z.d.). Telefoongesprek met bedrijven: Viba en Movam.

Vosschemie. (z.d.). Geraadpleegd 2 juli 2015, van <http://www.vosschemie-benelux.com/nl/c/products/cat/2>

Wohlers, T. T., Wohlers Associates. (2012). *Wohlers report 2012: additive manufacturing and 3D printing state of the industry : annual worldwide progress report*. Fort Collins, Col.: Wohlers Associates.

Xiaofeng Ren en Mark Soucek. (2014). Soya-Based Coatings and Adhesives. In *Soy-Based Chemicals and Materials* (Vol. 1178, pp. 207–254). American Chemical Society. Geraadpleegd van <http://dx.doi.org/10.1021/bk-2014-1178.ch010>

Zhu, D., & Damodaran, S. (2014). Chemical phosphorylation improves the moisture resistance of soy flour-based wood adhesive. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(13), n/a–n/a. <http://doi.org/10.1002/app.40451>

## Lijst van afbeeldingen

Figure 1 - Indeling van de materiaalaangroei-technieken naar wijze van uitharding van het werkstukmateriaal.(Kals, 2007) .....	6
Figure 2 - Voorbeeld voor het opbouwen van een product uit laagjes.....	6
Figure 3 - Benadering van een twee dimensionaal CAD model met het STL model. ....	6
Figure 4 - Onderdelen van een FDM 3D printer .....	7
Figure 5 - Eigenschappen van filamenten die hout bevatten.....	8
Figure 6 - Het printen van producten van cement met Contour-Crafting.....	10
Figure 7 - De robot die Dirk van der Kooij gebruikt voor het produceren van meubels .....	10
Figure 8 – Links een Potterbot, rechts een test met een spuitmond van 16 mm. ....	10
Figure 9 - Categorisatie van lijmen door herkomst en uithardingsprincipe. De belangrijkste eigenschap is beschreven.....	14
Figure 10 - De grootte van de zaagseldeeltjes is gevarieerd.....	17
Figure 11 - Zeef met 10 mm gaatjes.....	17
Figure 12 - Zeef met 3mm gaatjes .....	17
Figure 13 - Zeef met 2mm gaatjes. De fijne graad is hiermee twee maal gezeefd. ....	18
Figure 14 - Tabel met de lijmsorten die gebruikt zijn in experiment 1 met het percentage zaagsel op volume. ....	18
Figure 15 – Experimentopstelling .....	18
Figure 16 - Zaagsel gemengd met behanglijm .....	18
Figure 17 - Deponeren van de strepen.....	18
Figure 18 - Tabel Viscositeiten van bekende stoffen .....	19
Figure 19 - Testen van de stapelbaarheid van verschillende lijmsorten. V.o.n.b.: Contactlijm, polyesterplamuur, behangplaksel, muurvuller, allesvuller.....	19
Figure 20 – De gedeponeerde strepen. Stukjes zijn afgesneden om de uitharding te bekijken. V.l.n.r: Allesvuller, muurvuller, behangplaksel, polyesterplamuur, contactlijm.....	19
Figure 21 - Task 3 polyurethaan giethars van Smooth-On .....	20
Figure 22 - Tabel met hoeveelheden toegevoegd zaagsel .....	20
Figure 23 - Kleine spuiten met een afgesneden kop en met een 13mm uitgeboorde kop .....	21
Figure 24 - Spuit wordt schuin gehouden bij extrusie.....	21
Figure 25 - Geëxtrudeerde strepen, lage percentages. V.l.n.r.: 9,1%; 16,7%; 28,6%; 33,3%, 2x 23.1% zaagsel. ....	21
Figure 26 - Horizontale extrusie .....	21
Figure 27 - Verticale extrusie .....	21
Figure 28 - Geëxtrudeerde strepen, hoge percentages. V.l.n.r: 2x 23,1%; 2x 41,2%; 2x 33,3% zaagsel. ....	21
Figure 29 – Bij afschuiving in een vlak breekt de cilinder, waardoor er een groffe streep gevormd wordt .....	22
Figure 30 - Close-up resultaten reproduceerbaarheidstest. Het verschil tussen verticaal en horizontaal extruderen is duidelijk te zien. De gestapelde strepen zijn vormvast, de onderste belastbaar. ....	22
Figure 31 - Vergelijking van de reproduceerbaarheidstest (boven) met de strepen met hoger percentages uit experiment 2 (onder).....	22
Figure 32 - Doorsnede van een kitkoker met de insert.....	23
Figure 33 - Insert voor het begeleiden van het mengsel naar de spuitmond .....	23
Figure 34 - De uitgeboorde insert, kitkoker en een reststuk van het mengsel .....	23
Figure 35 - Opstelling van het experiment.....	24
Figure 36 - De vultrechter is gescheurd. ....	24
Figure 37 - Het mengsel is geperst, het blijft in de vorm van de schroef staan. ....	24
Figure 38 - De scheur in de trechter zit voor de versmalling. ....	24
Figure 39 - De onderdelen van de vleesmolen na schoonmaken. Vanaf links met de klok mee: Gescheurde deel van de trechter, ringen ter vervanging van de gatenschijf, de schroef met materiaalverplaatsing van rechts naar links, tweede deel trechter, blokje van het uitgeharde mengsel, schroefpin om de hendel vast te zetten, schroefring om de onderdelen in de molen te vast te zetten, de hendel. ....	25
Figure 41 - Intermediate Bulk Container voor vaste stoffen.....	26
Figure 41 - Metalen vat.....	26
Figure 42 - Vacuüm transportsysteem voor lichte materialen, zoals granen, zaden en pellets.....	27
Figure 43 - Peristaltische pomp. Het grijze deel draait rond, waardoor de afknellingen in de slang worden verplaatst en de opgesloten vloeistof wordt rondgepompt. ....	27
Figure 44 - Sigma kneder met extrusieschroef.....	27
Figure 45 - De schroef van de vleesmolen, extrusierichting is van rechts naar links. ....	28
Figure 46 - Schematische tekening van het kunststof-extrusieproces; 1. Aangedreven schroef; 2. Granulaat; 3. Extrusiematrijs; 4. Extrusieprofiel .....	28
Figure 47 - Verschillende mengelementen voor kunststofextrusie .....	28
Figure 48 - Een excentrisch mengelement voor modulaire extrusieschroeven .....	28
Figure 49 - Dubbele schroef extruder met mengelementen.....	29
Figure 50 - Een dubbele schroefextruder met mengelementen, 2 soorten vaste stof en een vloeistof worden gemengd.....	29
Figure 51 - Schematische tekening van mengproces in combinatie met extruder; Geel = zaagsel; Rood = Giethars comp. A; Blauw = Giethars comp. B. Links: Een sigma kneder met extrusieschroef en een verticale extruder opstelling. Rechts: Extruder met mengelementen en inspuitpunten voor gietharscomponenten.....	29

Figure 52 – 1a. Lange vezels die in elkaar verstrikt zitten. 1b. Korte vezels, zonder verstrikking. 2. Te hoge viscositeit bindmiddel; weinig afschuiving. 3. Te lage viscositeit bindmiddel; bindmiddel tussen de vezels uit, vezels op elkaar geeft hogere weerstand. 4. Te weinig bindmiddel; vezels op elkaar geeft hoge weerstand.....	30
Figure 53 - Verschillende spuitmonden gebruikt bij de experimenten. V.l.n.r.: Kleine spuit afgesneden, kitkoker, kitkoker met insert, kitkoker met insert uitgeboord, vultrechter bij vleesmolen, kromme spuitmond.....	30
Figure 54 - Variaties in extruderen. 1. Horizontale extrusie, kleine bocht behoudt nette streep. 2. Verticale extrusie met te snelle beweging, breekt de streep in plakjes. 3. Verticale extrusie met langzame beweging, materiaal wordt op oppervlak geperst.....	31
Figure 55 - Kromme spuitmond die meedraait met de printrichting.....	31
Figure 56 – Voorbeeld van extrusieschroef en behuizing met kunststof beschermdelen. ....	31
Figure 57 - Schematische weergave van het proces dat het materiaal doorloopt; vanuit de IBC en vaten wordt het materiaal met vloeistofpompen en vacuümpomp naar de printkop getransporteerd. Lucht-materiaal scheider van vacuümsysteem, lost het zaagsel in de extruder De extrusiebuis met schroef met mengelementen en inspuitspunten voor gietharscomponenten, mengt het zaagsel met de giethars. Daarbij wordt druk opgebouwd voor extrusie door de draaibare spuitmond heen. (Rood = Gietharscomp. A; Blauw = gietharscomp. B; Geel = zaagsel).....	32
Figure 58 - Detail extrusieschroef. Met transportdelen en mengdelen in de schroef. Aanvoer van zaagsel en lijmcomponenten. Afvoer van lucht. ....	32
Figure 59 - Cartesiaanse 3D printer.....	33
Figure 60 - Delta 3D printer .....	33
Figure 61 - SCARA-arm 3D printer.....	33
Figure 62 - Polar 3D printer.....	34
Figure 63 - Robotarm met grijper .....	34
Figure 64 - EEW ProTec overhead CNC machine. Gemakkelijk om te bouwen naar een 3D printer. ....	34
Figure 65 - SkyCam-gebaseerde 3D printer waarvan de plaatsing door middel van het aantrekken van de kabels plaatsvind. ....	34
Figure 66 - Robotarm 3D printer met kunststof extruder van Dirk van der Kooij.....	35
Figure 67 - Truss en buismateriaal voor constructies .....	35
Figure 68 - Cartesiaanse 3D printer van Enrico Dini die werkt met een powder bed systeem .....	35
Figure 69 - Tekening van hoe de volledige printer er uit kan zien. ....	37
Figure 70 - Tabel schatting werkuren bij een printopdracht.....	39
Figure 71 - Printkop voor Fab@Home printer – bovenaanzicht .....	31
Figure 72 - Printkop voor Fab@Home printer - zijaanzicht.....	31

## Bijlagen

- A. Verslagen van studenten IO; vooronderzoeken printen met lijm-zaagsel mengsels



# Binder Jetting (3DP) as additive manufacturing method to manufacture furniture using a wood-based material

E.J. Anninga, D.M. Bijvank, A.J. Gerrits, T.H.J. Vaneker<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>T.H.J. Vaneker, University of Twente, Faculty of Construction Engineering, Department of Mechanical Engineering

\* Corresponding author. Tel.: +31 53 4892472;. E-mail address: t.vaneker@utwente.nl

## Abstract

Additive manufacturing (AM) is an emerging technology. Companies and consumers are trying to apply the new possibilities that AM offers to their benefit. This paper discusses the possibilities of a furniture company which is trying to save money by applying AM. The case is about how to turn wood fibers into new furniture. Different possibilities are researched and discussed, ultimately resulting in Binder Jetting as most suitable technique. To use Binder Jetting in this specific application, a new process is defined including a matching machine. Testing is required to underpin the stated assumptions which are based on research. AM, and more specific Binder Jetting, is expected as suitable as solution for the mentioned case.

© 2014 The Authors. Published by Elsevier B.V.

Peer-review under responsibility of The International Scientific Committee ETRIA.

*Keywords:* Additive manufacturing, Binder Jetting, 3DP, Wood printing.

## 1. Introduction

Coors is a company in Rotterdam that manufactures furniture. One of its waste products is sawdust. One sea container full of sawdust is only worth €25. To give this cheap material more value, the company wants to use additive manufacturing (AM) to produce large furniture objects out of the sawdust. An additional advantage is the extra gained conspicuousness. At the moment, there is only the idea and the company has not yet a process in use. Therefore this project starts with a clean sheet.

The objective of this project is to design a machine, which uses an AM technique to transform the sawdust into furniture. The maximum dimensions of the new furniture are 3000x2000x1500mm (LxWxH), comparable with the size of a reception desk. The maximum volume of the furniture is in case of a massive block 9.000 liter.

Important parameters within the development are:

- The percentage sawdust used in the furniture
- Accuracy of the printing process
- Speed of the process
- Costs of the machine
- Particle size
- Layer thickness

These parameters will be defined and underpinned during the project.

This case needs some visualization and guidelines during decisions. Therefore a furniture object (a reception desk) is chosen as reference object that could be printed with the machine that is developed. The reception desk is shown in

Figure 1 and Figure 2, and has dimensions of 2500 x 1500 x 1200 mm (LxWxH). The estimated volume of the object is 1000 liter.



Figure 1 Front side of the reference object



Figure 2 Backside of the reference object

## 2. Analysis

### 2.1. AM techniques

There are plenty of additive manufacturing methods. Each method has its own techniques, material possibilities, and size limitations to build a product layer by layer. Wohlers defines seven process groups for AM[1]. These seven processes can be divided in two categories, based on the method layers are being built; Individual Deposition and Layered Deposition. Material Extrusion, Material Jetting and Directed Energy Deposition belong to the category of Individual Deposition. They use techniques where only material is deposited where the to be produced part needs it. Binder Jetting, Sheet Lamination, VAT Polymerization and Powder Bed Fusion belong to Layered Deposition and use a process in which always first a full layer of material is deposited, and hereafter selective parts of this layer are processed. AM with use of wood as main deposition material does not immediately exclude one of the two categories of processes. However, several preconditions of the project do exclude some specific types of AM techniques.

In printers that make use of *Material Extrusion*, also called *Fused Deposition Modelling (FDM)* filaments are guided through an extruder onto a vertical moving platform. The material is heated and melted in the nozzle, and then extruded out for accumulating forming [2]. Wood is already being used to print objects with this technique. However, the material that is being extruded from a nozzle is then a blend and consists for maximum 40% of wood. Those products mainly consist of thermoplastics (ABS, PLA) to improve material properties. The wood is mainly added to provide an appearance of wood, instead of making use of the material properties of wood, or being ecofriendly.

*Material Jetting* uses a jetting device to deposit material. Often photopolymers are used as deposit material deposited by a jetting device and UV light transmitted by a UV lamp cures the UV-sensitive material.

*Directed Energy Deposition (DEP)* is a process in which powder material is inserted into the focus of a power source. This category includes processes as laser cladding (in which most of the time metal powder is inserted in a laser beam), electronic beam deposition (where an electron beam is used as power source) and arc wire deposition (where a welding process is simulated and layer by layer builds up a product). All these processes are mainly used for production with metals and repairing or coating purposes.

With *Binder Jetting* first a layer of powder is created. A jetting device is used to deposit binder material on a cross section of that layer. Binder Jetting can be used to produce very large products, up to normal room size. Multiple materials can be used, as long as there is a binder agent which binds the (powder) material. Binder Jetting provides the opportunity to build with many materials, but creates low adherence products that are often not so strong.

In the *Sheet Lamination* production method a full layer of solid material is deposited and subsequently a cross

section of the product is cut-out in this layer. Each layer is bonded together with an adhesive, often followed by a heat and pressure treatment. Sheet Lamination is a relative cheap process and several materials can be used, since no chemical reaction or difficult conditions are necessary.

*VAT Polymerization* makes use of a photo polymerization liquid which is deposited as layer. A light source is used to harden the liquid on specific places. It is a quick process, in which distinction is being made between Digital Light Processing (DLP, where a projector and multiple mirrors are used to harden the liquid) and Stereo lithography (SLA, using a laser and a mirror to shine on the liquid). With SLA, large products can be produced. With DLP products can be produced very quickly through the hardening of a whole layer at a time instead of one spot on a layer. With VAT polymerization products are being built up from photopolymers.

*Powder Bed Fusion* uses laser or electronic beam techniques to sinter or melt parts of layers of powder onto each other. It is a slow and expensive process, but delivers high-quality objects with long lifecycles.

### 2.2. Current use of wood in AM

Nowadays, the main focus of printing with wood is to generate a product with the looks, feels and even the smell of wood. Different companies already have created filaments for FDM printing machines. Wood polymer composite filaments contain harmless binding polymers and up to a maximum of 40% recycled wood[3]. This way it has a similar thermal durability as PLA and can be printed between 175°C and 250°C. Different printing temperatures will result in different output colors. Printing at a temperature of 175°C will create a lighter printed line than printed at 250°C. This way for example tree rings can be faked and the printed “wooden” object will gain more credibility[4]. After printing the object, it is possible to cut, grind and paint it.

There also is some research going on with the aim to use the waste material of wood as an alternative material due the low cost of it. One of these developments chose to make use of Binder Jetting, because this additive manufacturing technique has the possibility to produce parts from many different kinds of powder materials[5]. Moreover, the production costs of this specific technique appear to be significantly less than for other additive manufacturing techniques[6]. Within this development, it has been tried to use a highest as possible wood powder (WP) percentage combined with existing powders (EP) used in Binder Jetting processes. The mechanical properties tested were maximum stress, maximum strain, surface quality, dimensional accuracy and hardness. The conclusion of this research was that wood is viable as new material for Binder Jetting. Mixing 50% WP and 50% EP has produced the highest tensile strength. Increasing the amount of WP resulted in a reduction of dimensional accuracy and improvement of the hardness. Though, surface quality can also be improved by making use of a finer powder. Worth mentioning is that

they only tested blends of 0%WD/100%EP, 25%WD/75%EP, 50%WD/50%EP and 75%WD/25%EP.

Another research project has, as well, used the Binder Jetting method as AM technique with wood. They proved it is possible to print with up to 80% wood powder, mixing it with a Urea-Formaldehyde plastic resin glue [7]. A drawback is that the strength of the printed pieces would not be good enough for furniture. Optimization is necessary.

### 2.3. Feasibility of the different AM techniques

While researching the different possibilities to use additive manufacturing to process sawdust into furniture, the different techniques have been compared. In this subsection the feasibility of each process with wood is shortly stated.

*Directed Energy Deposition* is as wood-processing technique not feasible. This technique is too expensive to use for processing wood. Moreover, metals can conduct electricity and wood cannot.

*Light Photopolymerization*: The way to process wood using photopolymerization is to blend the woodfibers with the photopolymer. Two drawbacks of this process are the velocity and the size of the particles. Question is how large the percentage of wood can be in order to create an efficient composition. A big drawback is the cost of the resins used in this process.

*FDM/Material extrusion*: This way of additive manufacturing is suitable for processing woodfibers. Currently, it is possible up to a percentage of 40% of wood. The filaments, partly made out of wood, are being melted during the process. It is a feasible process which currently emphasizes to create wood-like products instead of processing as much as possible wood material.

*Binder Jetting* is already being used to process wood, but not with 100% wood. Using only woodfibers is not possible because there is always need for a binder substance. In current processes, the binder is a polymer. Because of these developments Binder Jetting will be further explored to fit the manufacturer's requirements.

*Material Jetting* uses a jetting device and a fluid. In current commercial machines the nozzles of the jetting device are small, up to 100 micrometer, and is not able to process wood fibers. In theory it could be possible to use this technique by making use of a photopolymer and multiple nozzles. Widening the nozzle and other adjustments would have to be made, but with current knowledge it is too detailed to fit the scope of this research. Another issue is the scalability of the process. Large objects are expected to be hard to create, because the process is based on the deposition of very small droplets. The expectation is that other processes can better be scaled up in speed and strength. Furthermore, Material Jetting machines are one of the most expensive ones in the world. Therefore this process is not chosen to be elaborated further in this research.

*Powder Bed Fusion* is not suitable to process woodfibers because the technique is based on a material's melting

point. Wood will burn before it melts and so this technique is passed for this application.

*Sheet lamination* is neither applicable as AM technique for recycling sawdust. The furniture size is a serious drawback as well as the extensive preprocessing process in which sawdust must be bonded in solid layers.

### 2.4. Selected techniques.

Material Extrusion and Binder Jetting are both selected to elaborate further as possible AM method in the remaining of this paper. These processes are able to process woodfibers and suitable for the specific application. In the following paragraph, the techniques are elaborated to make an underpinned selection of proposed process.

In appendix A and appendix B, research tables of FDM/ Material Extrusion and Binder Jetting are included.

## 3. Further research on FDM and Binder Jetting

### 3.1. FDM

The FDM manufacturing process already offer the use of wood as element in a wood plastic composite extrusion process.[8]. However, the material specifications of sawdust prevent the use of blending a high percentage of sawdust in thermoplastic material used as filament.

In order to overcome the problems of the material specifications of sawdust within a FDM process, a photo polymeric resin can be added to sawdust material. In contrast to a commonly used polymer this takes away the need to melt or liquefy the mixture.

Photopolymers already have been applied in other AM methods like DLP and Stereo lithography. They also have been used in combination with a conventional Binder Jetting process, where a low-viscous binding solution is replaced with a photo-polymer resin [9]. Research studies have not documented experiments with photopolymers used as binder material in FDM processes. Therefore, the feasibility of this process is yet unknown.

Important for a successful implementation of such process would be extensive research on the pre-processing of the sawdust and the mixture ratio of photo polymeric material and sawdust. Since the particle size of the sawdust mix can be controlled, the mixture ratio can be of big importance. In wood plastic composites (WPC's), in which the wood:plastic ratio can already range up to 80% [10]. The main material selection factor of the thermoplastic material there is a melting or softening temperature less than the thermal degradation temperature of wood ( $\approx 210^{\circ}\text{C}$ )[11]. For this specific application sawdust particles mixed with the same photo polymeric material as often used in Stereo lithography processes are advised. The liquid polymer, that only reacts under influence of specific UV-light, prevents the possibility of clogging in the extruder and does not need a heating element that would influence the strength of the wood particles. Then the melting temperature is of less importance.

However, to determine an optimal ratio and particle size, further practical simulation and testing is required.

### 3.2. Binder Jetting

Binder Jetting is an AM method for direct digital fabrication that selectively prints a liquid binder into a bed of loose powder. It will form a green part whose shape is given by CAD specifications[12].

Successful realization of a specific binder jetting process is about formulating a suitable powder-binder combination and detailing both printer and post-processing [6].

A significant advantage of binder jetting is the potential of using a wide range of materials. It only needs to be a deposable powder with particle size in a suitable range[6]. A instantiation of a Binder Jetting process with a new material combinations require a number of steps:

1. Formulation of powder.
2. Selection of binding method.
3. Formulation of the liquid binder and testing its suitability for printing and interaction with the powder.
4. Specification of printing process parameters.
5. Specification of post-processing procedure.

The acceptable particle sizes are different for each deposition process. Particles which are 20 micrometer or larger are preferably deposited in a dry state, while smaller than 5 micrometer can be deposited in both dry and wet state[12, 13] Dry state deposition is a simpler and faster process than wet state deposition [12, 14].

A drawback of Binder Jetting is that parts typically have considerable porosity [15]. The packing ratio, and correspondingly the strength, may be increased by reducing the particle sizes. However, larger particles are easier to spread. Post-processing is probably necessary to retrieve the demanded strength [12, 16].

### 3.3. Selection of technique

The elaboration of FDM and Binder Jetting in previous paragraphs gives enough background to make a decision between both techniques. For this specific application FDM is a technique where the right information and knowledge is lacking right now. It is as AM method feasible to process wood fibers, but the information to elaborate this technique into a machine and process is insufficient.

What remains is a technique with great looking potential. Binder Jetting seems as AM method quicker and as process on itself less expensive than FDM. The wood fibers can be processed and the scalability of the new machine complies with the requirements of the case.

## 4. Elaboration of Binder Jetting as selected technique

### 4.1. Defining the new process

With regards to printing with wood fibers, dry state deposition is preferred with a particle size of 200 micrometer, which for binder jetting is already quite big.

Tests had shown that it is possible to print wood powder with a particle size of 200-300 micrometer [7]. To get those particle sizes the sawdust needs to be preprocessed. A possible solution is using a grooved colloid mill. This way a constant particle size with minimal variation can be retrieved and there will be no need for sieving the material first[5, 7, 17, 18].

Each spread layer is preferably at least three particles thick due to issues of powder flow and spreadability and should be thicker than the largest particle size [14, 19]. Due the large size of the to be printed objects, the accuracy cannot be very high. This would be cost and time inefficient. And, in advance, the spreadability would have needed to be increased even more. The proposal would be a layer thickness of 2mm, resulting in approximately 10 particle thicknesses per layer.

To create an extra strong adhesive between the particles they need to be dried. It also prevents clotting and ensures a better spreadability. An option would be pre-processing in which the wood is dried for 8 hours in an oven of 70° Celsius [5].

To generate a powder which is printable with Binder Jetting, the preprocessed wood fibers need to be blended with a binder sensitive powder. Worth researching is the use of Urea-Formaldehyde plastic resin glue[7], an existing powder (for example zp130 for Z Corp machines)[5] or lignin[20] as binder for wood material.

For the Urea-Formaldehyde plastic resin glue, water can be used as binder. Instructions give an indication drying time of 1 hours at 20 Celsius and 0 minutes at 0 Celsius. [21] Most probably increasing the temperature will further shorten the drying time. It is worth testing if this blend of wood powder and Urea-Formaldehyde plastic resin glue can be hardened faster at a temperature of 0 Celsius. However, before applying a new layer, the previous layer does not have to be fully hardened.

As binder alcohol is also a possibility. The setting temperature can be most probably put at 75°Celsius, just below the boiling point of alcohol. Another advantage will be that the binder has a lower surface tension, making it easier to deposit[22]. But, of course, it is bounded to some extra safety measures. To create more strength, it is advisable to generate some pressure on new glued layers while drying. This will increase the packing ratio and is also advised by the resin supplier to let the glue work even better. Pressure can be applied by the roller which also spreads the layers. Just as Urea-Formaldehyde plastic resin glue in normal applications, a blend of wood powder with an existing powder needs to be strengthened. Generating some pressure is a good option. Also the ratio between the amount of existing powder and the wood powder needs optimizing.

To generate a wood grain, temperatures need to be varying between 175°C and 250°C[4]. Though, it needs to be tested if the different kinds of glues are not negatively affected by such kind of temperatures. Applying such a temperature will also be a big challenge. A better option is to vary the amount of pigment within the binder between 0- 10%. This will also provide different tints of layers[23, 24].

Urea-Formaldehyde plastic resin glue is much cheaper than existing powders used in Binder Jetting processes. In addition, the processes do not differ much. So in this paper only the Urea-Formaldehyde plastic resin glue blend will be elaborated.

As mentioned before, tests with wood in binder jetting processes have shown that after increasing the WP ratio within the blend with EP, the strength and hardness increased up to 50% WP. After this a step to 75% WP was taken, resulting in a much lower strength [5]. So expected is that the optimum will be between 50% WP and 75% WP. It is possible to print up to 80% WP and 20% Urea-Formaldehyde plastic resin glue, but the strength for this application needed to be increased [7]. Some options to improve the strength were listed above and due to the conditions of the new process, the optimum is expected to be around 70% WP.

The tensile tests showed a maximum stress value of 4 MPa and a maximum strain value of 4.6% [5]. To give a comparison, this maximum stress value corresponds to the maximum stress of birch wood, while the maximum strain corresponds to fir wood [25]. The proposed process has to strive for such strength. Currently, furniture is already made out of such kinds of wood, though, post-processing is desirable to generate extra surface strength.

Consumer based, for \$825 it is possible to buy 300 pounds (136 kg) of Urea-Formaldehyde plastic resin glue [26]. Taking into account that as company you will pay less due to economies of scale, VAT benefits and direct factory purchases the cost will be even lower. The density of this Urea-Formaldehyde plastic resin glue is 5 pounds per gallon (0.6 kg/L). This means you get 60 gallons (227 L) of Urea-Formaldehyde plastic resin glue [27].

Normally, 10 Liters powder needs to be mixed with 4 liters of water, however, the wood powder will also absorb water. This means the amount of water needs to be higher than 4 liters per 10 liters green part.

As process chamber a volume size of 2 x 3 x 1.5 meters is needed ( $9\text{m}^3 = 9000\text{L}$ ). Since expected that 70% of the mixture can be wood powder and 30% is Urea-Formaldehyde plastic resin glue, 8400 Liters WP and 3600 Liter UFRG is needed. Not all of this will be used, and most of it will be reusable, but these will be the starting cost of the resin. Total costs of this resin will be about \$9.000. An

average piece of furniture then needs around 1.000 liters, meaning \$1.000 of direct material costs of the resin of in the AM process.

As post-process, the green part will be coated. Coating the surface has the dual benefit of sealing porosity and, by viscous forces, smoothing the stair-step effect. Post-processing is often required to make the part stronger and give the binder-material better mechanical and structural properties [28, 29].

As summary of this paragraph, Fig. 3 shows a schematic overview of the developed process.

#### 4.2. Deposition of the water

The chosen liquid (water) for the binding of saw dust and urea-formaldehyde does not contain a binder component, but must be deposited into the powder bed to initiate the powder binding process [6]. To function effectively as activator for the glue, the deposited water needs to be able to penetrate the top layer of powder and sufficiently wet the next layer to ensure adhesion between layers [30]. Since water is used as main component and its low viscosity, no problems are expected. The optimum moisture content of glued particles with urea-formaldehyde is 6-7% in the core and 11-13% in the surface [31].

The advised print head for the deposition of water is a drop-on-demand (DoD) thermal inkjet head, moving across the surface in the length axis. Thermal inkjet print heads are working by vaporizing the liquid in the print head and using the subsequent volume expansion to eject the ink. With water as activator element, solid material in the print head will not be problematic.

Many print heads have a maximum surface tension for the carrier fluid. Water is at room temperature (20° Celsius) exceeds this value often, and therefore need to be reduced. In 4.4 Design and Details the exact proposed content of the activator will be further elaborated.

#### 4.3. Spreading the powder

The properties of the printed part depend, among others, on the density of the powder [6]. The bulk density of the powder substrate is directly related to the presence of voids in the end result. Therefore, in order to create a stable desk

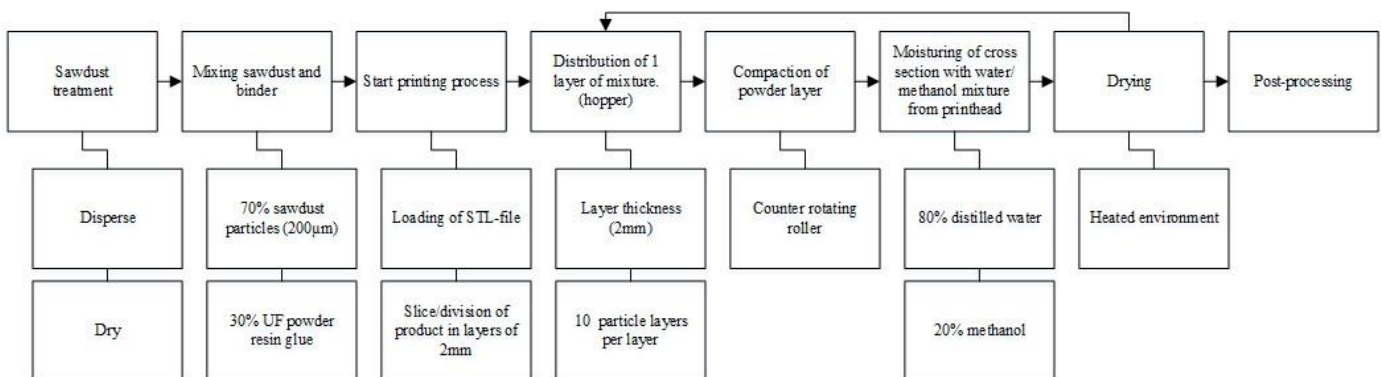


Figure 3 Schematic diagram of the new developed Binder Jetting process

a high packaging density at every layer is desirable for minimizing compressibility [32].

A common method of dry powder deposition is a traversing counter-rotating roller that can deposit new layers of material without disturbing the previous layers and serves to push the new powder in front of the roller as it traverses to assist in the powder distribution. Other applicable methods for the blend of saw dust and urea- formaldehyde can be fluidized beds, traversing doctor blades (that can be vibrated to aid in powder flow), rotating sieve drums and charged plates [6]. Forward-rotating rollers combined with doctor blades can create a desired high compaction [33].

Due the large particle size of the wood particles used in the Binder Jetting process the powder material density is relatively low, resulting in the need to make the bulk density of the powder substrate higher by compacting it. With a counter-rotating roller the density is expected to become better. Vibration as option to further compact the powder can be investigated. A doctor blade, although the easiest way of powder spreading, is expected to result in a too low accuracy. Since no real compaction occurs and the fact that the blade will not be perfect straight and smooth, unevenness of the blades surface are transferred over the complete powder bed, possibly disturbing the deposited layer [33].

Although mathematical approaches of powder compaction have been conducted, current efforts for obtaining the optimum properties of the spread powder layer are based on trial-and-error techniques, which must be carried out for any new powder material and characteristics [34]. In this case this is as well necessary.

To decrease the size of the machine and to improve the flexibility of powder storage space a hopper-based powder

delivery system is advised. The powder reservoir is separated from the build area, providing extra flexibility for the placement of the powder reservoir. A feeding system is used to fill the hopper, and the hopper itself is then used to deposit powder in front of an integrated roller [28].

#### 4.4. Design and details

The deposition of the water based activator is a delicate process which requires delicacy on both deposition accuracy and deposition speed. Binder Jetting is a relatively fast AM process, which can contribute to the rapid manufacturing of furniture. Often UF powder resin is mixed in advance with a water based mixture [31]. In this specific process a water based emulsion is added later in the process. There already have been conducted tests with water based solvent deposited on other substances like ceramics. In several studies a mixture of distilled water and ethanol in the ratio 80:20 is being used [22, 35]. It is important that, with respect to the activator, the surface tension and viscosity is suitable with the print head. Therefore, for the testing with the UF sawdust powder mixture, a water-based liquid (water normally with surface tension of 72 dynes/cm) consisting of distilled water and the

addition of a lower surface tension fluid, such as methanol, is advised [6]. This is expected to result in a liquid mixture that is suitable to be deposited through the print head.

Because of the large surface and the lower resolution requirements of the printer, a print head unit covering half of the width of the powder bed is recommended with a deposition speed of 0.5m/sec, comparable to the binder jetting machine from Voxeljet (VX4000). With a resolution of 150dpi it is expected that the activator will be deposited accurate enough and the total cost of the print head can be kept reasonable.

The large print head provides the opportunity of a short deposition time that is required because of the relatively long drying and powder deposition time. Due the high layer thickness, the activator needs time to moisture the powdered layer. Therefore the drying and saturation of the layer is set to take place in approximately 80 seconds.

The printing process time of the whole piece of furniture is aimed at a maximum of 24 hours. Therefore the powder deposition time with use of the powder hopper with roller is limited. Within a 24 hour timespan and a proposed layer thickness of 2mm a maximum of 720 layers can be printed. Therefore a maximum processing time of 120 seconds is taken into account for the whole processing of one layer. The powder deposition time is expected to be possible in 40 seconds. With a polished roller with a diameter of 100mm, the surface roughness is reduced and the intended accuracy is achieved.

## 5. Process details

### 5.1. Concept design machine

Table 1 Table with different Binder Jetting machine specifications

Specification	Voxeljet VX4000[36]	Open-source powder based machine[35]	Recommended saw dust printer specifications
Building space (LxWxH)	4000x2000x 1000mm	150x150x125 mm	3000x2000x 1500mm
Particle size	55µm	47µm	200µm
Layer thickness	Max 300µm	120µm (±23µm)	2000µm
Vertical build speed	15,4mm/h	Unspecified	60mm/h
Binder depositing speed	0.5m/sec. ±18sec/layer	60sec/layer	0.5m/sec ±14sec/layer
Powder deposition speed	±20 sec/layer	30sec/layer	±40 sec/layer
X,Y resolution	600dpi	96dpi	150dpi
Number of jets/nozzles	10 printheads. 26560 nozzles. Total width 1120mm.	1 printhead. 12 nozzles	10 printheads. ±6640 nozzles. Total width 1120mm.
Total maximum layers with specified layer thickness	3333 layers	833 layers	720 layers

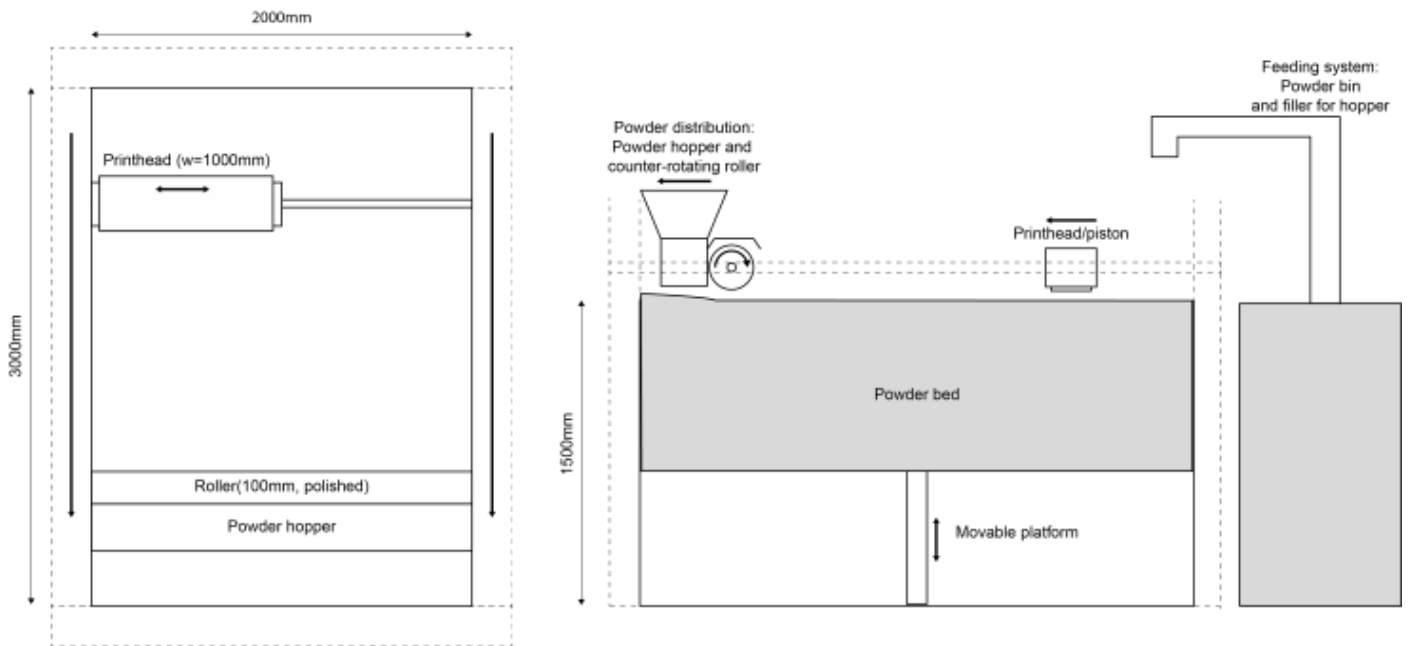


Figure 4 Proposed lay-out of the new AM machine

The main outline of the machine does not differ much from regular large Binder Jetting machines. Most parts and the interaction between parts remains the same, only the parts have been scaled up compared to a regular Binder Jetting machine. Figure 4 shows the proposed set-up of the Binder Jetting machine, including dimensions and its components.

### 5.2. Design rules

Designing for AM is completely different than for conventional manufacturing. Therefore it is important to keep in mind some rules when applying our specified Binder Jetting process for creating furniture.

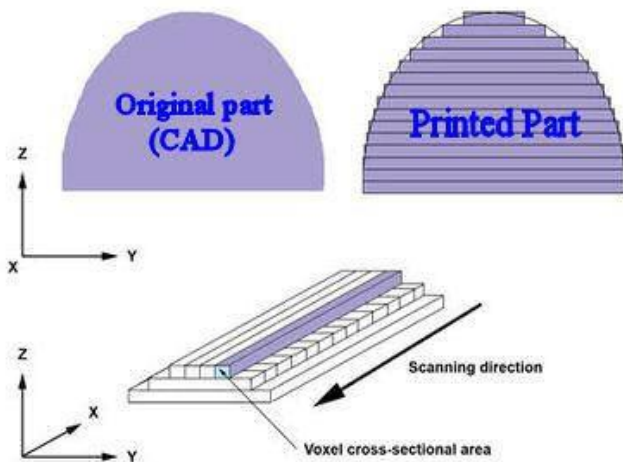


Figure 5 Impression of roughness by layers.

The product may not contain closed hollow spaces, because those spaces will stay filled with material. It should be possible to empty all the unnecessary material from the product to avoid needless weight.

Because the product is printed in the bed of powdered blend, there is no need for support material.

Because the product is printed in layers, the visibility of the layers should be kept in mind. The esthetic impact of the stepwise curves is important. The thickness of the layers is 2mm and therefore visible for the human eye, see Figure 5. Figure 5

During the design of the furniture, this visibility of the layers is an important consideration during design that needs to be kept in mind. Beyond the visibility of the layer thickness, the accuracy is an important issue. All the curves are an approximation of the original shape. Therefore the accuracy of the printed object is always an approximation of the original object. Especially related to moving parts, like drawers, prints are recommended with which you can test the functionality.

As mentioned before, the layer thickness in this new Binder Jetting machine will be 2 mm. In the horizontal plane, recesses therefore have to be at least 2 mm deep. And, on the other side, protrusions have to be at least 2 mm thick.

Because the end product is bounded to the machine specifications, the maximum object measures may be 3000x2000x1500mm (LxWxH) minus the margin necessary to remove the object from the powder bed.

More in general: printing object is a lot different from conventional machining. The mentioned design rules are just a tip of the iceberg, because the differences between conventional design and AM design cannot be caught in a select number of rules.

## 6. Discussion

### 6.1. Testing

As mentioned before, an important part of realizing a specific Binder Jetting process with a new material is testing its suitability for printing. As shown in other tests, the new material is printable. Though, some parameters have been adjusted to our specific requirements and needs to be tested if the new combination does create enough strength indeed. The proposed parameters which need to be tested, including their interdependence, are:

- Particle size of 200 micrometer;
- Dried WP for 8 hours at 70 Celsius;
- 70% WP/30% UFRG blend;
- Water-methanol binder;
- Layer thickness of 2mm.

If the strength is not sufficient, the easiest option is to decrease both particle size and layer thickness. This way the packaging ratio will be increased and the binder will still saturate the new powder layer enough. The big con is the extension of the printing time. Another way to increase the packing ratio is to generate pressure after each applied layer. However, this will increase the printing time as well and, in addition, will make the printing process much more complicated. It is also advisable to test raising the drying time and/or temperature. The most plausible option for this application is to change the blend of WP/UFRG and its binder. As mentioned before, there is an optimum in this ratio. If this proposed blend appears to be not strong enough, most probably the proportion of wood powder has to be decreased.

### 6.2. Costs

To give a founded cost indication the Voxeljet VX4000 has been used as guidance. This machine has similar dimensions and technologies. Though, the Voxeljet has a much higher accuracy. For example, the Voxeljet has a higher resolution (600DPI versus 150DPI) and its layer thickness is considerably lower (approximately 7 times). In advance, the Voxeljet has a splitable building platform, which is, for this application, not necessary. The price of the Voxeljet is about 1.6 million Euro's. Due to the less needed accuracy and no splitable building platform, the production costs of the new machine are expected to be lower.

## 7. Future developments

During the development of the new process, lignin came up as sustainable binder. Lignin is the natural binder in wood, and with use of lignin in the new process the manufactured products could be sold as more natural product with a higher percentage wood based material. There is already research into this matter, and current results show that the wood powder is almost saturated with lignin, so extra lignin as binder would not be a possibility.

Before lignin could work as binder, the lignin out of the wood pulp should be removed. This process is very costly and needs more research, so this is not suitable for the current case [20].

## 8. Conclusion

With regards to the case study a founded proposed process has been established. A new way of using Binder Jetting is developed as well as a machine. This makes it possible to manufacture furniture from woodfibers. Although further testing is needed to underpin the chosen parameters. The chosen AM technique results in a quite expensive machine (fixed costs), but due to low material costs (variable costs) it is possible to earn back the investments if the amount of sales is high enough. The developed process and machine, together with the defined design rules give the furniture manufacturer a clear proposal for their case. AM is emerging, lots of techniques are in research and information is not widely spread. By testing the feasibility of this proposal, it can contribute to the knowledge of new and useful insight concerning AM.

## References

1. Wohlers, T.T., *Wohlers Report 2013: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry : Annual Worldwide Progress Report*. 2013: Wohlers Associates.
2. Yan, Y., et al., *Rapid prototyping and manufacturing technology: Principle, representative technics, applications, and development trends*. Tsinghua Science and Technology, 2009. **14**(S1): p. 1-12.
3. Parthy, K. *Wood filament LAYWOO-D3 suppliers and price compare*. 2013 [cited 2014 30/11/2014]; Available from: <http://www.3ders.org/articles/20130204-wood-filament-laywoo-d3-suppliers-and-price-compare.html>.
4. Parthy, K. *Laywoo D3 new FDM filament can print wood with tree rings*. 2012 [cited 2014 20-10-2014]; Available from: <http://www.3ders.org/articles/20120920-laywoo-d3-new-fdm-filament-can-print-wood-with-tree-rings.html>.
5. Wahab, S., M. Ibrahim, and A. Wagiman, *Development of Wood-Based Composites Material for 3D Printing Process*. Applied Mechanics and Materials, 2013. **315**: p. 987-991.
6. Utela, B., et al., *A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP)*. Journal of Manufacturing Processes, 2008. **10**(2): p. 96-104.
7. Marchelli, G., et al. *Woodn't You Know It – 3DP in wood*. 2011 05-04-2011 [cited 2014 22-10-2014]; Available from: <http://open3dp.me.washington.edu/2011/04/woodn-t-you-know-it-3dp-in-wood/>.
8. Zhao, H., et al. *Research of Wood Plastic Composites application based on Fused*



- Deposition Modeling technology*. in *Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), 2011 International Conference on*. 2011.
9. Won-Hee, L., et al. *Strength and Processing Properties using a Photopolymer Resin in a Powder-based 3DP Process*. in *SICE-ICASE, 2006. International Joint Conference*. 2006.
  10. Rahman, K.-S., et al., *Flat-pressed wood plastic composites from sawdust and recycled polyethylene terephthalate (PET): physical and mechanical properties*. SpringerPlus, 2013. **2**(1): p. 629.
  11. Wolcott, M.P. and K. Englund. *A technology review of wood-plastic composites*. in *Proceeding 33th Int. Particleboard Composites Material Symposium*. 1999.
  12. Sachs, E.M., et al., *Three-dimensional printing techniques*. 1993, Google Patents.
  13. Sachs, E.M., *Powder dispensing apparatus using vibration*. 2000, Google Patents.
  14. Bredt, J.F., S. Clark, and G. Gilchrist, *Three dimensional printing material system and method*. 2006, Google Patents.
  15. Zhu, H.H. and Y.X. Tang, *Selective laser sintering and melting processes and materials for rapid prototyping* *Advances in Laser Materials Processing Research and Applications*, 2005: p. 195-224.
  16. Allen, S.M., A.M. Lorenz, and E.M. Sachs, *Techniques for infiltration of a powder metal skeleton by a similar alloy with melting point depressed*. 2002, Google Patents.
  17. Zain, N.M., et al., *Solid Freeform Fabrication of Prototypes Using Palm Oil Fly Ash via 3D Printing*. *Journal of Applied Sciences*, 2011. **11**: p. 1648-1652.
  18. Zhang, W., *Rapid Prototyping of Ceramic, Metal Composites:(Rapid Prototyping Von Keramik-, Metall-Verbundwerkstoffen)*. 2010.
  19. Caradonna, M.A., et al., *Jetting layers of powder and the formation of fine powder beds thereby*. 2000, Google Patents.
  20. Sjöström, E., *Chapter 4 - LIGNIN*, in *Wood Chemistry (Second Edition)*, E. Sjöström, Editor. 1993, Academic Press: San Diego. p. 71-89.
  21. Jamestown Distributors. *DAP Weldwood Plastic Resin Glue*. [cited 2014 26-10-2014]; Available from: [http://www.jamestowndistributors.com/userportal/show\\_product.do?pid=2432&NEXTAG](http://www.jamestowndistributors.com/userportal/show_product.do?pid=2432&NEXTAG).
  22. Williams, C.B., *Design and Development of a Layer-based Additive Manufacturing Process for the Realization of Metal Parts of Designed Mesostructure*. 2008: Georgia Institute of Technology.
  23. Z Corporation, *MATERIAL SAFETY DATA SHEET z658*, Z. Corporation, Editor. 2005, Z Corporation.
  24. RepRap. *Powder Printer Recipes*. 2014 19-03-2014 [cited 2014 05-11-2014]; Available from: [http://reprap.org/wiki/Powder\\_Printer\\_Recipes](http://reprap.org/wiki/Powder_Printer_Recipes).
  25. Granta, *CES EduPack*. 2007, Granta Design.
  26. A&H Turf and specialties inc. *DAP® Plastic Resin Glue*. 2014 [cited 2014 03-11-2014]; Available from: [http://ahturf.com/store/index.php?route=product/product&path=26954\\_27406\\_22514&product\\_id=111833](http://ahturf.com/store/index.php?route=product/product&path=26954_27406_22514&product_id=111833).
  27. DAP, *DAP WELDWOOD Plastic Resin Glue Technical Bulletin*, DAP, Editor. 2011, DAP.
  28. Gibson, I., D.W. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. 2009: Springer.
  29. Russ, H. *About Additive Manufacturing Binder Jetting*. 2014 [cited 2014 10-11-2014]; Available from: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>.
  30. Oriakhi, C. and T.M. Lambright, *Calcium aluminate cement compositions for solid freeform fabrication*. 2007, Google Patents.
  31. Dunky, M., *Urea-formaldehyde (UF) adhesive resins for wood*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1998. **18**(2): p. 95-107.
  32. Lee, S.J.J., E. Sachs, and M. Cima, *Layer position accuracy in powder - based rapid prototyping*. *Rapid Prototyping Journal*, 1995. **1**(4): p. 24-37.
  33. Budding, A. and T.H.J. Vaneker, *New Strategies for Powder Compaction in Powder-based Rapid Prototyping Techniques*. *Procedia CIRP*, 2013. **6**: p. 527 - 532.
  34. Shanjani, Y. and E. Toyserkani, *Material spreading and compaction in powder-based solid freeform fabrication methods: Mathematical modeling*. *Proc. Solid Freeform Fabrication on Symposium*, 2008. **399**: p. 410. Budding, A., T.H.J. Vaneker, and A.J.A. Winnubst, *Open Source Powder based Rapid Prototyping Machine for Ceramics*. *Procedia CIRP*, 2013. **6**(0): p. 533-538.
  36. *Voxeljet, VX4000 The large-format 3D printing system*. 2014, Voxeljet-AG: Friedberg.

## Appendices

### Appendix A Research table on Material extrusion/FDM

	Material extrusion / FDM	Home printers	Commercial printers
Description	<p>Printing bed moves in z-axis, Nozzle moves in x-, and y-axis</p> <p>Printing nozzle prints layer by layer. Heaters to meld the plastic and hardens as it bonds to the previous layer.</p> <p><b>3 types of printers:</b> Cartesian (basic), Delta (space efficient, cheap, good finishing/better than Cartesian), Scala (2 arms with joint, cheap parts, complex software), Polar (very new, bedding rotates, extruder moves along x-axis. Smooth finishing)</p>	<p>Rectangle base structure, linear X, Y, Z axes.</p> <p>Basic software. Multiple objects after another.</p>	<p>Heated build environment. Layer by layer.</p>
Size	<p>Mostly small objects (100x100x100mm to 900x600x900mm) but large objects possible. Largest from all.</p> <p>Also houses being built with this technology</p>	<p>Small objects</p>	
Materials	<p>Mostly plastics(Thermoplastics or thermoplastic/organic-material blends)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• PLA</li> <li>• ABS</li> <li>• Acrylon/Nylon</li> </ul> <p>Often blends. Wood (max 40%), stone, metal, glass</p>	<p><b>ABS:</b> 40MPa. Temp 240-265 C. Heated bed necessary. Likely to warp</p> <p><b>Nylon:</b> 114 MPa. Temp 230-265 C.</p> <p><b>PLA:</b> 65MPa. Temp 190-230 C. Less tendency to warp. Heated bed.</p>	
Details	<p>Relatively cheap. However, commercial printers quite expensive.</p> <p>Filament \$20-45</p> <p>Series of 1 possible. No necessity to fill container to max</p>	<p>175-250. No warping. No heated bed necessary</p> <p>200x200x200mm, 1 printing nozzle, easy to switch material: € ,000</p> <p>252x199x150mm, 1 printing nozzle, easy to switch material (100µm thick): €2,200</p> <p>Filaments from €20,00 (with wood) to €40 (nylon)</p>	<p>914x610x914mm, 2 printing nozzles, high quality, heated printing environment: €400,000</p> <p>127x127x127, 1 printing nozzle, ABS printing: € , 00</p>
Problem	<p>Warping (solution by using heated bed on environment)</p> <p>Support structures necessary (dual nozzle printers can put dissolvable material in-between). Heated materials: Loss of yield strength and structure, change in appearance.</p>		
Finishing	<p>Acetone vapor. Leaves part with glossy shine</p> <p>Vibratory machines</p> <p>Electroplating (on metal) Regular (paint/sanding etc.)</p>		
Support structures	<p>Cannot print midair. Support structures necessary. Dissolvable materials can be used (if dual nozzle printer).</p> <p>Positioning important!</p>		
Quality		High	High
Resolution	Around 75µm to 300 µm		

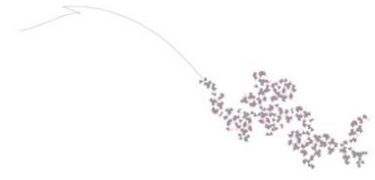
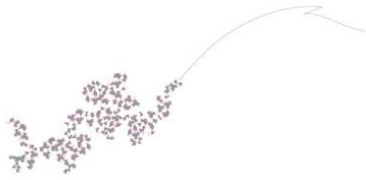
*Appendix B Research table on Binder Jetting, Sheet lamination and Material Jetting*

*Binder Jetting:* A layer of powder is created. A jetting device is used to deposit binder on a layer of powdered material. Powder that is glued will become part of the product.

*Material Jetting:* A jetting device is used to deposit build material.

*Sheet Lamination:* First a layer of solid material is deposited (plastic, metal, paper). A cutting type process is used to indicate what parts of the layer belong to the product. Excess material has to be removed by hand.

<b>Binder jetting</b>	<b>Binder jetting</b>	<b>Material jetting</b>	<b>Sheet lamination → PLT (paper lamination technology)</b>	<b>Sheet lamination → Ultrasonic lamination technology)</b>
<b>Description</b>	Spraying liquid binder onto bed of powder, solidifying it into a cross section. Full colour possible.	All of the part material (photopolymer) is dispensed from print head. Part material and binder (UV-light) applied together at the same time. Binder cures it, solidifying the part material.	Stacking and gluing layers of paper. Laser cuts the outer contours of the part. Cross hatches all sections of layer that need to be removed. Full colour possible	Use welding process to secure strips of metal together. Dissimilar metals possible. Using ultrasonic welding, solid state welding process. Next, excess material is cut away using CNC mill.
<b>Size</b>	As big as room possible	Relatively large.		
<b>Materials</b>	Different combinations for pairing powder material with binder agents. Metals (not fully dense).	Photopolymers, can be combined. Photopolymer liquids can be combined	Metals, plastics and copy paper. Paper models wood-like.	
<b>Details</b>		Multiple products possible in one run.	Inexpensive. Widely available and low cost materials involved	High value end-use components.
<b>Problem</b>	Not very strong			
<b>Finishing</b>	Remove powder. Leftover can be re-used. To strengthen object can be infused with additional material.	Remove gel-like support (dissolve in water).	Removal of excess material. Often already diced by printer to aid in removal.	
<b>Support structures</b>	Support structure rarely required (powder...)	Gel like support structure to support overhangs and complex geometries.		
<b>Quality</b>	Not very strong. Materials and lower level of adherence between layers and particulars.	Ability to look, feel and function of desired finished product.		Comparable to objects made using traditional machines.
<b>Resolution</b>		High resolution (down to 16 µm).	Slightly less accurate than SLA & SLS	Inner structures possible.



## Applying sawdust from an interior building company in additive manufacturing processes

B. Brilman<sup>a\*</sup>, K.J. Slob<sup>a</sup>, Y.A. Wesselink<sup>a</sup>

<sup>a</sup>B. Brilman, K.J. Slob, Y.A. Wesselink, University of Twente, Faculty of Engineering Technology, Department of Industrial Design Engineering

\*Corresponding author. E-mail address: b.brilman@student.utwente.nl

---

### Abstract

One of the technological developments in manufacturing that has gained a lot of attention over the past years is additive manufacturing, commonly known as 3D printing. This paper describes the possibility of applying sawdust as input material for additive manufacturing processes in a business environment. This technology opens up new possibilities for a wooden interior building company to differentiate themselves from their competitors by extending their product portfolio with freeform shaped products. By making these from their own process waste they can also be perceived as sustainable. This business environment is elaborated upon, for it sets requirements for the process. The process waste material also sets limitations for the process. It consists of fibers ranging from one millimeter up to several centimeters, and beside wood it consists of foam, metals and adhesives. Three additive manufacturing processes have been investigated from theory and with an experiment. The binder jetting process can make decent builds, but is too expensive and uncertain at this time to implement in the case company. The sheet lamination process is clearly possible, but the added value of reusing sawdust instead of using new material is questionable and a lot of man hours are required to operate the process. Material extrusion processes however are affordable and extensive documentation and community support are available. Also the looks of the product connect to the general expectation of 3D-printed products and it was possible to make a part that looked that way with the experiment that is a part of this research. This makes material extrusion the most promising direction for implementing additive manufacturing processes in a wooden interior building company.

© 2014 B. Brilman, K.J. Slob & Y.A. Wesselink

Keywords: Additive manufacturing, Wood-based Composites, Process optimization

---

### 1. Introduction

In today's increasingly global economy, differentiating from competitors becomes more and more difficult. Simultaneously, a call for more sustainable entrepreneurship challenges businesses to cut down on their energy consumption and waste production. Both are challenges faced by the woodworking industry today.

In the industry of interior design and manufacturing, the majority of the products are still produced from sheets made of wood fibers. Because manufacturing from sheet material limits form freedom, it becomes harder to differentiate when markets are growing across borders and clients have more suppliers to choose from. Simultaneously, when manufacturing from sheet material, up to 13% of the wood is turned into currently unusable sawdust [1].

One of the technological developments in manufacturing that has gained a lot of attention over the past years is that of additive manufacturing, also known as 3D printing, both for consumers and enterprises. A number of these techniques can be described to have reached a productive degree of maturity in some sectors[2].

This new technology could open up new possibilities for the woodworking industry on both aspects. Additive manufacturing offers new possibilities for manufacturing products, that could differentiate a company from its competitors. Simultaneously, waste material such as sawdust can be reused to manufacture products. This would make a company more sustainable, or at least be perceived that way.

This paper explores the possibilities for interior building companies to apply additive manufacturing techniques for making new functional objects from sawdust that is a waste product of their processes. To explore these possibilities, additive manufacturing technologies are examined with a fictitious interior building company as a case study. This paper focuses on determining how additive manufacturing technologies could be viable by using sawdust, within the context of a company. The goal of this research is to achieve the two aforementioned benefits: To differentiate themselves from their competition by extending their product portfolio and to differentiate themselves by creating a sustainable and innovative image by applying sawdust in an additive manufacturing process.

## 2. Research setup

The goal of this paper is to explore the viability of additive manufacturing of sawdust for a wooden interior building company.

First, a company will be described in a case description to give focus to the research. This business environment sets requirements such as maximum build time, costs, quality etcetera. Secondly, the process waste material of such a company is researched to determine characteristics of the resource material. Next, a variety of additive manufacturing processes are selected, which seem feasible for applying sawdust as a resource material. These processes will be investigated with a focus on the technical feasibility of applying the case company's process waste material for those additive manufacturing principles. This feasibility depends on the requirements set within the case description and the characteristics of corresponding manufacturing processes. To examine if the process waste material can be used in those additive manufacturing processes, an experiment will investigate the main constraint each process holds for transforming the material into a useful part. Finally, the most promising direction for applying additive manufacturing of sawdust in the company from the case study is selected, based on the literature study and the experiment.

## 3. Case description

The company in which additive manufacturing of sawdust is deployed sets requirements upon the operation of the process. The goals of this section is to create a set of requirements by describing the type of company and a reference product. Therefore, various characteristics and business operations of a typical wooden interior building company will be used to define these requirements.

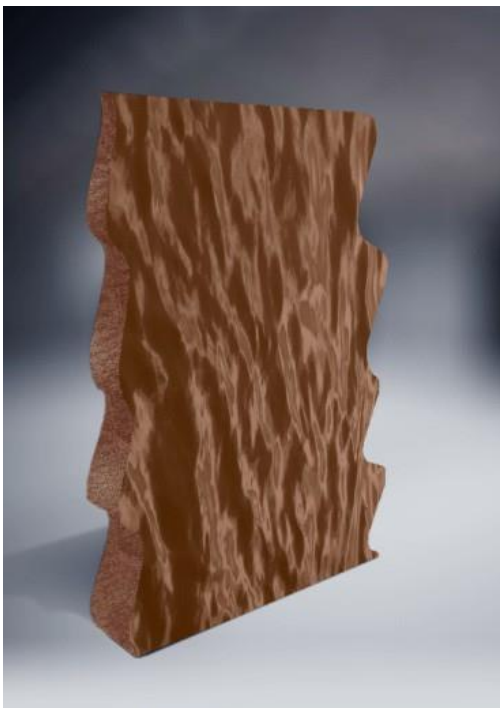


Figure 1. The reference object: A room divider

### 3.1 Case overview

To illustrate the possibilities and limitations of applying additive manufacturing of sawdust for this company, a decorative room divider will be used as a reference object. This product will address the function of separating and decorating a room. This product could be manufactured in one piece, or assembled from several objects that have been manufactured individually, and is shown in figure 1.

The interior building company and the reference object pose a number of requirements upon the additive manufacturing process in which sawdust is transformed into a room divider. This static type of product has sufficient size but is not required to withstand heavy forces associated with heavy use. Based on the framework of Du Preez, Lutters and Nieberding [3], a classification will be used considering the organisational-, project-, personnel- and product requirements. These will be listed and substantiated below;

### 3.2 The organisational requirements

First, requirements of applying additive manufacturing within a company will be described according to the characteristics of the business and their type of manufacturing processing.

Considering the business type, the company will be classified as a Small to Medium Enterprise (SME) [4], located in western Europe. The amount of personnel in this company will consist of approximately 30 people, e.g. 4 in the board, 5 in HRM, 15 in manufacturing and installation, 2 designers, 4 sales and 5 other overhead. The turnover of this company is set to approximately 2 million euro per year, with a profit of 5 percent of this turnover [5]. The company is expected to take on 30 projects per year, which take two up to three months per project. Examples of these projects are office floors, retail solutions, hotel lobbies and restaurants interiors.

The type of manufacturing processes and subsequent machines of this company can be described by pre, main and post processing machines. The main focus of the company is to process wood-based materials, however, the company also processes sheet metal, plastics, foams and fabrics. Within pre-processing, materials are mainly processed by sawing, to acquire proper dimensions for further processing. For main-processing, the company uses the machining capabilities of e.g. CNC and manual milling, drilling, sawing, grinding, turning and sanding [6]. For post-processing, finishing and assembling all parts is mostly important. For assembling wooden products cutting, gluing, sanding, screwing or stapling are the most commonly applied processes [6].

### 3.3 The project requirement

The requirements considering the company's project can be described according to the desired benefits, the investments and the risks, which should be considered for the project.

The desired benefits were expanding the product portfolio and working on their image. The freeform shaped furniture may be perceived as innovative, which contributes to the company's image. Reusing their process waste material may be perceived as sustainable, which contribute to the company's image.

The investments made on the project will be ten percent of the profit per year, taken during three years. In the same time this should be earned back, thus the budget is €30,000 in total. The running costs of the project depend mainly on material, energy and training. The last expense, training, should be relatively low, approximately 10 percent of the total investment. As mentioned before, the sawdust of the company will be used as input material for the process. Approximately 48.5 percent of the total turnover is spent on material, of which half is spent on wood-based materials [5]. This 25 percent of the turnover results into 500m<sup>3</sup> of wood-based materials, of which 10 percent, 50m<sup>3</sup>, results into sawdust per year, this is expected to be a sufficient volume to use it in additive manufacturing processes.

The main risk of this project is to lose the investment, e.g. in case of the additive processes not able to produce products of sufficient quality. To increase the chance of success, it is preferred to use an established processes because this will have better training programs and more extensive documentation.

### 3.4 The requirements on personnel

The requirements considering the company's personnel consider the specialization of the personnel. The knowledge, acquired by training and documentation, might be needed to operate the additive manufacturing process. Therefore a well documented process, which reduces training hours, is preferred. As the process should run as continuous as possible, the input of personnel is required to be as low an amount of hours per product as possible. If the amount of hours per product goes up and the selling price should be kept the same, the other costs for making the product should go down to keep the right profit margin.

### 3.5 The requirements on the product

The product, the reference object, has requirements considering the function, appearance and production of the product.

Considering the main function of the product, the room divider should be able to be placed individually, separating an interior space. This product should be able to connect to other room dividers of a similar type. The dimensions of the product should not exceed 500 x 1000 x 2000 mm. A representation of the product can be seen in figure 1.

The appearance of the product is important, as the product will be used as a showcase for the company, displaying the company's ability of 3D-printing to reach the two benefits mentioned. Therefore, the product should have a freeform shaped appearance, e.g. using organic shapes or overhang. The process by which the product is made should be visible in the exterior of the product. For example visible layers, up to a maximum thickness of 20 mm is preferred.

The investment for implementing additive manufacturing should be earned back through selling products made with it. The price of those products should be as such, that this is possible. A rough estimation of €100 per product to repay the investment would then lead to approximately 100 products per year, taking into account some downtime (maintenance, days off for the personnel).

## 4. Sawdust material

Reusing the waste material from the case company's processes is the main goal of applying sawdust in additive manufacturing. Therefore, the characteristics of this material should be examined, to identify possibilities and challenges for applying this material in an additive manufacturing process. First, the process waste material from the case company will be investigated from theory. Secondly, a sawdust sample of such a company will be examined to validate findings from theory.

### 4.1 Process waste material

The process waste material of the case company is what remains after the materials the company uses for their products have been processed with machines such as described in paragraph 3.2. The characteristics of this process waste material are assumed to be the same chemical and physical properties as the source material, except for particle size. In most cases, this will be wood-based composites such as particle board, medium density board and plywood [7].

According to Stark, conventional wood-based composites consist primarily of wood with only a few percent of resin and other types of additives [7]. Figure 2 provides an overview of possible wood-based composites. An example of a wood-based composite is plywood. This is manufactured from sheets of cross-laminated veneer and laminated under heat and pressure with moisture-resistant adhesives [8]. The properties of these panels depend on the quality of the veneer, the sequence of layers, the adhesives and the level of control over bonding conditions [7]. A classification of wood composite panels by particle size, density and process can be found in figure 3.

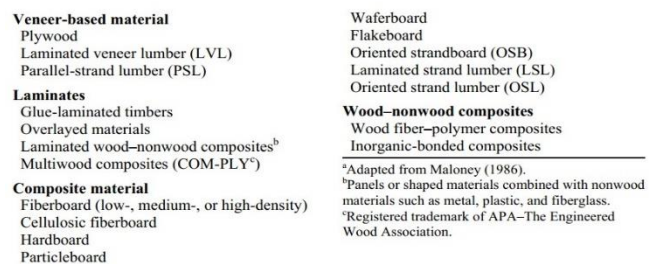


Figure 2. Overview of wood-based composites

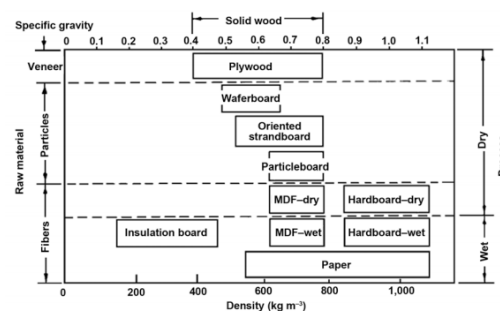


Figure 3. Classification of wood-based composite panels by particle size, density and process

Although wood-based composites are expected to be the primary construction material, other materials could be processed and could thus be present in the process waste material. These could be pieces of foam board for example. Additionally, the tools the company uses will wear and thus pieces of tooling may appear in the process waste as well. It is thus expected that the process waste material of the case company will primarily contain sawdust originating from wood-based composites. Other materials such as foam board or pieces of tooling might be present as well.

#### 4.2 Company's material

To validate these findings, a sample of process waste material from an interior-building company has been examined in two steps. First, an overview of the material types present in the process waste material was made, which can be found in figure 4. The materials are sorted by size and material type. Remarkably, the sample contained material up to several centimeters as can be seen from the overview. If the additive manufacturing process requires small particles only, filtering or grinding the material has to be considered.

Secondly, a portion of 50 grams from the sample was sifted to roughly determine the percentages of the different particle sizes. This was done using very basic sieves in three steps, of which the results can be seen in figure 5. The first step was done using a very course sieve and approximately 40 percent (19 grams) of very rough chunks was sifted out, shown as residue S1 in figure 5. The second step was done using a finer kitchen sieve and approximately 20 percent (11 grams) of the original 50 grams was sifted out, which contained chunks up to several millimeters in size, shown as residue S2 in figure 5. The third and final step was done using a very fine sieve and approximately 10 percent (5 grams) of small fibers was sifted out, shown as residue S3 in figure 5. The remaining 30 percent (15 grams) consisted of particles of about 1 mm in size, shown as filtrate F3 in figure 5.

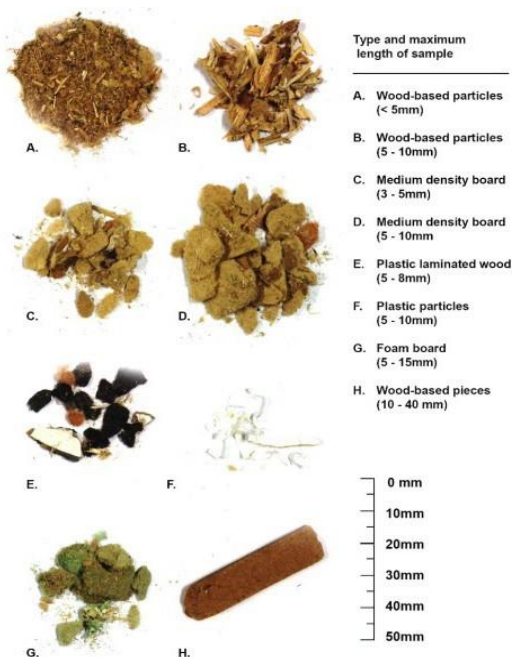


Figure 4. Overview of content of sawdust sample

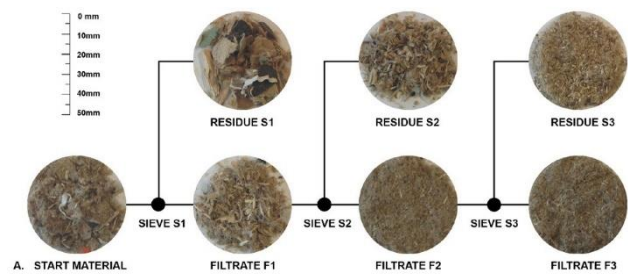


Figure 5. Sieving results of sawdust sample

This modest sorting and sifting experiment affirmed the findings from theory. The majority of the material originates from wood-based composites and also pieces of veneer have been found. Additionally, some foam and plastic material was found in the process waste. The sample contained a lot of course chunks and only one third was of smaller particle size, but even that was still over 1mm in size. The next section explores if these can be used in additive manufacturing process and if pre-processing of the process waste material is required.

#### 5. Additive manufacturing processes

With the properties of the case company's sawdust known, it is time to turn to the additive manufacturing processes that could turn this process waste material into a product. The goal of this section is to investigate benefits, limitations and challenges for creating the product with various additive manufacturing processes, considering the case company's sawdust is used as input material.

Additive manufacturing is a broad term, covering a variety of processes. For time considerations, only the three most promising processes for applying sawdust in additive manufacturing will be investigated. Therefore, from the seven main process groups four cannot be investigated further. Which four, will be substantiated below.

Both powder bed fusion processes and directed energy deposition processes use a laser or another energy source to melt powder material to build the parts. Amorphous and crystalline materials such as polymers and metals can withstand the heat. However, wood fibres cannot melt and will most likely burn away. It is thus not very likely that without substantial changes to the process sawdust can be used in these process categories. Therefore, this direction is not part of this study.

Both material jetting and VAT polymerization use a photo polymerisation process to solidify a liquid, hereby forming a part. Sawdust could be dissolved into this polymer liquid and applications of dissolved materials are known. However, it is expected that high concentrations of sawdust will hinder the process, for light beams might be blocked or deflected, disrupting the process. It is thus not very likely that sawdust can be used in these process categories. Therefore, this direction is not part of this study as well.

The remaining three process groups, material extrusion, sheet lamination and binder jetting, do seem viable. Examples are known of extrusion filaments that contain wood fibre. Sheet lamination is already using a material that is based on wood originally: paper. Binder jetting is based on processing a powder with a binder and sawdust is

already a powder material. These three process groups will be investigated hereafter, giving a short introduction of all three and from there on moving towards the application of the case company's sawdust in these processes.

### 5.1 Process 1 - Material extrusion

The general public most commonly associates the term 3D printing with the automated extrusion printing process. Material extrusion uses the melting characteristics of a material to extrude the material out of a print head to build 3D parts.

#### 5.1.1 Process description

A material extrusion printer has print heads not unlike an ordinary inkjet printer. The print head consists of a nozzle (FDM tip in figure 6), a heating element (liquifier in figure 6) and possibly an extruder. This can be placed elsewhere in the printer as well. The print head moves on an axis driven by a motor above a (heated) build platform [9]. The material extrusion process starts by feeding a thread of material called a filament or a raw material through the heater or extruder (hot end), liquefying the material within the filament or raw material. Due to the pressure exerted by the extruder the material is extruded through the nozzle. The extrusion nozzle plots a predefined path and thus a geometry, as can be seen in figure 6 [10]. The heating element keeps the materials just above its melting point so it flows easily through the nozzle. After deposition the material hardens directly bonding it onto the previous layer. Support material can be added using a second nozzle to enable the creation of complex geometrical features [11]. Most commonly used in for example the material extrusion process fused deposition modeling are amorphous polymers such as ABS for an optimal result [9]. However, all materials that solidify quickly from a liquid state can be used, making material extrusion a versatile additive manufacturing processes.

#### 5.1.2 Process variants

When comparing current material extrusion processes to the first versions of the processes, little difference can be discovered in its operating principle [12]. The material extrusion process did not undergo large changes although some alterations were made to optimize the process and create more possible applications. Relevant changes in the process are described below, which include extrusion methods, printing head movement and support materials

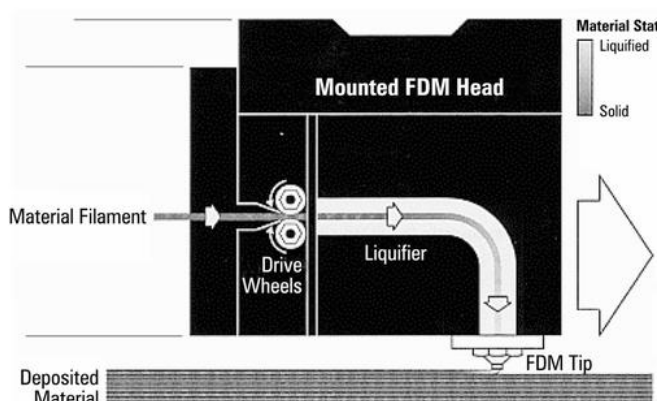


Figure 6. Schematic overview of material extrusion process

#### - Extrusion methods

In order to deposit the material on the build platform, a material extrusion printer uses an extruder. Two variants are relevant for this research in this paper, being hot-melt or cold extrusion and direct extrusion.

A commonly used commercialized process used for extrusion is hot-melt or cold extrusion [16]. This process is continuous and consists of two distinct parts. First the conveying system mixes materials and transports it to the nozzle. The nozzle forms the material in the required shape after which it can be deposited [13]. An example of the implementation of the cold extrusion process can be found in the concrete printing. Herein, the concrete is pumped by the conveying system and is deposited through a computer-controlled nozzle which follows a predefined path [14].

A more commonly used extrusion method for additive manufacturing is direct extrusion. In this case the extruder consists of two rollers exerting pressure on the material, pushing it outwards. There are two variants of this extruder, direct extrusion and Bowden direct extrusion [15]. The inner workings of the systems are the same. The difference can be found in the placement of the extruder. In the case of direct extrusion it is placed directly beside the heater [17]. The extruder pulls the filament through the rollers and pushes it afterward through the heater and nozzle, as can be seen in figure 7. In case of the Bowden extruder the extruder is placed away from the heater at the cold end of the process. A Bowden extruder pushes the filament through a tube into the heater and nozzle as can be seen in figure 8 [15].

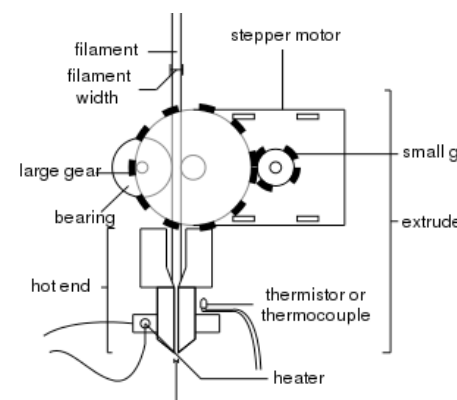


Figure 7. Schematic overview of direct extrusion

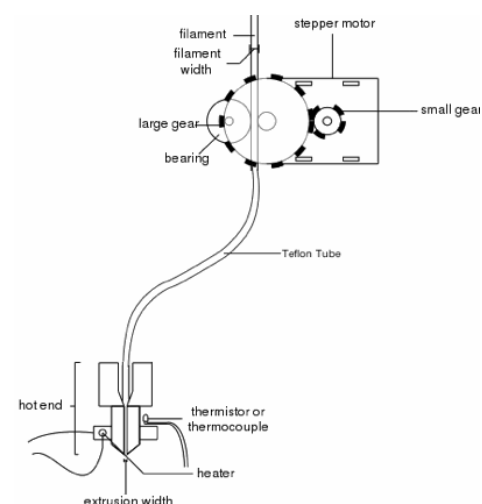


Figure 8. Schematic overview of Bowden extrusion



### - Printing head movement

Another variable in the fused deposition modeling process is the way the print head moves relative to the build platform. Several options are possible. Most common is the Cartesian process, in which the print head moves over the x and y axis and the platform moves over the z axis [18]. The Cartesian process has the benefit of simple controlling software making operating easier. The other processes are polar and delta based processes. Polar based processes make use of a printing-bed moving over all axis and the delta processes use three moving arms to position the printing nozzle. Both result in a smoother finish of the printed product, however, these are harder to control [19, 20].

### - Support Material

In order to create a complex structure a support material can be used to support overhanging structures [21]. The support material is removed after printing the object. For a material extrusion process to make use of support material a second nozzle is often required [9]. When using a hot melt or cold extrusion process, switching between building material and support material is not possible as the process cannot be stopped while printing to switch to a new material [13].

#### 5.1.3 Material extrusion and sawdust

To use sawdust in the material extrusion process the above-mentioned variants can be indicators of its feasibility. Most important for the use of input material for the material extrusion process is dependent upon the variant of extrusion that is chosen. When direct extrusion is chosen a filament is needed which means sawdust has to be pre-processed [15]. This is not ideal, so a less demanding process such as hot melt or cold extrusion would be preferable. With such a process the input materials does not have to be a filament and can be in the form of pellets, dust or even liquid [15]. Therefore, it would be interesting to see if the sawdust originating from the case company can be used without preprocessing using a hot melt or cold extrusion system. The method is proven to work using concrete slurry for similar applications as the applications for the case company, such as street furniture and functional walls [14]. While the method seems possible, the possible ratio of binder to sawdust is unknown for this process.

#### 5.1.4 Benefits and drawbacks of material extrusion in the company

One of the most apparent benefits of material extrusion compared to other additive manufacturing processes is the availability and low cost of entry-level machines [22]. Most entry level machines on the consumer market start from € 2000,-, excluding value added tax [23]. In extent, the process is very adaptable. All materials which can quickly solidify from a liquid state are suitable for material extrusion [11]. Both advantages mean the case company has low investment costs since the technique is easily available and adaptable. A limitation for a material extrusion process is the need for support structure [11]. The support structure implies extra material processing is needed to create a final product, increasing running costs and turnaround time.

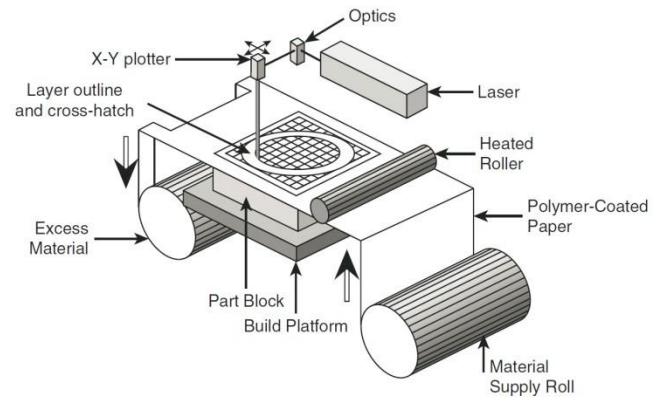


Figure 9. Schematic overview of LOM process

### 5.2 Process 2 - Sheet lamination

Laminated Object Manufacturing (LOM) is according to Gibson et. al. one of the first commercialized additive manufacturing techniques and involves layer-by-layer laminations of paper material sheets [11]. In most processes, layers of laminated adhesive coated materials are attached together and cut to a shape with a laser cutter or knife.

#### 5.2.1 Process description

Laminated object manufacturing is according to Park et. al. a technique in which a 3D part is sequentially built layer by layer from a roll of supply material [24]. A schematic overview of the process can be found in figure 9. When paper is used as supply material, a polymer coating is applied and lamination is performed by a heated stainless-steel roller, providing pressure to bring layers in contact with each other. Subsequently, a laser cuts each sheet, which represents a layer of the CAD-model of the part. The platform moves down in z-direction, the roll moves down and excess material is caught onto the excess material roll and the supply material simultaneously advances. Chua mentions the sections outside the layer outline, which should not remain in the product, are crossed-hatched by the laser into objects called tiles [25]. According to Ahn, Kweon and Choi, the build platform then rises slightly and the heater roller applies pressure to bond the new layer [26]. During the post-processing all layers are completed and these tiles are removed.

#### 5.2.2 Process variants

Based on sheet lamination a number of other processes distinguished by Gibson et. al. has been developed involving other build materials and cutting strategies [11]. Due to the construction principle of sheet lamination, only the outer contours of the parts are cut and the processes can consist of first cutting and then stacking the sheets or in opposite sequence. The following distinguished processes are set into categories based on the mechanism used to achieve bonding between the layers: (I) gluing or adhesive bonding,

(II) thermal bonding, (III) clamping, and (IV) ultrasonic welding. Gluing or adhesive bonding will be discussed due to the possible relevance of applying sawdust in the process. The other processes are mainly focused on applying metal materials, which for instance use welding principles. These are not applicable for wood-based composites and will therefore be left out of consideration.

### - Gluing or adhesive bonding

The application of paper with a thermoplastic coating on one side has been the most popular build material for sheet lamination [11]. Within the category of gluing or adhesive bonding two processes can be classified. The first category (bond-then-form) is mentioned to first bond the laminate to the substrate and then form it into the cross-sectional shapes. The second (form-then-bond) describes processes in which the laminate is formed first and then bonded to the substrate.

### - Bond then form processes

The most characteristic steps of bond-then-form processes are placing the laminate, bonding it to the substrate and cutting the outer contours of the model, similar to the process description mentioned earlier. This process has next to paper been applied to form metal, ceramic and composite parts [11].

The main benefit for bond-then form-processes is the resulting material, when using paper as input, is similar to plywood. This material has little shrinkage, residual stresses, and distortion problems. Also large parts can be fabricated rapidly and the process can use paper-based material. The feed-stock of the process is easy to handle and there are relatively low costs on the material, machinery and process. However, the use of the paper-based materials asks for a coating to prevent too much absorption of the bonding material.

### - Form then bond processes

In contrast to the previously described process, sheet materials are first cut to shape and then bonded to the substrate using form-then-bond processes [11]. A schematic overview of a form then bond system can be seen in figure 10. For ceramics, the bonding is performed by using a warm isostatic press [27]. In the case of creating a wood-based composite, this bonding may be performed by placing an adhesive between the layers of the product. The applied material needs an adhesive coating and is placed on a carrier after being cut. The laminate form is then placed on top of the previously placed layers and bonded. This process is repeated until the part is finished.

With this form-then-bond process parts with internal features or supporting channels can be created. Subsequently, there is no danger of cutting into previous layers in contrast to bond-then-form. However, the parts do need support material for overhanging features. This process is still researched, but some examples of wood and foam materials are already known as can be seen in figure 11.

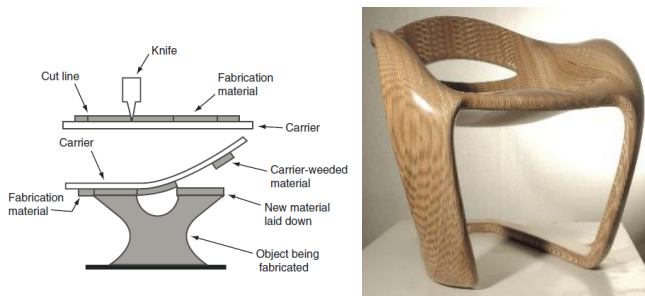


Figure 10. (left) Form then bond

Figure 11. (right) Example of form-then-bond process with use of wood

### 5.2.3 Sheet lamination and sawdust

To apply sheet lamination in the company, the input material creates a challenge. For current commercial sheet lamination machines, the input material is of homogenous quality. The main challenge for the application of sheet lamination in the company is to create an input material. The sheet lamination machine should cut and laminate this material. This input has to be created using the sawdust, as described in paragraph 4.2. Therefore, the company should press wood-based composites using this sawdust in combination with an adhesive, of which the amount should be as low as possible to reduce costs. For creating the sheet material, the company should aim at creating a plate of a maximum of 20 mm thickness, as allowed by the requirements set in paragraph 3. Then, the amount of process steps can be minimized.

Creating the input material puts an emphasis on the pre-processing phase of the process. The quality of this material will influence the resulting product. After creating the sheet or plate, this material has to be formed into the right shape. Regarding the process tools available in the company, this can either be executed by a CNC router or by a laser cutter. Although high speeds of CNC router and laser cutting can be obtained, the speed of the process in this case will be depending on moving the sheets and the lamination speed. The sheet should be inserted into the CNC router or laser cutter manually. Subsequently, the layers are bonded. In this case, using warm isostatic bonding may not be applicable for wood-based composites. One might use a layer of adhesive to bond the layers of the part. Moreover, in case of using a laser cutter, the binder used in the wood composite, consisting of the sawdust and the binder, should cope with the high temperature of the laser.

### 5.2.4 Benefits, drawbacks and limitations of sheet lamination in the company

When making a comparison between sheet lamination processes and other additive manufacturing processes, several benefits can be distinguished. Since the result of bond-then-form process is comparable to plywood, it has good material properties. In addition, the company already has expertise on processing wood-based composites such as plywood. With this process rapid manufacturing can be executed and handling is easy. When using form-then bond process, also inner features and channels can be manufactured and even examples of application with wood are available on the market.

The process of sheet lamination can be promising for applications with wood-based materials and this is still being researched, as the current application with paper still needs coating to prevent too much absorption of the adhesive coating. Subsequently, the accuracy in Z-direction is weaker compared to other additive manufacturing techniques. Next to this, the processing step of sheet lamination takes up time, one of the main reasons the process gained less traction commercially [11].

Given this situation, a main challenge for the company is to create the input material for this process. The plates should be pressed using sawdust, which might not be of uniform quality. This might affect the properties of the output product, which then might differ from the properties of plywood as mentioned earlier.

Subsequently, the adhesive coating used for creating the input material, should cope with the heat of a laser cutter, if applied. Using a CNC router offers a solution to this constraint, as the sheet material will become less hot.

Although it seems beneficial for the case company to apply the form then bond principle of sheet lamination by using existing tools, the company should regard that this process is not fully automated using the self-processed sheets. Moreover, it still requires a carrier or personnel for moving the plates (as seen in figure 10) aside from the existing tools.

### 5.3 Process 3 - Binder jetting

The third additive manufacturing process to be discussed is binder jetting. In the binder jetting process a jetting device prints a binder onto a powder bed to fabricate a part [11]. Therefore, only a small portion of the part material is delivered through the print-head and the majority of the part consists of the powder from the powder bed.

#### 5.3.1 Process description

The binder jetting process is made up by a print bed, a powder feed supply, a leveling roller, an inkjet printhead and binder feeders [28]. The process setup is illustrated in figure 12. The machine prints binder droplets, approximately 80  $\mu\text{m}$  in diameter, that form spherical agglomerates of binder liquid and powder particles on one layer that binds the powder together to form a layer as well as provides bonding to the previously printed layer [11]. The printing of binder can either be done through continuous-jet or drop-on-demand technology [29]. When the jetting head is done printing a layer, the powder bed is lowered and a new layer of powder is spread onto it [30]. That way, a part emerges from the powder layer by layer. When the product is finished, post-processing is needed to remove surplus powder.

#### 5.3.2 Process variants

Binder jetting was originally invented at MIT in the early 1990's but has later been licensed to industry and has been commercialized starting around 2010 [28]. From thereon, process variants have emerged that generally involve two variables: variation of the binder or variation of the powder.

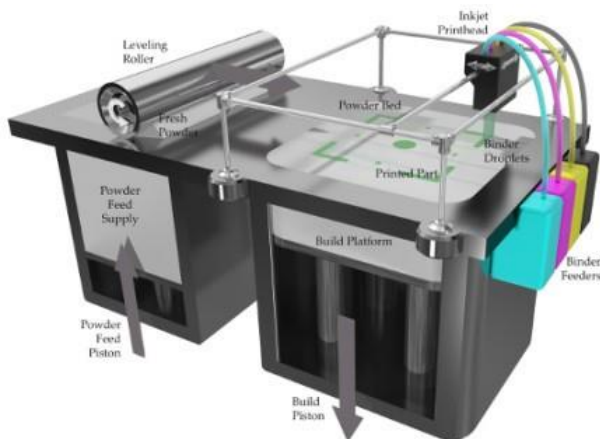


Figure 12. Binder jetting process

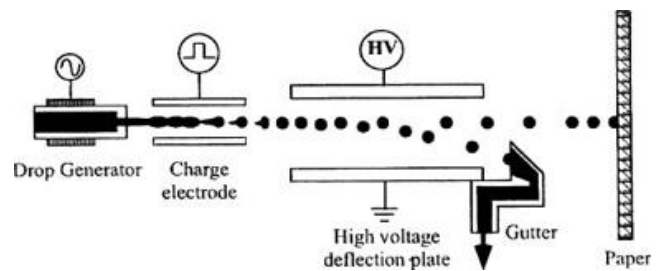


Figure 13. Continuous jetting process

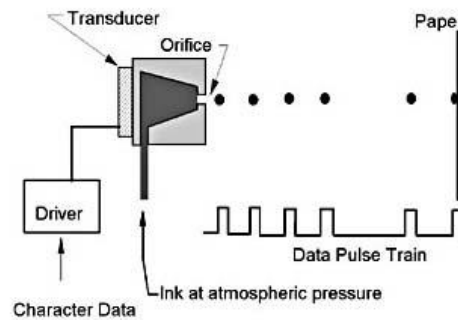


Figure 14. Drop-on-demand process

#### - Binder variation

When varying the binder, this can be because a different binder is required to manufacture parts from different powders. However, examples of companies that use multiple binders to color the material during manufacturing are also known. Simultaneously, using multiple binder heads has been observed to decrease build time [11]. In distributing the binder onto the powder bed, two main categories of processes are known: continuous jetting processes and drop-on-demand processes. In continuous jetting processes, the binder is pressurized from a reservoir through narrow orifices to form columns of liquid jets [31]. By means of electromechanical stimulation, droplets of uniform size are formed that have a specified phase and frequency. These are then selectively charged and deflected by applying electrical potential to control their trajectories [29]. When no drop is demanded during printing, the droplets are collected and reused again. This is illustrated in figure 13.

The other possibility is a drop-on-demand process. In this process, droplets are created by applying electrical impulses only when required for printing [32]. The binder droplets are then ejected when either a piezoelectric transducer or heater generates pressure waves on the reservoir [29]. This is illustrated in figure 14.

The continuous jetting process offers advantages when high build speeds are required. The drop-on-demand process is advantageous for smaller, more accurate builds.

#### - Powder variation

When varying the powder, parts with very different material properties can be produced. Metals, ceramics and polymers have all been build from powder to part successfully. These do however sometimes require extra steps such as post-build sintering. For more advanced materials such as ceramics, a variant to the basic dry powder bed has been developed that involves a slurry-like material to fill the powder bed [32]. This slurry is comprised of very fine particles and a solvent.

When the slurry is added to the powder bed that is the build chamber, it is first dried. The binder is then printed onto the powder bed to define the component's shape. When the build is ready, the hardened slurry that is not part of the build will be washed away using water. In this process, it is very important that the binder does not dissolve in water, but does penetrate through a very dense material [29].

The dry powder process is less precise, but also less demanding. If this variant for printing ceramics shows anything, it is that binder jetting is a versatile process in which the binder should be adjusted to the material that one wants to bind with it.

### 5.3.3 Binder jetting and sawdust

To apply binder jetting in the company, the starting material poses a big challenge. As could be seen from figure 5 and was noted in paragraph 4.2, only a small part of the waste material of the company's processes is of smaller particle size. However, these particles are still up to 1mm in size and are far from perfectly round. Current commercial binder jetting machines operate with layers of between 0,09mm and 0,2mm in thickness, with powders specially prepared for this application [11]. Powder that forms the basis of slurries are even smaller, around 0,5-1 $\mu$ m [32]. With the sawdust material from the company being so crude, spreading it to form a uniform layer is expected to be a mayor challenge. This implies that either the material needs thorough pre-processing, or the process needs to be updated to accommodate cruder powders. This will also influence the required binder material, since the required surface tension and viscosity of the binder will be different [29].

### 5.3.4 Benefits, drawbacks and challenges of binder jetting in the company

When comparing binder jetting to other additive manufacturing processes to apply in the company from the case, binder jetting has several benefits but also some major challenges.

A benefit of binder jetting over other processes is that the parts are self-supporting [11]. So in post-processing no support material needs to be removed, only blowing off remaining powder is required. This is most likely also done for other manufacturing processes within the case company and is thus easily embedded in current practices. The case product, a room divider, is often a slim, tall product. In one build chamber, parts for multiple room dividers could be manufactured at once since binder jetting allows for simultaneous creation of multiple parts in one build.

A big challenge for implementing binder jetting is the investments required. Machine prices vary between €19,000 and €1,200,000 [11]. This difference is mainly caused by build chamber size, build speed and accuracy. The cheaper machines have build chambers of 200x250x200mm, the expensive machines have build chambers measuring up to 1500x750x700mm. Taking into account the limited budget of the case company, it remains questionable if it is even possible to acquire such a machine.

Related to this is the problem of build speed. The cheaper printers, between approximately €20,000 and €50,000, manufacture 2-4 layers of 0.09-0.2mm per minute [11].

These printers are thus able to manufacture a maximum of 40,000mm<sup>3</sup> per minute, considering a build chamber of 200x250mm<sup>2</sup> (0.2\*4\*200\*250), at best. With a room divider being 500x1000x2000mm at most, this would take up to 17.5 half days to manufacture. The expensive machines manufacture 20mm in height per hour [11]. These printers are thus able to manufacture a maximum of 22,500,000 mm<sup>3</sup> per hour, considering a build chamber of 1500x750mm<sup>2</sup> (20\*1500\*750), at best. To build a room divider at its largest possible volume would take these machines up to 44.5 hours. Although room dividers will most likely not take up the entire volume of those outer dimensions making the calculations above a worst-case scenario, it is clear that only the very expensive printers could reach the required maximum build time of three days.

But before these become relevant, the challenge of applying the case company's material in binder jetting processes is a challenge yet to overcome. As described in the previous section, sawdust is very crude and the question remains if this can be processed successfully. If this is at all possible, preprocessing is required to obtain a more or less uniform powder material. This will most likely require sifting or grinding machinery, that would heighten the investment. However, an advantage of the crude material is that if a part is manufactured from it successfully, it will be visible that this was done using an unconventional process, thus contributing to the company's innovative image. If building using this material is at all possible will be investigated hereafter, after which price and build speed could be reconsidered set against other possible processes.

## 6. Experiment

### 6.1 Introduction

In this study, the experiments were performed to re- evaluate the main constraints that are found in the theoretical research on the aforementioned additive manufacturing processes in combination with sawdust. Therefore, three sets of experiments were performed using the sawdust sample of a company similar to the case company. The experiment was conducted at room temperature and all experiments were executed with a binder based on a polyvinyl acetate dispersion, having a density of 1.09 g/cm<sup>3</sup>. This binder is often applied in the woodworking industry for interior purposes [33]. All experiments used the most accurately filtered version of sawdust, filtrate F3 in figure 5.

#### 6.1.1 Experiment A: Material extrusion

For material extrusion in the context of the case study, the main constraint is to harden the extruded material immediately after leaving the nozzle. The first step examined this constraint, by extruding a mix of sawdust and binder material through a nozzle to investigate its hardening behaviour. This experiment was conducted in two steps.

The first step examined the most appropriate nozzle size for this sawdust material. To do so, a mix of an equal concentration of sawdust and adhesive was created, which was poured into an injector of 10 ml. Subsequently, lines were drawn up to 100mm. This process was repeated with

a nozzle size of 2.5mm, 5mm and 7.5mm. These lines were examined for their hardening and appearance, right after they were created.

The second step examined the possibility to build parts by extruding a mixture of sawdust and binder through a nozzle. To do so, various concentrations of sawdust and adhesive were created, which were poured into an injector of 10ml. The concentrations were a 2:1 volumetric rate of sawdust over binder, a 1:1 volumetric rate of sawdust over binder and a 3:4 volumetric rate of sawdust over binder. Subsequently, three lines were extruded next to each other and three were then extruded on top of that, whilst not breaking off the material flow. These layers were 50mm long. The result were then examined similar to the first step.

### 6.1.2 Experiment B: Sheet lamination

For sheet lamination in the context of the case study, the main constraint is creating the sheet material as input for the additive manufacturing process. The second experiment examined this constraint, by pressing a mix of sawdust and binder to form a material sheet and investigating its properties. This experiment was conducted in two steps.

The first step examined the ability of sawdust to be pressed into a sheet material using a binder. To do so, various concentration rates of sawdust and adhesive were created. These were then put into a tube with an inner cross section of 32 mm. A press of 1 kg, fitting into this tube, then pressed the mix for three minutes. Within this step, the aim was minimizing the amount of binder for creating a sheet using the sawdust sample. The volumetric rate of sawdust over binder for the four samples was 6:1 sawdust over binder, 3:1 sawdust over binder, 2:1 sawdust over binder and 3:2 sawdust over binder. When the three minutes were up, the press was removed and the samples were examined for their hardening behaviour.

The second step examines the strength of the samples made in the first step. To do so, the samples were dropped from a height of 1m onto a vinyl surface floor. Observations were made about what resulted from the samples.

### 6.1.3 Experiment C: Binder jetting

For binder jetting in the context of the case study, the main constraint is the difficulty of bonding between the droplets of binder and the sawdust powder layer. The third experiment examined this constraint, by dropping droplets of binder of various viscosity of binder over water from varying heights onto a powder bed.

The viscosity of the binder was influenced by adding 0 percent, 25 percent, 50 percent and 75 percent water. The dropping height of the droplets of binder was both 300mm and 10mm for each concentration. The droplets were poured with a 16 gauge needle (inner diameter of 1,19mm) to make small drops [34]. The powder bed was made up of sawdust and was several millimetres thick.

Each dropping experiment consisted of two steps. First, a row of droplets was dropped from 300mm to the surface of sawdust. The droplets were examined for their shape and bonding with the sawdust layer. Secondly, a row of droplets was dropped from 10mm to the surface and examined in the same manner.

## 6.2 Course of the experiment

This section described the course of the experiment, mentioning peculiarities when present.

### 6.2.1 Experiment A: Material extrusion

To test the possibility to extrude a mixture of sawdust and binder, a first step examined the result of various nozzle sizes by extruding a line with a 2,5mm, 5mm and 7,5mm nozzle. The 2,5mm nozzle made it hard to extrude a straight line, because the material curled up under the pressure as a result of the small nozzle size. The 7,5mm nozzle easily extruded material, but due to the large nozzle size the outside of the extruded material was already bursting because the mixture was not compressed enough by the nozzle. The 5mm nozzle produced a consistent straight line and therefore this nozzle size was used in the next step.

With the appropriate nozzle size known, the main experiment was conducted in which the percentage of binder was varied. The build with a 2:1 volumetric rate of sawdust over binder was hard to extrude and layers did not bind very well. They lay on top of each other, not adhering to each other and therefore not creating one part. The build with a 1:1 volumetric rate of sawdust over binder was very well extrudable and the layers adhered to each other to create a part. The build with a 3:4 volumetric rate of sawdust over binder was too viscous and the build started to sag immediately.

### 6.2.2 Experiment B: Sheet lamination

To test the possibility of creating sheet material as input for an additive manufacturing process, four cones of 20mm in height were made. The build with a 6:1 volumetric rate of sawdust over binder looked bound together well initially, but started showing cracks quickly when it started drying. The build with a 3:1 volumetric rate of sawdust over binder also bound together well when leaving the tube and dried up to a solid piece. In the build with a 2:1 volumetric rate of sawdust over binder, when pressed in the tube, some binder seeped from underneath the edge of the tube. It then became a solid piece, that was however still elastic when pressed. In the build with a 3:2 volumetric rate of sawdust over binder, when pressed in the tube, quite a lot of binder seeped from under the edge of the tube. When the tube was lifted, the build stuck to the tube. It never became a fully solid piece, and remained fictile.

When the parts were tested for strength by dropping them from 1m height onto a vinyl surface floor, the build with a 6:1 volumetric rate of sawdust over binder fell apart into chunks and a lot of powder material. The other builds remained intact. However, the builds with the highest percentage of binder both rebounded. The build with the highest percentage of binder, with a 3:2 volumetric rate of sawdust over binder, also deformed after it hit the floor.



Figure 15. Droplets of binder on a sawdust powder bed

### 6.2.3 Experiment C: Binder jetting

To test the possibility of bonding between droplets of binder and the surface of sawdust, a small needle dropped binder of varying viscosity from varying heights onto a powder bed of sawdust. The binder consisting of 100 percent binder formed droplets laying on top of the powder bed, as can be seen in figure 15, both when dropped from 300mm and 10mm. Some fibers did stick to the surface of the droplets, but the droplets remained intact. The binder consisting of 75 percent binder and 25 percent water remained intact, forming droplets from both heights, but more sawdust stuck to the surface of the droplet. The binder consisting of 50 percent binder and 50 percent water, when dropped from 300mm, did flow into the powder bed. But when dropped from 10mm, binder formed droplets again stuck on top of the powder bed. The binder consisting of 25 percent binder and 75 percent water did flow into the powder bed when dropped from 300mm, but similar to all other concentrations remained present as intact droplets when dropped from 10mm.

### 6.3 Results of the experiment

After the experiments, the builds got one day to really harden out. This was done to prevent any influences of the drying time of the binder used to influence the findings. The findings of investigating the results will be described below.

#### 6.3.1 Experiment A: Material extrusion

The material extrusion experiment showed that it is possible to extrude a mixture of sawdust and binder. However, this experiment was conducted with binder based on glue for wood, that hardens when it comes into contact with air. The builds that resulted from the experiment are depicted in figure 16. After a day, the builds containing more binder (builds B and C in figure 16) have sagged, although clear lines are still visible in build B from figure 16 that contains a 1:1 volumetric rate of sawdust over binder. Also, when thicker builds with a high binder percentage were cut open after a day, the inside was still not hardened yet.

Follow up research should thus focus on other binders that operate on other principles to harden after leaving the nozzle, such as hardening by temperature or hardening by UV light. The possibility of building a part with sawdust in a material extrusion process, has however been proven.

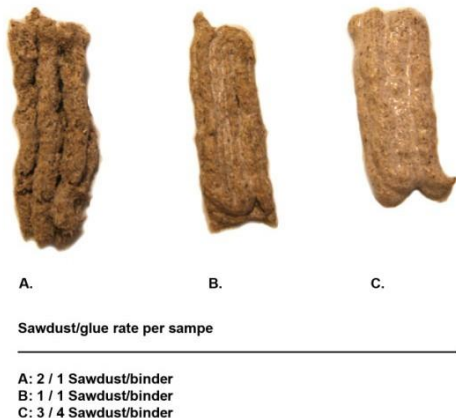


Figure 16. Results of material extrusion experiment

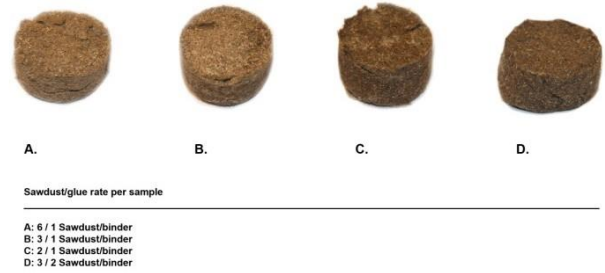


Figure 17. Results of sheet lamination experiment

#### 6.3.2 Experiment B: Sheet lamination

The sheet lamination experiment shows it is possible to create a sheet material as input for a sheet lamination process using sawdust and binder. After some drying time, the build that contained the highest percentage of sawdust, a 6:1 volumetric rate of sawdust over binder and seen as build A in figure 17, was not fully intact. It showed tears and pulverized a little under a fingers touch. The builds that contained the highest percentage of binder, build C and D in figure 17, were on the other hand still elastic. The build with a 3:1 volumetric rate of sawdust over binder was the only build resembling traditional wood-based composite materials.

Follow up research should focus on the question whether this material can be cut with a laser or sawed into shape, or if it cannot withstand the heat or forces. That the input material can be made is shown in this experiment. If it can be processed to build a part, is another question.

#### 6.3.3 Experiment C: Binder jetting

The binder jetting experiment was the most inconclusive of the three experiments. Although no building of parts was observed during the build, after a day of drying some droplets had soaked into the sawdust. The binder containing 50 percent of water dropped from 300mm height, shown as build E in figure 18, even showed a piece of sawdust bound together and by this being the closest to a successful build.

A remarkable observation was that all builds made with a certain percentage of water and dropped from 10mm, shown as builds D, F and H in figure 18, collapsed and formed a donut-like shape of sawdust fibers. Although these never stuck together to form an object, they did contain sawdust within them.

The question thus remains if, with another binder material and with the right dropping height and droplet size and an evenly spread powder bed, it is possible to build shapes using a binder jetting process. The experiment showed signs that hint at this possibility, but do not provide a clear answer.

Follow up research should thus focus around different combinations of binder viscosity and drop height, the making of a powder bed and shrinking or perhaps enlarging the droplet size.

## 7. Discussion

In the previous sections, the possibility of applying sawdust from the case company in several additive manufacturing processes has been investigated. Their benefits, drawbacks and challenges have been described and an experiment has tested if it is possible to overcome the main constraint of each process. The question that remains is which process is most suitable for the case company as described in section 3.

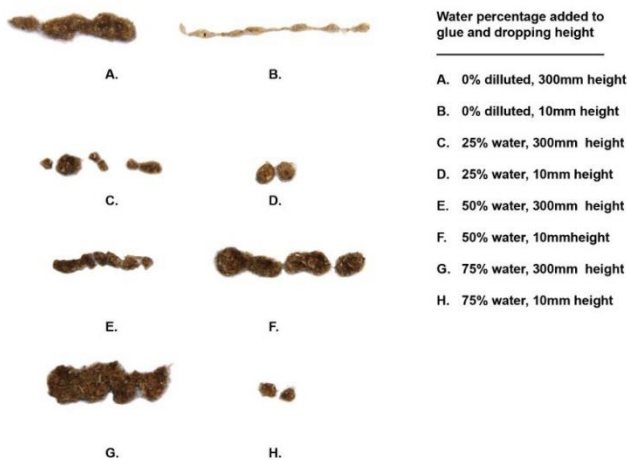


Figure 18. Results of binder jetting experiment

This will be discussed below, based on the requirements that followed from the case study and the findings from the experiment.

Material extrusion processes have the main advantage of being relatively inexpensive and widespread. Basic machines are available from just €2.000, excluding value added tax [23]. Because these are affordable, it would be possible to work with multiple printers at once. This would highly increase build speeds, since most devices have small build chambers and thus many small builds will need to be made that combined make up one room divider. Simultaneously, because this process is most practiced in home use, there is an extensive community for support and documentation, making personnel training more accessible and lowering the risks of the investment. The lines that were visible in the experiment are a design element the general public expects from 3D printing, making the appearance contribute to achieving the goal of being perceived by the case company as innovative and progressive. When multiple printers are used concurrently, processing time for one room divider could be well under 3 days on average. The time an employee of the company is required for pre-processing, processing and post-processing are also expected to be acceptable. Man hours are needed to start the process and perhaps to remove support structures, but the process can run without close supervision. The experiment showed that extruding sawdust-based materials is possible. However, more research is needed to use the correct binder and hardening principle.

Sheet lamination processes have the main advantage of being close to the expertise already present in the case company, since the builds consists of layers of wood-based composite material that have been cut. This process is thus close to the expertise already present in the company's personnel, therefore the amount of training hours required is expected to be low. Also, it might be possible to use machines already present for this process. But before building parts with a sheet lamination process can take place, sheets have to be pressed from the process waste material. Doing so would require a rather large press, which is expected to be expensive. If new machinery is required for the sheet lamination process as well, costs are expected to rise far above the available €30.000. And although the process is

close to the company's employees' current expertise, a lot of man hours are required in this process, greatly increasing the cost per part. And despite that the experiment showed it is possible to press sheet material from sawdust, it remains to be seen if this material is durable enough to be processed with a laser cutter or a mill.

Binder jetting processes have the main advantage of making an accurate part that does not require extensive post processing. This accuracy however comes with a price. Machines are quite expensive, starting at approximately €20.000 and to set up a process that will deliver one room divider per three days will require a much larger investment. Although training of personnel should not be a major hurdle, less documentation is available than for instance is available for material extrusion processes. The experiment was also rather inconclusive on the feasibility of applying sawdust in a binder jetting process. The sawdust sample was much courser than the commonly used powders in binder jetting processes and the droplets of binder were also much larger, being 1,19mm instead of 0,08mm. If processing the case company's process waste material is at possible thus remains to be seen.

## 8. Conclusion

In this paper, additive manufacturing processes have been researched to investigate the applicability of using sawdust as input material for these processes. A case study provided focus for researching the application of the processes in a businesses. Above all, investments in additive manufacturing have to be earned back in a business environment. The binder jetting process can make decent builds, but is too expensive and uncertain at this time to implement in the case company. The sheet lamination process is clearly possible, but the added value of reusing sawdust instead of using new material is questionable and a lot of man hours are required to operate the process, making it harder to add it to current business. Material extrusion processes however are affordable and extensive documentation and community support are available. Also the looks of the product connect to the general expectation of 3D-printed products and it was possible to make a part that looked that way with the experiment that is part of this research. This makes material extrusion the most promising direction for implementing additive manufacturing processes in a wooden interior building company.

## References

- [1] Maharani, R., Yutaka, T., Yajima, T. & Minoru, T. (2010). Scrutiny on physical properties of sawdust from tropical commercial wood species: Effects of different mills and sawdust's particle size. In: *Indonesian Journal of Forestry Research*, 7(1), pp. 20-32
- [2] Rivera, J. & Van der Meulen, R. (2014). *Hype cycle for emerging Technologies, 2014*. Retrieved from Gartner database.
- [3] Du Preez, N., Lutters, D. & Nieberding, H. (2009). Tailoring the development process according to the context of the project. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1(3), pp. 191-198
- [4] European Commission (2005). *SME definition: User guide and model declaration*. Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities

- [5] Centraal Bureau voor de Statistiek (2010). *Branchecijfers timmerindustrie*. The Hague: CBS
- [6] Kals, H. J. J. et al. (2007). *Industriële productie : het voortbrengen van mechanische producten*. The Hague: Academic Service
- [7] Stark, N.M., Cai, Z. & Charles, C. (2010). Wood-based composite materials: panel products, glued-laminated timber, structural composite lumber, and wood-nonwood composite materials. In: *Wood handbook: wood as an engineering material*. Washington: US department of agriculture, forest service, forest products laboratory
- [8] The engineered wood association (2010). *A guide to engineered wood products*. Retrieved on December 1, 2014 from: <http://www.scribd.com/doc/47775883/A-Guide-to-Engineered-Wood-Products>
- [9] Ahn, S.H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S. & Wright, P.K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. In: *Rapid prototyping journal*, 8(4), pp. 248-257
- [10] Lee, C.S., Kim, S.G., Kim, H.J., & Ahn, S.H. (2007). Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. In: *Journal of materials processing technology*, 187, pp. 627-630
- [11] Gibson, I., Rosen, D.W. & Stucker, B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Springer: New York
- [12] Kyle Maxey (2013). *The history of 3D printing*. Retrieved on December 3, 2014 from: <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/6262/Infographic-The-History-of-3D-Printing.aspx>
- [13] Chokshi, R., & Zia, H. (2010). Hot-melt extrusion technique: a review. In: *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*, 3, pp. 3-16
- [14] Lim, S., Buswell, R.A., Le, T.T., Austin, S.A., Gibb, A.G., & Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. In: *Automation in construction*, 21, pp. 262-268
- [15] France A.K. (2013). *Make: 3D Printing: The Essential Guide to 3D Printers*. San Francisco: Maker Media
- [16] Kruder GA. (1985). Extrusion. In: *Platzer N. (Ed) (1985). Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, volume 1*. New York: John Wiley & Sons, pp. 571-631
- [17] Tzsheisen, W. & Karlsohn, M. (2007). Hot direct extrusion—A novel method to produce abrasion-resistant metal-matrix composites. In: *Wear* 263 (7), pp. 896-904.
- [18] Horvath, J. (2014). *3D Printing*. New York: aPress
- [19] Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O. & Garrett, B. (2011). *Could 3D printing change the world?*. Washington: Atlantic council
- [20] Printspace (2014). *Cartesian Vs. Delta printers: how do they work?* Retrieved on November 27, 2014 from: <http://printspace3d.com/cartesian-vs-delta-printers-work/>
- [21] Le, T.T., Austin, A.S., Lim, S., Buswell, R.A., Gibb, A.G.F. & Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. In: *Materials and structures*, 45 (8), pp. 1221-1232.
- [22] Lipson, H., & Kurman, M. (2013). *Fabricated: The new world of 3D printing*. New York: John Wiley & Sons
- [23] Ultimaker B.V. (2014). *Ultimaker 2*. Retrieved on December 18, 2014 from: <https://www.ultimaker.com/pages/our-printers/ultimaker-2>
- [24] Park, J., Tari, M.J., Hahn, H.T. (2000). Characterization of the laminated object manufacturing (LOM) process. In: *Rapid Prototyping Journal*, 6(1), pp. 36-50
- [25] Chua, C. K., Chou, S. M., & Wong, T. S. (1998). A study of the state-of-the-art rapid prototyping technologies. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14(2), pp. 146-152
- [26] Ahn, D., Kweon, J.H., Choi, J., Lee, S. (2012). Quantification of surface roughness of parts processed by laminated object manufacturing. In: *Journal of Materials Processing Technology*, 212 (2), pp. 339-346
- [27] Stucker, B.E., Janaki, R.G.D. (2007). *Layer-based additive manufacturing technologies*. In: Groza, J. (ed) (2007). *CRC materials processing handbook*. New York: Taylor & Francis Meteyer, S., Xu, X., Perry, N. & Zhao, Y.F. (2014). Energy and material flow analysis of binder-jetting additive manufacturing processes. In: *Procedia CIRP*, 15, pp.19-25
- [28] Moon, J., Grau, J.E., Knezevic, V., Cima, M.J. & Sachs, E.M. (2004). Ink-Jet Printing of Binders for Ceramic Components. In: *Journal of the American Ceramic Society*, 85(4), pp. 755-762
- [29] Sachs EM, Cima MJ, Williams P, Brancazio D, Cornie J (1992) Three-dimensional printing: rapid tooling and prototypes directly from a CAD model. *J Eng Ind* 114:481-488
- [30] Heinzl, J. (1985). *Ink-jet printing*. New York: Academic Press
- [31] Leach, R.H., Pierce, R.J., Hickman, E.P., Mackenzie & M.J. & Smith, H.G. (1993). *Printing ink manual*. New York: Blueprint
- [32] Grau, J.E., Moon, J., Uhland, S., Cima, M.J. & Sachs, E.M. (1997). High green density ceramic components fabricated by the slurry-based 3DP process. In: Beaman, J.J., Marcus H.L., Bourell, D.L., Barlow, J.W. & Crawford, T. (eds) (1997). *Proceedings of the solid freeform fabrication symposium*, august 11-13, University of Texas, Austin, Texas
- [33] Bison International B.V. (n.d.). *Houtlijm: Vochtbestendige houtlijm D2 factsheet*. Retrieved on December 16, 2014 from: [http://www.bison.nl/static/products/assets/asset\\_3129\\_2.pdf](http://www.bison.nl/static/products/assets/asset_3129_2.pdf)
- [34] Sigma Aldrich (2014). *Syringe Needle Gauge Chart*. Retrieved on December 18, 2014 from <http://www.sigmaaldrich.com/chemistry/stockroom-reagents/learning-center/technical-library/needle-gauge-chart.html>

## Image references

- 2 Adopted from: Maloney, T.M. (1986) *Terminology and products definitions- a suggested approach to uniformity worldwide*. In: Proceedings of the 18th international union of forest research organization world congress, September 1986, Ljubljana, Yugoslavia.
- 3 Adopted from: Suchsland. O. & Woodson, G.E. (1986). *Fiberboard Manufacturing Practices in the United States*. In: *Agricultural handbook*. Washington, DC: USDA Forest services, p. 263
- 6 Adopted from: Ahn, S.H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S. & Wright, P.K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. In: *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), pp.248-257
- 7 Adopted from: Start 3D Printing (2013). *What is a Bowden extruder?*. Retrieved on November 28, 2014 from: <http://start3dprinting.com/2013/07/what-is-a-bowden-extruder/>
- 8 Adopted from: Start 3D Printing (2013). *What is a Bowden extruder?*. Retrieved on November 28, 2014 from: <http://start3dprinting.com/2013/07/what-is-a-bowden-extruder/>



- extruder/
- 9 Adopted from: Gibson, I., Rosen, D.W. & Stucker, B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies. Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer
  - 10 Adopted from: Gibson, I., Rosen, D.W. & Stucker, B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies. Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer
  - 11 Adopted from: Stratoconception (n.d.). *Fauteuil Strat@Art – CIRTES*. Retrieved on November 27, 2014 from: <http://www.stratoconception.com/11-produits>
  - 12 Adopted from: Dreams (2014). *Binder Jetting*. Retrieved on November 26, 2014 from: <http://www.me.vt.edu/dreams/binder-jetting/>
  - 13 Adopted from: Imaging.org (2009). *Progress and trends in Ink-jet printing technology*. Retrieved on November 26, 2014 from: <http://www.imaging.org/ist/resources/tutorials/inkjet.cfm>
  - 14 Adopted from: Fang, M. (2010). *How is inkjet printing done?*. Retrieved on November 26, 2014 from: [http://www.science20.com/mei/how\\_inkjet\\_printing\\_done](http://www.science20.com/mei/how_inkjet_printing_done)

## B. Plan van aanpak

# Bacheloropdracht- Plan van aanpak

---

Onderzoek mogelijkheden van gebruik zaagafval met behulp van FDM proces ten behoeve van interieurbouw.

Martijn Bergsma, s1217844

### Begripsbepaling

Slurry: Een mengsel van een vast en een vloeibaar materiaal, in dit geval zaagafval en lijm.

Parameters: Er worden parameters gedefinieerd en daarop worden eigenschappen vergeleken.

### Opdrachtgever: Coors Interieurbouw

De opdracht is door Coors opgegeven aan de Universiteit Twente en Martijn Bergsma voert namens de Universiteit het onderzoek uit. Coors ontwerpt, bouwt en verzorgt de procesbegeleiding van realisatie van winkel- en kantoorinrichtingen. De taken zijn verdeeld over drie groepen: kantoor, productie en project ontwerp & management. Innovatieve en milieubewuste productontwikkeling staat hoog in het vaandel.

De toekomst staat onder druk, interieurbouwmarkt is klein en de concurrentie is groot. Houtplaat is daarom het meest gebruikte materiaal. Gekromde vlakken zijn door de vele arbeid en hoge kosten niet toepasbaar. Op de locatie in Ridderkerk verwerkt Coors multiplex, spaanplaat en mdf. Het zaagafval dat wordt afgezogen wordt opgeslagen in een zeecontainer, met een waarde van €100,- per drie weken.

De wereld van interieurbouw is aan het veranderen, maar wat de nabije toekomst brengt is onbekend.

### Actoranalyse

Belanghebbenden met belangen (B) en expertises (E).

#### Opdrachtgever: Coors

B: Mogelijkheid tot een toekomstig marktwaardig product en daarmee concurrentievoordeel behalen.

E: Interieurbouw, klantbegeleiding, projectmanagement, installatie, ontwerp, marktkennis.

#### Ontwerper: Martijn Bergsma

B: Afstuderen, kennis opdoen, portfoliowaardig project opleveren.

E: Ontwerpen van producten, processen.

#### Klanten van Coors

B: Een product dat degelijk is, milieuvriendelijk, goedkoop.

E: Kopen van interieur, afschrijftermijn van interieurdelen.

#### Werknemers bij (bovenstaande) klanten

B: Prettige werkomgeving, mooi, degelijk, gebruiksvriendelijk interieur.

E: Gebruikservaring, verwachtingen en behoeften bij interieurdelen.

#### Concurrenten van Coors

B: Marktaandeel houden/vergroten, omzet/winst behalen.

E: Interieurbouw, marktkennis.

#### Ontwerpers bij Coors

B: Geen restricties in het ontwerp, afmetingen niet beperkt door machine, hoge resolutie printen voor details, verscheidene afwerkingsmogelijkheden.

E: Vormgeving, creativiteit, nieuwe ideeën, interieurontwerp.

### *Engineers (technische ontwikkeling) bij Coors*

B: Materiaaleigenschappen, stijfheid en sterkte optimale krachtenverdeling, hoge resolutie voor toleranties, geschikt voor nabewerkingen zoals boren.

E: Installatie van interieur, machinekennis, werkplaatskennis, constructie.

### *Installateurs bij Coors*

B: Machine die snel op en af te bouwen is, snel gebruiksklaar, klein te vervoeren, geprinte vorm gemakkelijk uit de machine te halen.

E: Werkplaats en machinekennis, installatie van interieur, constructie.

### *Projectmanagers bij Coors*

B: Machine die snel en gemakkelijk in te zetten is, zo weinig mogelijk overheadkosten, verkoopbaar proces/machine, zo weinig mogelijk overlast creëren bij klanten.

E: Management van proces, werknemers, begeleiding van klanten.

Coors zoekt een nieuwe productiemogelijkheid die innovatief is en een toevoeging kan zijn op de huidige interieurbouw. Coors kan daarmee een concurrentievoordeel behalen en een vernieuwingsrichting in de interieurbouw initiëren. Het zaagafval dat verwerkt wordt in de producten kan een hogere waarde krijgen en zou milieuvriendelijk toegepast kunnen worden (als nieuw product).

Door het 3D printproces zullen gekromde oppervlakken en andere vrije vormen mogelijk zijn, die meer vrijheid geven in de ontwerpen. Echter, zal de grootte van de machine en de nauwkeurigheid van invloed zijn op de ontwerpenmogelijkheden.

De nieuwe eigenschappen van de 3D geprinte interieurelementen moeten weer gecontroleerd worden door de ingenieurs, welke toleranties zijn mogelijk, wat zijn de eisen voor dunwandige producten en welke nabewerkingen zijn mogelijk. De installateurs zullen de machine op locatie gebruiken. Voor hen zijn het transport, op- en afbouwtijd en afmetingen van de machine van belang.

Projectmanagers zullen rekening moeten houden met het printen op locatie, de kosten daarvan en de overlast bij de klanten.

## Projectkader

De opdrachtgever meent mogelijkheden te zien in het toepassen van FDM als productieproces om een afvalmateriaal, zaagafval, te hergebruiken in nieuwe producten. Daarmee ontstaan nieuwe mogelijkheden in het productontwerp en wordt een slag geslagen in milieuvriendelijkheid van het bedrijf.

Door middel van een literatuuronderzoek en experimentele testen zullen er conclusies en aanbevelingen gedaan worden over de toepassing van een FDM proces met zaagafval. Deze resultaten zullen in een verslag worden beschreven.

## Doelstelling

Het doel van dit project is het verkennen van wat er mogelijk is ten behoeve van 3D printen met behulp van zaagafval.

Allereerst wordt de juiste lijm voor het mengsel bepaald. Vervolgens worden machineonderdelen getest om de beste transport en opslagmogelijkheden voor het mengsel te bepalen. Na de depositie moet het mengsel op de plek uitharden tot een stevige constructie en is bewerkbaarheid een belangrijke factor. Daarna wordt uitgezocht voor welke proces parameters het een economisch acceptabel proces is. Als laatste zal dat vertaald worden naar een in praktijk bruikbare machine.

Kortom zijn dat vijf doelstellingen:

1. Waar bestaat de slurry uit dat gedeponeed wordt?
2. Hoe wordt de slurry opgeslagen, getransporteerd en gedeponeed? (Interne onderdelen)
3. Hoe blijft de slurry op zijn plek en wat zijn de eigenschappen na uitharding?
4. Welke proces parameters resulteren in een economisch acceptabel proces?
5. Wat behoeft de machine voor dit proces in de praktijk?

## Vraagstelling

**Wat omvat een FDM machine die kan printen met een mengsel van lijm en zaagsel? Kan dat in praktijk werken, is het schaalbaar en wat zijn de productieresultaten?**

1. **Onderzoeksopzet**
  - a. Wat is de situatie?

- i. Coors, marktverandering, op zoek naar nieuwe mogelijkheden
- b. Opdrachtoomschrijving
  - i. 3d printen, zaagafval, proces/machine uitwerking
- c. Wat en waarom moet het onderzocht worden?
  - i. Wat is het doel van de opdracht?
  - ii. Wat zijn de vijf deelvragen? Waarom heb ik deze vragen gekozen? Welke aanpak wordt er gevolgd?
- d. Hoe wordt het onderzocht?
  - i. Onderzoeksaanpak, informatie zoeken, testen

## 2. Startinformatie

- a. Wat zijn de eisen voor de machine? Stel het Programma van Eisen op.
  - i. Welke eisen heeft Coors aan het te ontwikkelen proces?
  - ii. Welke eisen/wensen zijn verder van toepassing?
- b. Wat is het proces waar vanuit wordt gegaan?
  - > FDM proces met twee boorschroeven, vast reservoir en bewegende printkop.
- c. Wat is het FDM proces en hoe werkt het?

## 3. Proces/machineonderdelen

- a. Wat zijn de resultaten van eerdere testen met lijm/zaagsel mengsels?
- b. Wat is de huidige staat van FDM 3D printen met houtvulling?
- c. Wat is de huidige staat van FDM 3D printen met laagdiktes > 5mm?
- d. **Lijm**
  - i. Welke lijmsoort resulteert in een slurry met de beste eigenschappen voor punten c-e?
    1. Verzamel informatie over de lijmsoorten
    2. Test de lijmen
    3. Conclusies
      - a. Parameters:
        - i. Biologisch afbreekbare lijmen
        - ii. Schadelijke lijmen
        - iii. c2c lijmen
        - iv. Lijmen voor grote laagdiktes
        - v. Lijmen die goed hechten met hout
        - vi. Invloed van eigenschappen van hout, uitzetting, drogen, e.d.
        - vii. Sterke lijmen na uitharden
        - viii. Snelheid van uitharden
        - ix. Benodigdheden voor uitharden
  - ii. Welke verhouding van lijm en zaagsel resulteert in een slurry met de beste eigenschappen op punten c-e?
    1. Moet het zaagafval gefilterd/gesorteerd worden?
    2. Moet het zaagafval worden vermalen?
    3. Wat is de meest geschikte verhouding en consistentie?
- e. **Opslag, transport en depositie**
  - i. Kan de slurry worden verplaatst met een extrusieproces?
    1. Hoe groot is de kracht die op de wanden komt te staan bij de drukopbouw en transport van de slurry en wat is daarop van invloed?
    2. Wat is de relatie tussen de druk, consistentie/verhouding en vloeibaarheid van de slurry door de leidingen?
    3. Test de vloeibaarheid en het gemak van het verplaatsen van de slurry met een boorschroef door een buis.
  - ii. Is de machine na te vullen en schoon te maken? (Uitharding in de machine)
    1. Kan het lijm mengsel in het reservoir bewaard worden?
    2. Is het nodig om de machine na gebruik schoon te maken, hoe en welke delen?
    3. Hoe lang mag de machine stilstaan zonder schoongemaakt te worden, tijdens het printen?
  - iii. Wat heeft invloed op een juiste depositie van de slurry?
    1. Welke functies heeft de printkop nodig?
      - a. Verwarming/koeling
    2. Welke grootte printkop (spuitmond) is geschikt?

- a. Test depositie van de slurry met verschillende groottes spuitmond.
- 3. Welke snelheid van extruderen en printkopbeweging is geschikt?
- f. Uitharding en constructie van de het product**
  - i. Blijft de slurry op zijn plek na depositie?
  - ii. Hoe snel kan een volgende laag op de vorige worden gedeponereerd?
  - iii. Wat zijn de eigenschappen van het geprinte materiaal? (Materiaaleigenschappen) (Testen)
    - 1. Stijfheid en sterkte
    - 2. Oppervlakteverbetering
    - 3. Bewerkbaarheid (boren, schuren)
  - iv. Wat zijn de belemmeringen voor te printen vormen?
- 4. Opschalen en praktijkinzet**
  - a. Welke procesparameters resulteren in een economisch acceptabel proces?
    - i. Afmetingen machine/machineonderdelen
    - ii. Snelheden, depositievolumes
    - iii. Nauwkeurigheden
- 5. Concept ontwerp**
  - a. Wat heeft de machine die dit proces in praktijk zou kunnen uitvoeren?

## Strategie

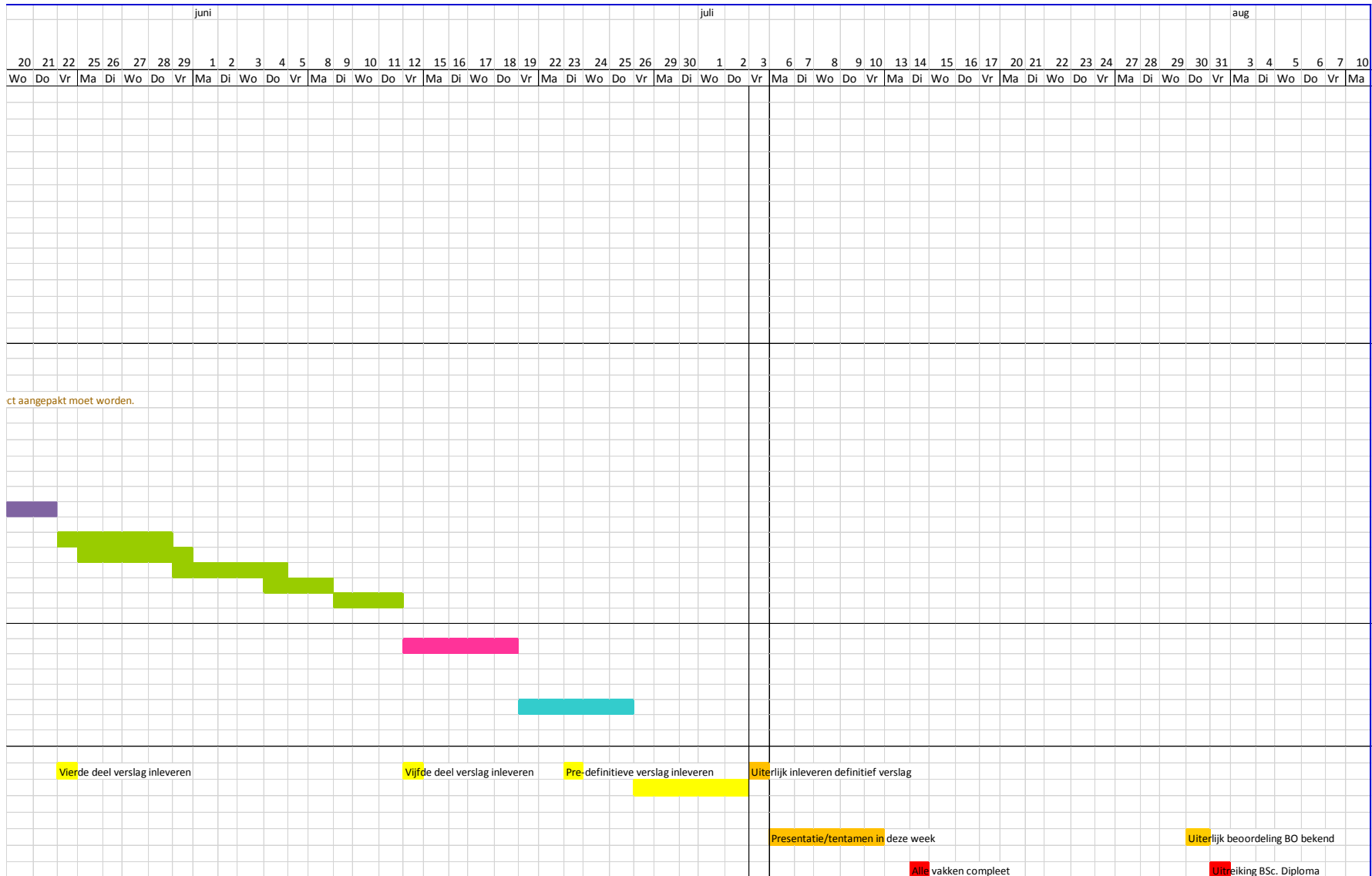
Deelvraag	Strategie	Materiaal/bronnen	Opmerking
1a	Informatie omschrijven naar verslagvorm.	Plan van Aanpak, gesprek met Coors, gesprek met T. Vaneker, opdrachtomschrijving	
1b	Informatie omschrijven naar verslagvorm.	Plan van Aanpak, gesprek met Coors, gesprek met T. Vaneker, opdrachtomschrijving	
1c	Informatie omschrijven naar verslagvorm.	Plan van Aanpak, gesprek met Coors, gesprek met T. Vaneker, opdrachtomschrijving	
1d	Informatie omschrijven naar verslagvorm.	Plan van Aanpak, gesprek met Coors, gesprek met T. Vaneker, opdrachtomschrijving	
2a	Informatie omschrijven naar verslagvorm.	Plan van Aanpak, gesprek met Coors, gesprek met T. Vaneker, opdrachtomschrijving	
2b	Informatie omschrijven naar verslagvorm.	Gesprek met Coors, gesprek met T. Vaneker	
2c	Literatuuronderzoek, interview.	Gesprek met T. Vaneker, artikelen van internet	
3a	Literatuuronderzoek	Wetenschappelijke artikelen, artikelen v.h. internet	Inlezen en vooral basiskennis opbouwen. Eventueel zijn er experts op de UT te vinden.
3b	Literatuuronderzoek	Wetenschappelijke artikelen, artikelen v.h. internet	
3c	Literatuuronderzoek	Wetenschappelijke artikelen, artikelen v.h. internet	
3d.i	Literatuuronderzoek, interview, testen	Wetenschappelijke artikelen, artikelen op internet, gesprek met een expert op het gebied van lijmen, testresultaten.	Expert op gebied van lijmen nodig! Cradle2cradle, Bison/Pattex, 3D printfilament onderzoekers, Timberfill, docenten van UT. Eigen onderzoek uitvoeren op eigenschappen van de lijmen.

3d.ii	Literatuuronderzoek, interview, testen	Wetenschappelijke artikelen, artikelen op internet, gesprek met een expert op het gebied, testresultaten.	Expert op gebied van zaagsel/lijm mengsels of slurry nodig! Bison/Pattex, 3D printfilament onderzoekers, Timberfill, docenten van UT. Eigen onderzoek naar mengsels, consistentie, ruwheid, vormvastheid.
3e.i	Literatuuronderzoek, interview, testen	Wetenschappelijke artikelen, artikelen op internet, gesprek met een expert op het gebied, testresultaten.	Expert op gebied van slurry, extrusieprocessen of stroomanalyse nodig! Docenten van UT. Eigen onderzoek naar mengsels, consistentie, boorschroefmethode/extrusieproces.
3e.ii	Literatuuronderzoek, testen	Wetenschappelijke artikelen, artikelen op internet, testresultaten.	Eigen onderzoek naar mengsels, uithardingstijd, uitzetting/krimp, herbruikbaarheid van uitgeharde delen. Eigenschappen van de lijmen.
3e.iii	Literatuuronderzoek, interview, testen	Wetenschappelijke artikelen, artikelen op internet, gesprek met een expert op het gebied, testresultaten.	Expert op het gebied van FDM 3D printen nodig! Eigenschappen van de gekozen lijmen. Eigen onderzoek naar mengsels, groottes van spuitmonden, snelheden van extruderen.
3f.i	Testen	Testresultaten	Eigenschappen van de gekozen lijmen. Eigen onderzoek naar mengsels, vormvastheid, uithardingstijd, manieren van uitharden.
3f.ii	Testen	Testresultaten	Eigenschappen van de gekozen lijmen. Eigen onderzoek naar mengsels, vormvastheid/vloeibaarheid, uithardingstijd.
3f.iii	Testen, literatuuronderzoek naar stijfheid en sterkte, oppervlakteverbetering, bewerkingen.	Testresultaten	Eigen onderzoek naar mengsels, stijfheid en sterkte, oppervlakteverbetering, bewerkingen.
3f.iv	Conclusies trekken, aanbevelingen formuleren.	Testresultaten	Ervaring over alle voorgaande onderzoeken.
4a	Interview	Gesprek met Coors, gesprek met T. Vaneker	Expert op gebied van economisch acceptabele waarden en parameters nodig!
5a	Literatuuronderzoek, uitwerken van resultaten hiervoor beschreven.	Alle resultaten hiervoor beschreven.	Berekenen en schatten van de parameters van het ontworpen proces en opschalen naar praktijkfunctie.

## Planning

Planning is beschikbaar in een ander bestand of bijgevoegd.







## E. – Samenvatting Stargesprek met Coors

### Startgesprek met Coors – 1-4-2015

In gesprek met Chris in aanwezigheid van Ruby.

Bij de oplevering van een nieuw gebouw is het geld altijd op en is de planning al lang verstreken. Op dat moment moet Coors nog het interieur regelen. Er is dus weinig marge en weinig tijd.

Coors ontvangt van de architect de ontwerpen, dat zijn voornamelijk tekeningen uit Sketchup, plattegronden met looproutes en ideeën over kleur en vormen.

Voorbeelden van projecten waarbij Coors betrokken is geweest zijn: het stadskantoor in Utrecht en het scheepvaartmuseum.

De werk van de interieurdelen is voor 80% spaanplaat-werk (rechttoe rechtaan plaatmateriaal), de overige 20% zijn bijzondere delen met bijzondere vormen (af rondingen) of materialen.

Het ultieme doel van Coors bij de opdracht is het printen op locatie. Dus je zet een printer bij de klant neer, inclusief het materiaal, en daarmee wordt dan een binnen de juiste ruimte het meubelstuk gecreëerd met de volledige afmetingen.

De korrels die Tom eerder al heeft gekregen bestaan voor 30% uit zaagsel en 70% is PPC.

Coors gaat er van uit dat dergelijke ontwerpproblemen stap voor stap opgelost moeten worden. Eerst een mengsel vormen, dan iets opbouwen, dan proberen ronde vormen te maken en daarna nog een gladde afwerking.

3D printen van meubels met kunststof is uitgeprobeerd met Jasper Menge (TNO?).

Elke maand wordt er ongeveer 30 m<sup>3</sup> zaagsel geproduceerd en afgevoerd, momenteel moet daarvoor worden bijbetaald.

In samples met het zaagsel is eenmaal een prima resultaat gehaald, maar de tweede keer toen er bamboe door het mengsel zat ging het mis. In het bamboe zat vocht dat ging koken door het verwarmingsproces en daardoor ontstonden onregelmatigheden en bubbels in het sample.

Krimp is duidelijke een probleem bij het 3D printen, zeker bij grote dunwandige oppervlakten trekt het krom en worden de verschillende laagjes losgetrokken.

Coors gebruikt 3 soorten lijmen:

1. Standaard houtlijm
2. Lijm voor een poeder dat in een van de zakjes zat.
3. Lijm voor te lijmen op een melanine laag, die zal daar beter op hechten.

Om een aantal parameters vast te leggen kan de balie uit een van de vorige artikelen worden gebruikt als referentieobject.

De doorlooptijd hangt af van de te vormen meubels. Als er veel rondingen in zitten kan een normale meubelmaker er al snel dagen mee bezig zijn.

Een tweede optie voor het testen van de extrusiemogelijkheden kan een holbeitelboor worden gebruikt. Dat is een vierkante holle beitel met een boor binnenin, zodat vierkante gaten worden geboord.

Een mooi resultaat zou zijn als er iets opgebouwd kan worden vanuit een mengsel van het zaagsel (zo veel mogelijk zaagsel) en een bindmiddel. Daarbij zouden materiaaleigenschappen, zoals sterkte, bewerkingsmogelijkheid en vormvastheid bij printen (en uitharding) bekend moeten zijn.

In de werkplaats komen planken binnen die voor elk project verschillend van kleur, dikte en andere eigenschappen. Die worden verwerkt door te zagen en te frezen. Op dat moment zijn de meubelstukken 'ikea-pakketjes' en kunnen ze stuk voor stuk worden opgebouwd door de meubelmakers en vervolgens getransporteerd naar bestemming. Meubels kunnen ook ter plekke worden gebouwd en dan worden ze getransporteerd als de 'ikea-pakketjes'.

## F. – Programma van eisen

Programma van Eisen en Wensen
Onderzoek naar de mogelijkheden van het gebruik van zaagafval ten behoeve van 3D printen.
<b>Algemeen</b>
De C2C kringloop moet worden gesloten.
De waarde van het houtafval moet hoger komen te liggen.
Coors kan complexe interieurelementen maken, zonder prijsstijging.
Er wordt een FDM-achtig proces gebruikt.
Grote interieurdelen moeten op locatie geprint kunnen worden.
<b>Opslag, Transport en Depositie</b>
De lijm is een laagvisceuse stof, maar na het mengen met zaagsel is het mengsel een hoogvisceuse stof.
Het te printen materiaal moet transporteerbaar zijn naar de extrusiekop.
Het te printen materiaal moet voldoende stevigheid bezitten om in vorm te blijven na depositie.
De mechanische delen van de machine mogen niet verstopt kunnen raken
Het zaagsel-lijm mengsel mag niet de machine onbruikbaar maken als die tijdelijk stilstaat.
<b>Lijm</b>
De lijm moet milieuvriendelijk / natuurlijk of biologisch afbreekbaar zijn.
De maximale krimp van de lijm is <1%
De lijm moet hechten met een gedeeltelijk uitgehard oppervlak.
Het mengsel bestaat voor een zo groot mogelijk deel uit zaagsel.
<b>Uitharding en Constructie van product</b>
Nabewerkingen moeten mogelijk zijn.
Het te printen materiaal moet snel genoeg uitharden om binnen ... tijd belast te worden met de volgende laag.
De machine kan complexe interieurelementen maken. (Dubbelgekromde vlakken, overspanningen)
De machine moet stabiel zijn om gedetailleerd genoeg te printen.
<b>Opschalen en praktijkinzet</b>
De machine is na opstarten autonoom.
De machine kan opgebouwd worden op verschillende formaten.
Het gebruik van de machine kan vereenvoudigd worden voor gebruik met weinig specifieke kennis.
De machine moet een volume printen van 1L per minuut.
Een volume van 3m3 is te printen binnen enkele dagen. 1 liter materiaal per minuut.
Printmateriaal moet makkelijk aan te vullen zijn, of een grote voorraad bij de machine.
De machine is eenvoudig in en uit elkaar te zetten.
De aanschafprijs van de machine is niet meer dan ....
De machine is niet zwaarder dan ....
De machine is efficiënt vervoerbaar, qua ruimte en gewicht.
De machine kan een product printen met minimale afmetingen .....
<b>Normen en Veiligheid</b>
Het product mag niet bezwijken onder krachten van normaal gebruik.
De machine mag geen open beweegbare onderdelen hebben.
<b>Verdwijnen</b>
Materialen van de machine en het mengsel hebben lange levensduur
Materialen van de machine en het mengsel kunnen gerecycled worden
Materialen/ onderdelen van de machine en het mengsel zijn te scheiden
<b>Maatschappelijke context</b>
<b>Ergonomie</b>
De machine mag geen overmatige lichamelijke belasting veroorzaken.

## G. – Hout gebaseerde filamenten

Bedrijf	Product	Material mixture based on:	Material 1	Percentage 1	Material 2	Percentage M2 (%)	Working temp. (°C)	Glass Trans. Temp. (°C)	Print speed (mm/s.)	Checked on:
colorFabb	woodFill	PLA	PLA/PHA	70	fine pinewood fibres	30	195-220	55	40-100	9-Apr
colorFabb	BambooFill	PLA	PLA/PHA	80	recycled bamboo fibres	20				9-Apr
filamentum	Timberfill	biodegradable material based on wood					170-185			9-Apr
Formfutura	Laywoo - D3		binding polymer	60	recycled wood	40	175-250			9-Apr
Guangdong Suntec Ind. Co.	wood filament for 3D printer	wood filament					220-260			10-Apr
Kraftmark	fabEpoxy	Epoxy		50		50	<250°F			10-Apr
ShenZhen Li Feng	Wood-plastic filament						200-220			10-Apr
Polymkr	PolyWood	foaming material, no wood, prop. like PLA					210-220		30	10-Apr
Stick filament	wood pulp kt 001	thermoplastic resin	plastic composite		cellulose fiber	40	180-195			10-Apr
Torwell	wood filament		binding polymer		recycled wood	35	230-260			10-Apr
TwoBEars	BioFila Linen	Biopolymers, no PLA					180			10-Apr

## H. – Eisentabel voor bindmiddelen

Eigenschappen:	Waarde:
Productgerelateerd	
Sterkteeigenschappen (zoals afschuifsterkte)	Sterkteeigenschappen vergelijkbaar met een gemiddelde twee component epoxy, verder nog geen specificatie mogelijk.
Hechting:	Voornamelijk goede hechting met zichzelf en hout
Viscositeit:	Laagvisceus
Mengverhouding:	>60% zaagsel, (max. verhouding; lijm: 60% - vulling: 40%), optimalisatie naar grootste deel vulling. Vulling bestaat uit: hout ( $\pm 95\%$ ), kunststof (o.a. melamine $\pm 4\%$ ), anders ( $\pm 1\%$ ).
Vormvastheid mengsel:	Mengsel moet vormvast zijn tot uitharding is voltooid.
Belastbaarheid mengsel na depositie	Een tweede laag moet op het mengsel gedeponerd kunnen worden zonder dat een laag vervormd
Percentage vluchtige stoffen	0%, oplosmiddelen hebben inzakken tot gevolg.
Krimp (%):	<1%
Biologische afbreekbaarheid:	Dit is een wens.
Recyclebaarheid (Cradle2Cradle):	Dit is een wens.
Schadelijkheid voor mens en natuur:	Zo laag mogelijk, dit is een wens.
Kosten:	Wordt in vrij grote volumes gebruikt, dus lage kostprijs.
Niet ingevulde eisen, hoeven niet of zullen nader gespecificeerd moeten worden.	

I. – Lijmen gecategoriseerd

Organic			Function	Society of Man. Eng. Class.	
Vegetable glues	Animal glues	Inorganic glues	Construction adhesives	Catalic multi-component adhesives	Heat activated systems (one component)
Starch	Casein	Soluble silicates	Epoxy	Epoxy	Polybenzimidazole
			Modified or alloyed epoxy (Modifiers: Toughener, nylon, phenolic, polysulfide, resorcinol and phenol formaldehyde, melamine, and urea-formaldehyde).		
Dextrins	Blood adhesives	Phosphate cements		Phenolic	Polyimide
			Modified or alloyed phenolic (Modifiers: Nitrile, vinyl, neoprene).		
Soybean glue	Shellac	Basic salt (Sorel cements)	Resorcinol-formaldehyde	Resorcinol-formaldehyde	Epoxy
Rosin	Bone and hide glue	Litharge cements	Polyaromatics	Polyester	Nylon
	Fish glues	Sulfur cements	Polyester	Polysulfide	Phenolic
		Hydraulic cements	Polyurethane	Polyurethane	Polyvinyl acetates
			Anaerobic	Silicones	Vinyl-phenolic
			Cyanoacrylate		Vinyl-epoxies
			Modified acrylic		Urethanes
			Neoprene (chloroprene)		
			Nitriles (acrylonitrile-butadiene)		
			Polysulfide		

		Categories:		Adhesives:	
Combination of categories with best expected properties:		(Construction and Catalic multi-component) or		Epoxy, phenoxies, phenol-formaldehyde, polyester,	
		(Heat activated and (thermoset or thermoplast or non-melt))		Phenolic, vinyl-phenolic, polyurethane, polysulfide	

Classification by Rayner				
Thermosetting resin adhesives	Thermoplastic resin adhesives	Other non-melt thermoplastic	Two-polymer adhesives	Bio-based adhesives
Urea-formaldehyde	Cellulose (cellulosics)	Ethyl cellulose	vinyl-phenolics	Polyactic acid
Melamine-formaldehyde	Polyvinyl	Polyvinyl acetate	epoxy-phenolics	Polyhydroxyalkanoates
Phenol-formaldehyde	Polyvinyl ester	ethylene-vinyl acetate	nitrile-phenolics	elastin
Resocinol-formaldehyde	Polyvinyl acetal	ethylene-vinyl acrylate	epoxy-polysulfide	Soy protein derivatives
Epoxy	Polyvinyl alcohol	Butyl methacrylates	nylon-epoxies	
Polyisocyanate (polyurethane)	Polyvinyl alkyl ether	Polystyrene, copolymers	elastomer-epoxies	
polyesters	Polystyrene	polyisobutylene	neoprene-epoxies	
Silicones	Acrylic esters	Hydrocarbon resins		
Furanes	acrylic acid diesters	Polypropylene		
Acrylics	cyanoacrylates	Polyamides		
Soluble nylons	Acrylic copolymers	polyesters		
Polyaromatics	Polyamide resin, nylon	phenoxies		
	polycarbonates			
	polyacetals			
	polyethylene			
	polysulfide			

## K. – Vergelijking aankoop gietharsen

Webshop/bedrijf	Harsbasis	Productnaam	Verwerkingstijd (min.)	prijs incl./excl. Harder	Prijs/verpakking	Verpakkingsgewicht	Kiloprijs	Keuze
Polyestershoppen	Polyester	POL000002	20	incl	16,9	1000	16,9	
Polyservice	Polyester	Polypol PS230	20-26	incl	13,79	750	18,39	
Polyservice	Epoxy	Polypol THV 500	25	incl	29,95	1500	19,97	
Polyestershoppen	Polyurethaan	POL000136	6-8, 10	incl	39,95	2000	19,98	
Polyservice	Polyurethaan	P.U. Giethars PS114	7	incl	40,9	2000	20,45	
Polyservice	Polyurethaan	P.U. Giethars PS115	3	incl	41,38	2000	20,69	
Polyestergigant	Polyester	GTS met MEKP harder	25-20	incl	21,44	1000	21,44	
Polyestergigant	Polyester-acryl	VPX	-	incl	25,95	1000	25,95	
Polyestershoppen	Epoxy universeel	EPO000004	20-30	incl	19,95	750	26,6	
Polyestershoppen	Epoxy universeel	EPO000005	40-50	incl	19,95	750	26,6	
Polyestergigant	Epoxy	EP12N universeel	40	incl	19,95	750	26,6	
Smooth-on	polyurethaan	Task 3	20	incl	27,47	940	29,22	
Polyestershoppen	Epoxy	EPO000202	30-60	incl	24,95	720	34,65	
Polyestergigant	Polyurethaan	Multicast 14 ISO 14	3-4.	incl	38,56	1000	38,56	
Polyestergigant	Polyurethaan	Multicast 10 ISO 2	2-3, gevuld 4-5, na 15-20 min. entformbar	incl	49,37	1000	49,37	
Permacol	epoxy	2163	30 (eigenlijk 20)	incl		1500		

Laagdikte	Sterkte	Krimp	Mengverhouding	Kleur	Volledige uithardtijd	Max temp.	Toepassing	Vulstoffen	Houdbaarheid	Viscositeit	Hardheid D	Website
100		<1%	.1:100	Helder					3-5 maand	500-700mPa.s		<a href="https://pol">https://pol</a>
		6.1%		helder	4 dagen					360-606 mPa.s		
20		<1%	.50:100	Helder				20% houtmeel, krijtstof 50%		600 mPa.s		<a href="http://www">http://www</a>
30, 100	35	0,6mm/m	.1:1	Beige	60-90	80		Mogelijk tot 60%		46 mPa.s	75	<a href="https://pol">https://pol</a>
			2%	helder	2,5-10					800 mPa.s		
			.1:2	helder						Gemengd 700 mPa.s, 950 en 200		
			.1:2	helder						Gemengd 700 mPa.s, 950 en 200		
			.1:2	helder, gelig						550 mPa.s	95 A	
12,7 mm		6,00%		wit	2-4 uur	57				150	80	<a href="http://www">http://www</a>
10cm - 30		<1%	.60:100	helder					1 jaar	500-700mPa.s		<a href="https://pol">https://pol</a>
		<0,02%	.1:1 , vuller 3,5	beige						80 mPa.s, met vuller 3250 mPa.s	75-80	
			.50:100		24 uur	80				400 mPa.s	80	<a href="http://nl.p">http://nl.p</a>



L. – Eigenschappen van de Task 3 polyurethaan giethars

<b>Task 3 – Table of Properties</b>	All values measured after 7 days at 73 °F/23 °C
Pot life (min.)	20
Cure time (min.)	90
Tensile strength (psi)	6.650
Tensile modulus (psi)	290.000
Elongation at break (%)	6
Flexural strength (psi)	9.500
Flexural modulus (psi)	288.000
Compressive strength (psi)	8.300
Compressive modulus (psi)	78.000
Shrinkage (in./in.)	0.0025
Mix ratio (volume / weight)	A 1 : B 1 / A 120 : B 100
Mixed Viscosity (cps)	150
Specific gravity (g/cc)	1,12
Specific volume (cu. In/lb)	24,7
Color	White
Shore D hardness	80
Heat deflection temp. (°F / °C)	134 / 57
	Adapted from Technical Data Sheet Task 2 & Task 3, Smooth-On ("TASK_2_3_TB.pdf", z.d.)

## M. – Proof of Concept

Het materiaal is uitgezocht en vele eigenschappen van de printer zijn bekend. Om te laten zien dat het materiaal echt 3D geprint kan worden is een nieuwe kop ontworpen die op de Fab@Home 3D printer geplaatst kan worden om te experimenteren met het nieuwe materiaal. De Fab@Home 3D printer is speciaal ontworpen om meerdere materialen te kunnen printen. De printkop kan eenvoudig verwisseld worden, zodat men hun eigen printkop kan ontwerpen en daarmee 3D printen.

De ontworpen printkop is afgeleid van een kunststof spuitgiet extruder. De basis is een slangenboor. Een slangenboor is een houtboor zonder kern, zodat er veel ruimte is om spanen af te voeren. Door deze andersom te laten draaien wordt materiaal naar voren gedrukt i.p.v. afgevoerd. Door deze in een buis te laten draaien kan een druk worden opgebouwd door het materiaal de buis in te persen. Deze samenvoeging wordt verticaal gezet. Boven de buis wordt een trechter aangebracht om als reservoir te werken en tegelijkertijd het materiaal naar de buis te begeleiden. Om dat extra te stimuleren worden bladen toegevoegd die meedraaien met de boor en het materiaal in de trechter naar beneden duwen. De motor wordt naast de trechter gehangen en de overbrenging gaat via tandwielen of een ketting. Verdere onderdelen zijn ondersteuning of verbindingsonderdelen die onder andere de slangenboor vastzetten, de motor vasthouden en de verbinding met de printer maken.

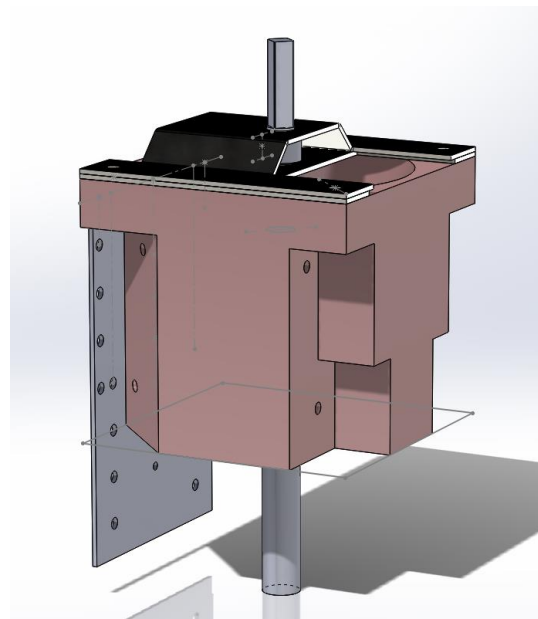


Figure 72 - Printkop voor Fab@Home printer - zijaanzicht

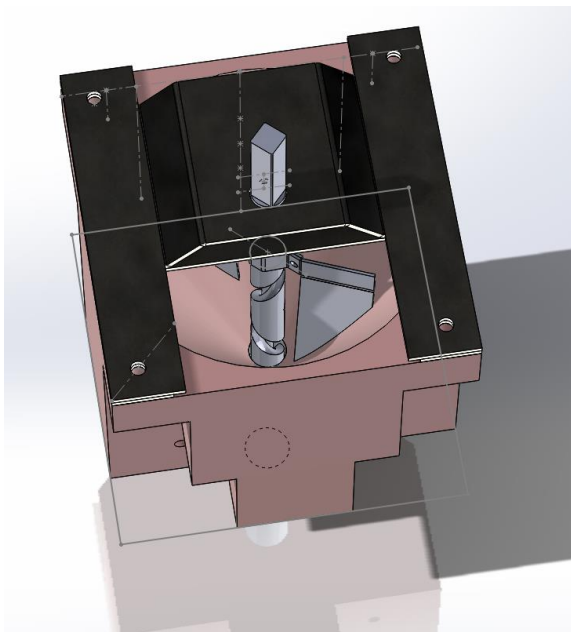


Figure 71 - Printkop voor Fab@Home printer – bovenaanzicht

## N. – Uitwerkingen van de experimenten

### Experiment 1 – Verschillende soorten lijmen

Experiment voor de keuze en het ontdekken van de mogelijkheden van lijmsorten ten behoeve van FDM 3D printen.

Er worden voor dit experiment een aantal testen tegelijk uitgevoerd. Dat zijn de volgende:

1. Doorhardingstijd
2. Droogtijd voor een volgende laag / stapelbaarheid
3. Bewerkbaarheid van het resultaat

Verder worden stadia van de test bijgehouden en opgeschreven om de eigenschappen van de lijmmengsels te beschrijven en af te leiden.

Die eigenschappen worden getest met een mengsel van zaagsel met een van de volgende lijmen:

Lijm:	Op basis van:	Uithardingsprincipe:
Muurvuller, Alabastine	cellulose	vochtdispersie
Behangplaksel, Base Line	cellulose / zetmeel	vochtdispersie
Contactlijm, Bison Kit	oplosmiddel	verdamping oplosmiddel
Polyesterplamuur, Soriso	2-comp. Polyesterhars + verharder	chemische reactie
Allesvuller, Alabastine	cement, kunstharsgebonden	vochtopenname/-dispersie

Benodigheden (excl. Lijmen):

- Zaagsel
- Zeef
- Bak voor gezeefd zaagsel
- Mengbekers
- Plastic bekertjes
- Weegschaal
- Roerstokjes
- Spuit (10 mL)
- Plank
- Lege kitkokers
- Kitpistool
- Stanley mes
- Kleine zaag
- Aantekeningenboekje met schrijfgerei
- Stucpapier, karton of kranten
- Watervaste stift

#### Werkwijze

Om te beginnen wordt eerst met een kleine 10 mL spuit een geschikte verhouding zaagsel en lijm voor de behanglijm bepaald, daarvan kan het meest aangemaakt worden. Behanglijm is een poeder dat moet worden aangevuld met water. De poeder wordt met water gemengd in een verhouding 200 gr./3 L. (De gebruiksaanwijzing geeft 200gr./4 L aan, maar behanglijm bevat dan vrij veel vocht.) Voor 2 gram poeder is 30 mL water nodig.

1. Zeef het originele zaagsel zodat de grootte van de deeltjes < 5mm.
2. Maak in de spuit een gat met diameter 5 mm.
3. Meng 4 gram behangplakselpoeder met 60 mL water. 100mL is het geworden.
4. Vul bij en meng met 60 cm<sup>3</sup> gezeefd zaagsel. (50% zaagsel, volume) 100 ml
5. Vul de spuit tot 10 mL met dit mengsel. 20 mL
6. Spuit het mengsel in een streep op de plank.
7. Vul en meng het mengsel bij met 73 cm<sup>3</sup> gezeefd zaagsel. (70% zaagsel, volume) 120mL
8. Vul de spuit tot 10 mL met dit mengsel. 20 mL
9. Spuit het mengsel in een tweede streep op de plank.

10. Vul en meng het mengsel bij met 346 cm<sup>3</sup> gezeefd zaagsel. (90% zaagsel, volume) 560mL
11. Vul de spuit tot 10 mL met dit mengsel. 20 mL
12. Spuit het mengsel in een derde streep op de plank.
13. Maak direct een foto en beschrijf bijzonderheden.
14. Doe de resten in een kunststof koffiebekertje tot 50 mL, wat daarna over blijft mag weg.
15. Maak na 30 minuten een foto en beschrijf bijzonderheden.
16. Maak na 60 minuten een foto en beschrijf bijzonderheden.
17. Maak na 3 uur een foto en beschrijf bijzonderheden.
18. Bepaal de meest geschikte toegevoegde hoeveelheid zaagsel in volumeprocent.
19. Maak na 24 uur een foto en beschrijf bijzonderheden.

## Resultaten

De proeftest met behanglijm ging niet zoals verwacht. Het eerste mengsel met 50 volumeprocent zaagsel was direct een dikke pasta. Dat resulteerde bij de spuitmond van 5mm in een schokkende extrusie. Daarna is hetzelfde mengsel getest met een 10mm spuitmond, waar de extrusie netter in een lijn kon gelegd worden. Bij beide strepen werden de houtvezels naar buitengedrukt zodra ze de spuitmond verlaten. Dat zorgt voor open plekken in de streep en een zeer ruw oppervlak. Om dat te verbeteren is het mengsel aangepast tot het 35,7 volumeprocent zaagsel bevatte. Dat mengsel is geëxtrudeerd met een 10mm spuitmond, dat ging vrij soepel en het oppervlak is veel minder ruw. Bij het drogen van de lijm zijn de uitstekende delen van het 50/50 mengsel in 3 uur uitgehard. Dat geeft al een beetje stevigheid. Echter is de binnenkant van de streep nog zacht na 6 uur. Bij het mengsel met 35,7 procent zaagsel is de buitenkant niet meer plakkerig en droog, maar de hele streep is nog zacht doordat de binnenkant nog niet droog is.

Foto's: 12-5 11:45, 12-5 11:55, 12-5 14:20, 0483, 0486.

Bij deze eerste test is bepaald hoeveel zaagsel geschikt is voor een goede menging en extrusie. Met het bepaalde aantal volumeprocent zaagsel worden de testen met alle lijmen gedaan. Deze gaan als volgt:

Schatting benodigd volume:

-	Bewerkingsstuk	50 mL		
-	Spuitmond	10 mL		
-	Spuitkoker	5 mL		
-	Mengbeker	10 mL		
-	Streep 5mm	1.96 mL		
-	Streep 10 mm	7.85 mL		
-	Streep 13 mm	17.5 mL		
-	Lange streep	22.97 mL		
-	Stapel strepen	21.20 mL		
-	<b>Totaal</b>	<b>146.48 mL</b>	<b>-&gt;</b>	<b>150 mL totaal volume per lijm verbruik</b>

Naar aanleiding van de resultaten van de proeftest is besloten om van elke lijm een mengsel met 50 volumeprocent zaagsel en 50 volumeprocent lijm te maken. Er is aangenomen dat er per lijm een verbruik is van 200 mL, waarvan 100 mL zaagsel en 100 mL lijm. Omdat door de proeftest voor behanglijm al resultaten bekend zijn, wordt er een schatting gemaakt dat 40 volumeprocent zaagsel een beter resultaat geeft bij die lijm.

Tijdens het testen is gebleken dat een 50/50 volumeverhouding niet haalbaar was bij elke lijm, voornamelijk door de viscositeit van de lijm, de volgende waarden zijn uiteindelijk gebruikt in de test.

•	Contactlijm	100 mL zaagsel	100 mL lijm	50% zaagsel
•	Polyesterplamuur	75 mL zaagsel	100 mL lijm	3,5 gr. Verharder 42,9%
•	Behanglijm	80 mL zaagsel	6 gr. poeder	114 mL water 40%
•	Muurvuller	70 mL zaagsel	66 mL poeder	50 mL water 37,6%
•	Allesvuller	100 mL zaagsel	50 mL poeder	100 mL water 40%

## Vorbereiding

1. Zeef een bak vol zaagsel.
2. Zet op 10 kunststof koffiebekertjes een streep bij een vulling van 50 mL.
3. Zet op 10 mengbekers een streep bij een vulling van 100mL, zoals hierboven bepaald.
4. Zet op 10 spuitmonden een markeringsstreep bij 90, 55 en 29 mm, vanuit de schroefkant gemeten. Dat maakt de juiste diameters voor het extruderen, namelijk 13, 10 en 5 mm.
5. Snijd de spuitmond af bij de eerste markering vanuit de spuitkant.
6. Zet de spuitmonden op de kitkokers.
7. Zet klaar:

- a. Ondergrond van karton, krant of stucpapier.
- b. De 10 mengbekers met daarbij: een roerstokje, de ingrediënten voor de lijmengsels, kitkoker.
- c. Een Stanley mes om de spuitmond af te snijden.
- d. Een stukje rondhout om de doppen weer uit de kitkokers te drukken.
- e. De plank om de strepen op te leggen.
- f. De koffiebekertjes om te vullen.
- g. Zorg voor een plek waar smerige delen neergelegd kunnen worden.
- h. Een aantekeningenboekje met schrijfgerei.
- i. Het fototoestel.

### Testwijze

1. Vul het mengbakje tot de streep met lijm, voeg eventueel water toe zoals aangegeven op de verpakking.
2. Vul aan met het zaagsel dat bij die lijm staat.
3. Voeg een eventuele verharder toe.
4. Meng goed.
5. Vul de kitkoker bij de lijm, doe de dop erop en zet in de kitspuit.
6. Zet de 5 mm streep op de plank.
7. Snijd de spuitmond af bij de tweede markering.
8. Zet de 10 mm streep op de plank naast de eerste.
9. Snijd de spuitmond af bij de derde markering.
10. Zet de 13 mm streep op de plank naast de tweede.
11. Zet een 13 cm lange streep op de plek voor de stapeltest.
12. Zet direct een streep van 3 cm bovenop de lange streep.
  - a. Voor het polyesterplamuur, houdt aan: direct, 1 minuut, 5 minuten.
13. Vul het kunststof koffiebekertje met het mengsel tot de markering.
14. Schrijf te tijd op, maak foto's en beschrijf belangrijke eigenschappen die zojuist zijn ondervonden.
15. Start dezelfde procedure met de volgende lijmsoort.
16. Zet na 15 minuten een tweede streep van 3 cm bovenop de lange streep.
17. Snij een stukje van 5, 10 en 13 mm strepen, maak een foto en beschrijf de doorharding.
18. Zet na 30 minuten een derde streep van 3 cm bovenop de lange streep
19. Snij een stukje van 5, 10 en 13 mm strepen, maak een foto en beschrijf de doorharding.
20. Verwijder de koker uit de kitspuit.
21. Druk zo mogelijk de dop uit de kitkoker.
22. Herhaal regelmatig: Snij een stukje van 5, 10 en 13 mm strepen, maak een foto en beschrijf de doorharding en andere eigenschappen.

### Waarnemingen

Lijm	Tijd	Foto's	Beschrijving
Proeftest	13-5 11:21	494-498	Het 50/50 mengsel is volledig uitgehard. Bij het 35,7% mengsel is de binnenkant zacht.
Contact	11:35	499-502	Direct, niet volledig egaal gemengd, viscositeit is prima voor extrusie, plakkerig bij afbreken van de streep.
Contact	11:43	503-505	Direct stapelen blijft goed liggen, Buitenste laag is hard, de strepen zijn beweegbaar doordat de binnenkant nog zacht is.
Poly	12:07	509-510	Direct. Is al een pasta dus zeer lastig hout mengen. Kan niet al het hout gebruiken. Wordt heel snel hard. Een deel niet kunnen extruderen.
Poly	12:10	511/515	Binnenkant hard net zo snel uit als de buitenkant. Goede dikke pasta om te extruderen.
Contact	12:10	512-514	Buitenlaag iets verder gedroogd, heel trekkerig materiaal, Binnenkant nog vochtig bij 10 en 13 mm. 5 mm is bijna doorgehard.
Poly	12:18		Gedraagt zich als een hele dikke klei, het is te snijden met veel kracht.
Proeftest	12:24	518-521	Streep 5mm is helemaal droog, streep 10mm is bijna droog, nog 2mm <sup>2</sup> is vochtig, 13mm is nog zeer vochtig binnen.
Behang	12:37		Direct. Breekt redelijk snel af, viscositeit is goed, makkelijk te extruderen, glad oppervlak van de streep. Direct te stapelen.
	12:46		Tweede stapelstreep aangebracht.
Muur	12:54	530-537	Direct. Direct naar lager percentage zaagsel gegaan door de viscositeit. Percentage zaagsel 37,6%. Direct te stapelen. Bij 5mm schiet het eerst eruit na korte drukopbouw, daarna gaat het verder

			goed, ook bij de andere diameters. Mogelijk een blokkering door stukje hout. Het water wordt er een beetje uitgeperst, mogelijk een betere menging voorkomt dat.
Alles	13:00	-	Direct. Droogt uit zodra er veel zaagsel toegevoegd word. Zeer bros mengsel. Niet extrudeerbaar. Probeer opnieuw met meer water.
Alles	13:20		100mL water 100 mL zaagsel 50 mL poeder. Nog steeds niet te extruderen, het water (met hars) wordt eruit geperst. Stuk uit de koker gehaald en met de hand een streep en stapel gemaakt. Kokervorm is stabiel, maar breekt snel.
Behang	13:25		Derde stapelstreep aangebracht, zeer trekkerige huid.
Contact	13:30		5mm streep is helemaal doorgehard. 10 mm streep is binnenin nog vochtig. 13 mm streep is binnenin nog nat.
Poly			Niet door te komen met een mes, gedraagt zich als bijna uitgeharde klei.
Behag			Helemaal vochtig, heel klein beetje plakkerig, zeer beweegbaar.
Muur			Beetje vochtig, klein beetje plakkerig, snijd/breekt makkelijk, redelijk consistente doorharding, iets zachter bij de 13 mm streep.
Alles	14:21		Breekt gemakkelijk in stukjes, bind niet goed, plakt een beetje. Ook een beetje vochtig.
Contact	16:45	566-573	Erg vezelig, 5 en 10 mm zijn doorgedroogd, 13 mm alleen nog in het midden-onder vochtig, bijna droog. Het materiaal is veerkrachtig, waarschijnlijk doordat er lucht in is opgesloten.
		576-577	Redelijk goed stapelbaar, als het maar genoeg hout bevat en goed gemengd is, anders loopt het uit.
Poly	16:45	574-575	Heel hard (doch niet zoals steen). Kan er bijna niet in snijden, volledig doorgehard.
		578-580	Stapelbaarheid niet kunnen testen, maar in vergelijking met de andere moet die zeer goed zijn, goede viscositeit.
Behang	16:50	581-583	Plakt niet, binnenkant is helemaal zacht. Redelijk goed stapelbaar, zeer weinig (niet) ingezakt.
Muur	17:05	584-587	Buitenkant hard, doch redelijk snijbaar, binnenkant redelijk hard, doch niet droog, vochtig dat langzaam moet uittrekken. Stapelbaarheid is goed.
Alles	17:15	588-593	Breekt snel, heel vezelig, niet snijbaar, weinig binding. Mogelijk te veel zaagsel gebruikt. Stapelbaarheid is goed. Semi-natuurlijk uiterlijk.
Proeftest	17:30	594-596	Van 10mm 35,7% zaagsel is 2mm rondom droog, binnenin a diameter 4mm is nog nat. 50/50 is helemaal droog. Goed vezelig, misschien beetje ruw, maar voelt wel natuurlijk aan.
Contact	19:30	603-604	Alles is helemaal doorgedroogd. Door de vezels een goede hechtig, doorsnijden alsof een touw wordt gesneden, blijft elastisch.
Poly	19:30	607	Gewoon zeer hard, vergelijkbaar met hardhout. Geen verandering. Weinig vezels aanwezig, als gevolg van het niet kunnen mengen.
Muur	19:30	605-606	Heel hard, vezels werken als vezelversterking, minder bros dan gips bijvoorbeeld.
Alles	19:30	597-599	Lijkt nog een beetje vochtig, nog steeds vrij bros. Laagjes zijn zeer gemakkelijk van elkaar te verwijderen, bijna geen kracht nodig.
Behang	19:30	601-602	Buitenkant heel zichtbaar aan het drogen, doch binnenin en tegen het oppervlakt van de plank nog zeer zacht, dat geldt ook voor de 5mm streep. Bovenste stapellaagjes drogen sneller dan de onderste.
Proeftest	19:30	608/609	35.7% streep nog steeds niet droog binnenin.
Alle lijmen	18-5 17:15		Alle lijmen zijn uitgehard en redelijk sterk. Behanglijm en contactlijm zakken na langere tijd in, waarschijnlijk door verdamping van het water of oplosmiddel, met veel vaste vulling (zaagsel) is dat te beperken. Een vullende lijm op basis van hars krimpt niet (zo erg).
Contact	17:15		Contactlijm heeft nog een beetje veerkracht, maar minder dan verwacht. Weinig lijm en veel zaagsel te zien. Uiterlijk van luchtig mdf.
Behang			Sterker dan verwacht. Onderste laag is ingezakt. Uiterlijk van luchtig mdf.
Poly			Sterk, maar weinig zaagsel te zien. Lijkt geschikt om iets groots van te bouwen.
Muur			Sterk, is wel een beetje bros. Lijkt op gips. Weinig zaagsel te zien.
Alles			Heel bros. Beetje veerkracht. Lijkt op papierpulp.

De bekertests:			
Behang	13-5 19:30		Nat binnenin.
Contact en allesvuller			Vochtig binnenin, droog bovenop.
Poly en muur			Droog en hard, muur mogelijk niet onderin droog.
Behang	18-5 17:15		Behanglijm is nog steeds vochtig en daardoor gaan schimmelen. Dus kan alleen in dunne lagen gebruikt worden of moet alle vocht goed kwijt kunnen.
Poly			Polyesterplamuur is 1 hard blok.
Contact			Contactlijm is redelijk sterk geworden.
Muur			Muurvuller is een hard blok dat op gips lijkt.
Alles			Allesvuller is aan de buitenkant nog verassend hard, alleen nog steeds heel erg breekbaar.

## Bewerkbaarheid

Na het drogen van de proefstukken in de bekertests is er een test gedaan waarin de verspanende bewerkbaarheid wordt getest. Bij deze test wordt het proefstuk met de hand geschuurd met korrels 80, 150, 240 en 400. Vervolgens wordt er een stukje afgezaagd met een fijn getande zaag (ijzerzaag). Als laatste wordt er een gat geboord van 10 mm.

## Resultaten

### Schuren

Het polyesterplamuur is eenvoudig te schuren met de grove korrel 80, het verwijderen van materiaal gaat ongeveer even snel als bij hout. Met korrel 400 is het oppervlak vrij glad te maken. Geen problemen en werkt uitstekend.

Bij het contactlijm-proefstuk schuurt het minder gemakkelijk op dan bij de polyesterplamuur. Dat komt doordat het zicht draagt alsof er tussen het hout rubber zit. Met grove korrels gaat het prima, maar fijn schuurt hooguit het rubber glad. Opvallend is dat het schuurpapier niet verzadigd raakt.

Het proefstuk van de muurvuller schuurt heel gemakkelijk door de brosse, fijne en harde structuur. Met fijn schuren kom je niet in de buurt van de oppervlaktekwaliteit dat ontstaan is bij het gieten in de kunststof beker. De houtvezels worden zichtbaar door het schuren.

### Zagen

Polyesterplamuur is vrij gemakkelijk te zagen, ondanks de hoge dichtheid. De snelheid van verspanen is gelijk aan die van hout. Het resultaat geeft duidelijk de zaagbewegingen weer.

Het contactlijm mengsel zaagt als taai hout, maar toch gaat de zaag er snel doorheen. Dat komt waarschijnlijk door de lage dichtheid, er zit veel lucht in dit proefstuk. Zaagbewegingen zijn te zien en dat heeft het oppervlak dichtgedrukt.

De muurvuller is zeer gemakkelijk te zagen, waarschijnlijk vergelijkbaar met gips. Dat heeft weer te maken met de structuur van het materiaal. Zaagbewegingen zijn te zien, maar ook zeer gemakkelijk weg te schuren.

### Boren

Het boren van het materiaal gaat bij alle proefstukken zeer gemakkelijk. Er zit wel enig verschil tussen de materialen. Het polyesterplamuur is een kunststof-achtig en maakt grotere en taaiere spanen. Daardoor is het belangrijk dat die vaker dan bij de andere materialen afgevoerd worden. Het polyesterplamuur en de muurvuller zijn breekbaarder dan de contactlijm. Bij de eerste twee breken aan de rand van het boorgat kleine stukjes materiaal af, terwijl bij de contactlijm de stukjes juist blijven hangen.

### Algemeen

Bij het verspanend bewerken van deze drie proefstukken komt vanzelfsprekend stof vrij. Omdat er (gevaarlijke) chemische stoffen zijn gebruikt om de stukken te binden is het af te raden deze stof in te ademen. Vooral bij het bewerken van het polyesterplamuur komt de typische geur weer vrij. Ook contactlijm laat de typische geur vrij maar in mindere mate. De muurvuller is geurloos, maar kan stoffig zijn.

Verspanende bewerkingen zijn geen probleem voor deze materialen.

## Conclusies

Behanglijm heeft met 40 volumeprocent zaagsel een goede viscositeit om te extruderen. Het resultaat heeft een ruwheid die geschikt is voor grove bouw van producten ter grootte van meubelstukken. Met nabewerken, zoals schuren, is een met geschuurd hout vergelijkbaar oppervlak haalbaar. Het droge resultaat heeft een houten uitstraling zoals bij spaanplaat. Een nadeel van behanglijm is de zeer lange uithardingstijd, een streep van 13 mm is na 24 uur nog niet volledig doorgehard. De oppervlakte heeft wel al een basissterkte na ongeveer 2-3 uur. De stapelbaarheid van het behanglijmmengsel is redelijk. De onderste laag zakt mogelijk iets in door het gewicht, maar de lagen blijven goed boven elkaar staan. Waarschijnlijk is het niet mogelijk, zonder vervorming te veroorzaken, om een derde laag aan te brengen op de eerste twee voordat die minimaal 6 uur drogingstijd hebben gehad. Na vier dagen lijkt de behanglijm ingezakt, mogelijk door verdamping van het water. De bekertest is nog steeds nat en is daardoor gaan schimmelen. Dus alleen te gebruiken als het vocht gemakkelijk kan verdampen.

Contactlijm kon niet volledig egaal gemengd worden doordat het mengbakje oploste. Daardoor heeft het verschillen in 'natheid' en vezelverzadiging. Dat beïnvloedde ook direct de stapelbaarheid, het eerste deel was goed gemengd en bleef mooi op de eerste laag liggen. Het tweede deel was echter vrij vochtig en droop van de eerste laag af. De stapelbaarheid is redelijk goed, mits er genoeg zaagsel door de lijm is gemengd. De contactlijm was een van de meest laagviscose lijmen, mogelijk is de verhouding zaagsel op te hogen naar 60 volumeprocent. Dat zal mogelijk ook de eigenschappen: droogtijd, uitstraling, sterkte en stapelbaarheid positief beïnvloeden. Het extruderen ging gemakkelijk, vergelijkbaar met het behanglijmmengsel. De drogingstijd is snel, ongeveer 10 minuten, voor de buitenste laag, echter doordat de binnenkant nog zacht is, is de streep nog te bewegen. Na 30 minuten is 5mm bijna doorgehard, na 5 uur is de 10 mm doorgehard en na 8 uur is de 13 mm helemaal doorgehard. De contactlijm plakt heel erg, dat maakt het lastig een net eind aan een streep te maken, het wordt meegetrokken met de spuitmond. Verder is de lijm ook draderig/trekkerig, samen met het zaagsel maakt dat een zeer vezelig materiaal dat een beetje flexibel is. Nabewerking kan daardoor lastig worden en is het mogelijk niet sterk genoeg voor een meubel. Door een groenige gloed van de lijm is de uitstraling alsof er een chemisch laagje overheen zit. Na vier dagen lijkt de contactlijm ingezakt, mogelijk door verdamping van het oplosmiddel.

Polyesterplamuur is lastig te verwerken met de hand. Ten eerste was de plamuur al een pasta, zaagsel daar doorheen mengen maakt het nog dikker en dit was dus niet volledig mogelijk. Na toevoeging van de verharder is de verwerkingstijd nog maar 5 minuten, het was daarom niet mogelijk alles te extruderen. Daardoor is het niet gelukt de stapeltest te doen. Echter is de pasta hoogvisceus en dat maakt het zeer standvastig, het zakt niet in. In vergelijking met de andere lijmen zou de polyesterplamuur prima stapelbaar moeten zijn en zijn vorm behouden. Het extruderen vergt veel kracht, maar gaat wel soepel door de homogeniteit van het mengsel. Dat laatste is gedeeltelijk te wijten aan het te weinig toegevoegde zaagsel. Bij de chemische reactie komt warmte vrij, dit is echter alleen te voelen bij uitharding van volumes groter dan 2cm<sup>3</sup>. Het resultaat is erg hard, vergelijkbaar met bijna uitgeharde klei, niet zo bros als cement. Zeer goed mogelijk een materiaal voor een groot meubel. Het oppervlak is al glad, maar mogelijk ook nog na te schuren. Na vier dagen nog exact hetzelfde harde blok in de bekertest.

Muurvuller had ook een probleem met de viscositeit tijdens het toevoegen van het zaagsel. Volgens het originele recept werd het vrij dik, er is overgestapt naar een mengsel met tussen ~15-25% zaagsel. De spuit schoot een stuk van 8 cm uit na een tijdje drukopbouw bij het extruderen van de 5mm streep, mogelijk door een opstopping. Daarna ging het extruderen goed en soepel. Hier en daar werd wel meer vocht geëxtrudeerd, mogelijk is dat te voorkomen door beter te mengen. Het resultaat van dit mengsel is redelijk glad, vergelijkbaar met gips. De uitharding gaat gestaag, na 4 uur is het al vrij hard, de buitenkant is droog en het is nog wel snijbaar. Na 6,5 uur is het volledig uitgehard, vergelijkbaar met gips, iets harder en minder bros. Het heeft ook de uitstraling van gips. Het zaagsel heeft een vezelversterkte werking voor de muurvuller, ondanks dat er niet veel in verwerkt is. Oppervlaktenabewerking is waarschijnlijk goed te doen met een schuurmachine. De stapelbaarheid is redelijk, met meer zaagsel zou het mengsel een hogere viscositeit hebben en direct zijn vorm vasthouden. Na vier dagen lijkt het blok in de bekertest op gips en is het resultaat hard en een beetje bros.

Allesvuller aanmaken ging volgens het recept prima. Echter door het toevoegen van alle zaagsel droogde het mengsel uit en werd het een brosse, droge klont. Dit was niet extrudeerbaar en is opnieuw gemaakt met meer water. Dat leek van betere viscositeit voor de kitspuit. Echter, was het niet te extruderen. De vocht werd uit het mengsel gedrukt, waarschijnlijk met de bindende hars vanwege de gelige kleur. Maar het zaagsel en andere vaste delen konden niet geëxtrudeerd worden. Daarop is het mengsel uit de koker gehaald en zijn er met de hand strepen mee gekleid. Dit mengsel is nat en na droging erg bros. Het valt snel uit elkaar en mist vooral een bindmiddel, mogelijk op te lossen door het deel poeder te vergroten. Na 6,5 uur drogen lijkt het mengsel nog een beetje vochtig en het is het nog steeds vrij bros. De stapelbaarheid is redelijk, het houdt de vorm goed vast, maar de lagen hechten niet aan elkaar en zijn met zeer weinig kracht van elkaar te halen. De uitstraling is als zaagsel gemengd met een beetje cement en water. In deze vorm is nabewerken niet uit te voeren. Na vier dagen is het nog steeds heel bros. Het blok in de bekertest heeft echter een harde buitenkant, maar is toch gemakkelijk te breken.



## Algemene aanbevelingen

Er is niet meer dan 50 volumeprocent zaagsel toegevoegd, een hogere verhouding was niet mogelijk doordat de viscositeit te hoog werd. De oplossing is een laagvisceuze lijm, dan is de basisviscositeit lager kan er meer zaagsel gemengd worden. Het zaagsel geeft ook de stevigheid en stijft het mengsel op tot een pasta zodat de vorm kan worden behouden bij het stapelen. Een plakkerige lijm kan helpen bij die vorm houden en de hechting tussen lagen verbeteren doordat het goed bind.

Met fijner zaagsel is het mogelijk het lijmverbruik te verminderen. De ruimte tussen de korrels wordt gevuld met lijm, bij kleinere korrels is die tussenruimte kleiner en zal dus ook minder lijm nodig zijn om de korrels aan elkaar te plakken. Echter bij het grove zaagsel zal de vezelversterking een positieve invloed hebben op het materiaal.

Polyesterhars is een zeer goed materiaal, wordt snel hard, is zeer sterk. Echter is een laagvisceuze variant nodig om een goed mengsel te maken, weinig lijm te gebruiken en gemakkelijk te extruderen. Alleen op het laatste moment de harder toevoegen en goed mengen is dan een laatste probleem. Een goede optie voor de 3D printer.

Behanglijm en contactlijm lijken na volledige droging een beetje ingezakt. Beide verliezen massa en volume doordat het water of oplosmiddel verdampt. Het gevolg is krimp, verlies sterkte en een luchtig materiaal. Dat laatste zorgt ervoor dat het veerkrachtig is. Geen goed materiaal voor een meubel.

Muurvuller was redelijk sterk, maar ook bros. Er kon maar weinig zaagsel toegevoegd worden. Voor dit onderzoek niet voldoende om verder mee te werken.

Allesvuller is volledig bros en kan niet veel zaagsel toegevoegd krijgen. Geen goed materiaal.

Belangrijke voordelen van elke lijm zijn:

- Contactlijm is plakkerig, dat hecht snel, maar het mag niet te veel plakken tegen lelijke streepeinden bij de extrusie.
- Behanglijm heeft een viscositeit die gemakkelijk te extruderen is en heeft vooral een natuurlijke uitstraling. Om schimmel te voorkomen moet het zijn vocht gemakkelijk kwijt kunnen.
- Polyesterplamuur heeft de juiste materiaaleigenschappen om mee te bouwen; sterk, maar is mogelijk te snel hard.
- Muurvuller maakt goed gebruik van de vezelversterking, hecht goed en op polyesterplamuur na het sterkste materiaal.
- Allesvuller had door de cementbasis en harsbinder goede eigenschappen kunnen hebben, maar heeft dat in deze test niet laten blijken, erg bros en zwak.

Lijm:	Muurvuller, Alabastine	Behangplaksel, Base Line	Contactlijm, Bison Kit	Polyesterplamuur, Soriso	Allesvuller, Alabastine
<b>Op basis van:</b>	cellulose	cellulose / zetmeel	oplosmiddel	2-comp. Polyesterhars + verharder	cement, kunstharsgebonden
<b>Uithardings-principe:</b>	vochtdispersie	vochtdispersie	verdamping oplosmiddel	chemische reactie	vochttopname/-dispersie
<b>Uithardings-tijd</b>	Rand: 4 u Volledig: 6,5 u	Rand: 3 u Volledig: 48 u	Rand: 10 min. Volledig: 8 u	Rand: 5 min. Volledig: 90 min.	Rand: 6,5 u Volledig: 24 u
<b>Stapelbaarheid</b>	Zeer goed	Goed	Goed	Geen resultaat; verwachting: zeer goed	Matig
<b>Bewerkbaarheid</b>	Goed	Goed	Goed	Goed	Slecht
<b>Vormvastheid</b>	Vormvast	Zakt in door verdamping water	Zakt in door verdamping oplosmiddel	Vormvast	Redelijk vormvast
<b>Extrudeerbaarheid</b>	Lastig extrudeerbaar	Extrudeerbaar	Lastig extrudeerbaar	Extrudeerbaar	Niet extrudeerbaar
<b>Sterkte</b>	Goed	Gemiddeld	Gemiddeld	Zeer goed	Slecht
<b>Percentage zaagsel (vol.)</b>	15-25%	40%	50%	~<10%	40%

- *Experiment 2 – Controleren eigenschappen van polyurethaan-giethars met zaagsel mengsel*

## Testen die kunnen worden uitgevoerd

### Inleiding

Het polyurethaan giethars zal moeten worden getest op eigenschappen en de geschiktheid voor de 3D printer. Tevens kan het uitwijzen of er toch een ander materiaal gekozen moet worden voor het eindproduct. Om de materiaalsamenstelling en geschiktheid voor het 3D printen te testen zijn de volgende experimenten bedacht:

- Percentage zaagsel: Voeg verschillende hoeveelheden zaagsel toe en bekijk wat de verschillen zijn.
- Grofheid zaagsel: Voeg verschillende grofheden zaagsel toe en bekijk wat de verschillen zijn.
- Vervorming: Een blokje wordt opgebouwd en direct worden de dimensies opgemeten, het meten wordt herhaald na het uitharden en de resultaten worden vergeleken.
- Stapelbaarheid: Er wordt met meerdere laagjes een muurtje gebouwd, resultaten als inzakken, omvallen en uitlopen zijn van belang. Voor de problemen en dingen die goed lopen wordt een oorzaak gezocht en oplossing beschreven. (Deze test kan gedaan worden met een verschillende periode tussen de laagjes.)

Doordat er maar een liter giethars beschikbaar is worden de eerste testen met kleine spuitjes van 10 mL gedaan. De spuitmond wordt uitgeboord zodat er een vergelijkbare opening van 13 mm meter wordt verkregen. De diameter van de spuiten is ongeveer 15 mm, daardoor ontstaat er bij het boren een klein randje. Bij een tweede spuit wordt de gehele spuitmond weggeschuurd, waardoor er geen randje meer is en de volledige cilindervorm uit de spuit geëxtrudeerd kan worden.

De strepen worden gemaakt in een hoek van ongeveer 45 graden. En zoals de 3D printer dat zal doen. De 3D printer spuit loodrecht op het oppervlak en meer materiaal dan het oppervlak waar het overheen gaat. Het wordt daardoor tussen de spuitmond en het oppervlak geperst. Daardoor ontstaat een bredere baan, dat voor meer steun zorgt, en de druk zorgt voor een betere hechting tussen de oppervlakken.

Om de resultaten van het experiment nauwkeuriger te maken dan bij het eerste experiment worden bij deze experimenten gewichtsdelen gebruikt in plaats van volumedelen.

### Benodigdheden

- Zaagsel (3 grofheden)
- Twee componenten giethars
- Mengbekers
- Weegschaal
- Roerstokjes
- Plank
- Spuiten 10 mL
- Lege kitkokers
- Kitpistool
- Stanley mes
- Kleine zaag
- Aantekeningenboekje met schrijfgerei
- Stucpapier, karton of kranten
- Watervaste stift
- Fototoestel

### Werkwijze

#### *Experiment 2.1 – Percentage zaagsel*

- Zet klaar:
  - 8x 10 gram A component en 8,3 gram B component giethars
  - 8 maal een bakje zaagsel, met inhoud: 1.83 gr., 3.66 gr., 2x 7.32gr., 5.49 gr., 2x 9.15., 12.81 gr. De verhoudingen zijn op gewicht: 9,1%; 16,7%; 23,1%; 28,6%; 33,3% en 41,2% zaagsel.
  - Kleine spuiten 10 mL met een aangepaste spuitmond van 13 mm.
  - Een roerhoutje.
  - Een mengbakje.

- Een plank.
- Doe dit een voor een:
  - Doe een de harscomponenten bij elkaar, meng totdat een egale kleur is ontstaan.
  - Doe een bakje zaagsel bij de hars en meng tot een homogene massa is ontstaan.
  - Doe het mengsel in de spuit.
  - Spuit een streep van 10 cm op de plank.
  - Beschrijf hoe het mengen en deponeren ging. Hoe het materiaal er uit ziet en of het consistent is. Maak ook foto's.
  - Herhaal voor elke verhouding.

*Experiment 2.2 – Grofheid zaagsel (Niet uitgevoerd!)*

- Zet klaar:
  - 3x 10 gram A component en 8,3 gram B component giethars.
  - 3 maal een bakje zaagsel, met inhoud: 6.405 gr. Waarvan 1 met fijn zaagsel, 1 met middelgrof zaagsel en 1 met grof zaagsel. De verhouding is dan 25,9% zaagsel op gewicht.
  - Kleine spuiten 10 mL met een aangepaste spuitmond van 13 mm.
  - Een roerhoutje.
  - Een mengbakje.
  - Een plank.
- Doe dit een voor een:
  - Doe een de harscomponenten bij elkaar, totdat een egale kleur is ontstaan.
  - Doe een bakje zaagsel bij de hars en meng tot een homogene massa is ontstaan.
  - Doe het mengsel in de spuit.
  - Spuit een streep van 10 cm op de plank.
  - Beschrijf hoe het mengen en deponeren ging. Hoe het materiaal er uit ziet en of het consistent is. Maak ook foto's.
  - Herhaal voor elke verhouding.

*Experiment 2.3 – Stapelbaarheid (Niet uitgevoerd!)*

- Zet klaar:
  - 150mL lijm, let op de verhouding a en b component, zet deze apart van elkaar. Max. 310 mL in de kitkoker, let op hoeveelheid zaagsel.
  - Een bakje zaagsel, met het hiervoor gekozen zaagsel. Max. 310 mL in de kitkoker, let op hoeveelheid zaagsel.
  - Een lege kitkoker, met spuitdop van 13 mm en plunjer.
  - Het kitpistool.
  - Een roerhoutje.
  - Een lepel.
  - Een plank.
- Doe dit een voor een:
  - Doe een bakje zaagsel bij de hars en meng goed.
  - Doe vervolgens de harder erbij en roer een minuut heel goed. Schrijf de tijd op.
  - Doe het mengsel in de kitkoker.
  - Doe de kitkoker in de kitspuit.
  - Spuit een streep van 15 cm.
  - Spuit bovenop de vorige streep nog een streep van dezelfde lengte, doe dit vijf maal.
  - Herhaal de vorig twee stappen totdat de spuit leeg is, schrijf de tijd op.
  - Beschrijf hoe het mengen en deponeren ging. Hoe het materiaal er uit ziet en of het consistent is. Maak ook foto's. (Gebruik de kopjes: Nr. muur, Tijd, foto's en beschrijving).
  - Na drogen, zaag een deel door of zaag een zijkant weg zodat de binnenkant zichtbaar is.
  - Beschrijf hoe de binnenkant er uit ziet, consistentie, bijzondere eigenschappen. Maak foto's.

## Resultaten

De mengsels met 9,1%, 16,7% en 23,1% zaagsel werden geëxtrudeerd onder een hoek van ~45 graden. De spuitmond had een randje door de spuitmondgrootte van 13 mm. De mengsels extrudeerden redelijk gemakkelijk. Het bleek dat de mengsels met meer dan 23,1% zaagsel niet geëxtrudeerd konden worden, die liepen vast tegen het randje. Daarom zijn de mengsels met 28,6 en 33,3% zaagsel via de achterkant uit de spuit gehaald en in die vorm aangebracht. Doordat ze al geperst waren behouden ze heel goed de cilindervorm van de spuit.

De mengsels met 9,1 en 16,7% zaagsel extruderen zeer gemakkelijk. De hoeveelheid vloeistof is daarvan de oorzaak. Het zaagsel kan die hoeveelheid vloeistof niet vasthouden en direct na het extruderen begint de vloeistof uit de strepen te lopen. Voornamelijk bij het mengsel met 9,1% zaagsel is de hoeveelheid uitgelopen vloeistof onacceptabel en kan dus niet gebruikt worden in de 3D printer. Ook is te zien dat de strepen daardoor inzakken en niet vormvast zijn. De streep met 23,1% zaagsel verliest niet het bindmiddel en behoudt zijn vorm. Door de variabele spuitdruk wordt hier en daar meer vloeistof uit het zaagsel geperst en dat loopt wel uit. Dit mengsel extrudeert moeilijker en heeft last van opstoppingen. Doordat het mengsel nog wel te extruderen is en het bindmiddel vastgehouden wordt en de streep vormvast is, is dit een kandidaat om verder mee te experimenteren. Bij elk mengsel wordt onder druk wordt het bindmiddel een beetje tussen de zaagselvezels uit geperst.

Om hogere percentages zaagsel te testen is de spuit zonder randje gebruikt. Van percentages 23,1, 33,3 en 41,2% zijn mengsels gemaakt. Na het vullen werd de inhoud eerst samengedrukt om een perskracht te simuleren. Daarna werd met elk mengsel twee strepen getrokken, een onder een hoek van 90 graden en een onder een hoek van ~30 graden met het oppervlak.

Bij het extruderen van de mengsels met hogere percentages zaagsel is duidelijk te zien dat de richting van het extruderen invloed heeft op de kwaliteit van de gelegde streep. Als de richting van het extruderen nagenoeg horizontaal is blijft de streep heel. Het breekt niet en het oppervlak blijft mooi glad. Zodra grotere hoeken worden gekozen gaat de streep breken doordat de vaste massa niet vloeibaar genoeg is om een bocht te kunnen maken. Bij een hoek van 90 graden zorgt de verplaatsing van de spuitmond voor een afschuivende werking in het materiaal. Het materiaal dat op het oppervlak wordt geperst blijft staan en dat laagje breekt af van het geëxtrudeerde deel. Dat proces herhaalt zich, zodat een grof, gebroken en uit laagjes bestaande streep ontstaat.

Bij meer lijm heeft de streep een hogere dichtheid van vloeistof, maar de kwaliteit van de streep lijkt daardoor niet beter te worden.

Bij het uitvoeren van deze testen is opgevallen dat het zaagselmengsel snel achter een randje vast kan gaan zitten. Het is van belang de spuitmond dus geen plotselinge vernauwingen bevat. Om deze eigenschap te controleren is er een test gedaan met zonnebloemolie in de grote kitspuit. Zonnebloemolie heeft een viscositeit die ongeveer gelijk (iets dunner) is met die van de giethars. De spuitmond van de kitspuit heeft ook een plotselinge vernauwing van 3 cm naar 13 mm. Het mengsel zonnebloemolie en zaagsel was dan ook niet met de kitspuit te verwerken. De olie werd tussen het zaagsel uit geperst en het zaagsel kwam niet uit de spuitmond. Met fijner zaagsel en met een roomspuit, die een taps toelopende spuitmond heeft, leek de test iets beter te gaan. De spuit liep na extrusie van een brokje van het mengsel vast.

## Conclusies

Als na droging de sterkte van de strepen met veel zaagsel voldoende is, geeft dat aan dat het bindmiddel sterk genoeg is en dat de eis van een hoog percentage zaagsel gehaald kan worden. Nadelen aan de combinatie bindmiddel en zaagsel die voor deze test gebruikt is zijn: Het mengsel breekt snel als het zacht is, het is geen nette hoog viskeuze streep met veel flexibiliteit en bij plotselinge verkleiningen in de extruder zet het zich vast en onder druk wordt het vloeibare bindmiddel tussen de vezels uit geperst.

Onder 23.1% loopt het bindmiddel uit de streep, ze zijn daardoor niet vormvast. Daarboven zijn de strepen vormvast en geschikt voor producten. Er kan met het hoogste percentage verder worden geëxperimenteerd om de maximale hoeveelheid zaagsel in de verhouding te verkrijgen.

Met de hogere percentages is ook geprobeerd eenmaal verticaal en eenmaal horizontaal te extruderen. Horizontaal worden de strepen nagenoeg perfecte cilinders. Verticaal worden de strepen grof en breekt de cilinder in plakjes om de bocht om te kunnen gaan.

Het is niet mogelijk om de hogere percentages te extruderen met de spuit met een randje. Enkele oplossingen worden geschikt geacht. Door fijner zaagsel te gebruiken zal het minder in elkaar grijpen en gemakkelijk langs elkaar schuiven, waardoor het sneller mee gaat met de binder. Door een hogere viscositeit binder te gebruiken wordt er meer kracht overgedragen aan de vezels van het zaagsel waardoor er een grotere kans is dat ze worden meegenomen door de binder. Een spuitmond die met een kleine hoek taps toe loopt creëert minder weerstand en oppervlakte waar het zaagsel zich op kan tegenhouden waardoor voor het samenpersen minder kracht nodig is.

## ○ Experiment 3 - Reproduceerbaarheid

### **Inleiding**

In de vorige test zijn een aantal strepen gemaakt met een verschillend percentage zaagsel. Daarmee kon bepaald worden dat een percentage van 70% zaagsel op gewicht de juiste eigenschappen bevat om een product uit op te bouwen. Het viel al wel op dat het zaagsel met die percentages lastig te extruderen is. Er zijn maar 1 of 2 strepen neergelegd van elk mengsel. Om er zeker van te zijn dat het succes geen eenmalige gebeurtenis is moet de reproduceerbaarheid getest worden. Daarom wordt er in deze test het mengsel weer aangemaakt en worden er meerdere strepen gelegd om te vergelijken of de eigenschappen verschillen met het vorige experiment.

Bij uitvoering van deze reproduceerbaarheidstest wordt eenmaal van het 70% mengsel een hoeveelheid aangemaakt dat ook gebruikt is in de vorige test. Eenmaal wordt er een dubbele hoeveelheid aangemaakt en er wordt nog een enkele hoeveelheid aangemaakt van het 50% mengsel.

Met deze mengsel worden strepen gemaakt die horizontaal en verticaal geëxtrudeerd zijn en worden enkele strepen bovenop elkaar gelegd om een inzicht te krijgen in de stapelbaarheid. Alle worden een beetje geperst voordat ze worden geëxtrudeerd.

### **Benodigheden**

Zie vorige test

### **Werkwijze**

Vergelijkbaar met de vorige test. De juiste hoeveelheden van de gietharscomponenten zijn gemengd, daarna is het zaagsel toegevoegd. Dat mengsel is geroerd totdat het een homogeen uiterlijk heeft. Daarna is het in een kleine spuit van 10 mL gebracht en even aangedrukt, zodat het op elkaar geperst is. De spuit is bij het extruderen nagenoeg horizontaal, verticaal en op 45 graden gehouden. Op deze manier is het verschil in de spuihoek te zien.

### **Resultaten**

Tijdens de procedure zijn geen verschillen opgemerkt met het vorige experiment. Ook de resultaten zijn nagenoeg gelijk. Alleen lijken de nieuwe strepen vaker te zijn 'gebroken'. Het mengsel breekt dan in radiale richting, zodat de streep in delen opbreekt. Het oppervlak van de streep krijgt daardoor groffe breekranden en is dus minder glad dan bij de vorige test. De oorzaak zou kunnen zijn dat het mengsel droger is dan bij de vorige test, er dan meer zaagsel toegevoegd. Extruderen met de spuit verticaal blijft lastig, het mengsel komt in een cilindervorm uit de spuit en breekt dan om te blijven liggen op het oppervlak. Er is daarin wel wat spelingsruimte met de snelheid van extruderen en de snelheid van de beweging van de spuit. Door meer te extruderen wordt het mengsel meer op het oppervlak geperst. Daardoor wordt de streep breder en vooral groffer, maar de dichtheid is wel hoger.

De strepen houden na extrusie bijna exact hun vorm, zelfs bij het stapelen is er met het blote oog geen verandering in de vorm te zien. De lagen hechten redelijk goed aan elkaar. De sterkte van die verbinding is voornamelijk afhankelijk van het contactoppervlak. De ronde vorm van de strepen hebben significant minder contactoppervlak dan platgedrukte strepen en hebben daarom minder sterke verbindingen.

### **Conclusie**

Geen significante verschillen met de vorige test. Ook onderling binnen deze test zijn de strepen nagenoeg gelijk. Dit mengsel en het resultaat is dus reproduceerbaar.

In volgende experimenten zou er meer geëxtrudeert moeten worden ten opzichte van de beweging van de spuit. Daardoor wordt het materiaal tegen het oppervlak aan geperst. Dat geeft een groffere streep, maar ook een hogere dichtheid en meer contactoppervlak voor het stapelen. De volgende laag drukt open delen dan weer dicht. Het probleem zit dan vooral in het uiterlijk aan de oppervlakte van het product.

## ○ Experiment 4 - Stapelbaarheid met extrusie kitkoker

### Inleiding

Het giethars met zaagsel mengsel dat 70% zaagsel bevat heeft zich in de vorige tests bewezen. Het uitgeharde resultaat is hard en belooft zeer goed te zijn voor produceerbare producten.

Voordat het zo ver is moet eerst de hoogte in gegaan worden. Kan dit mengsel bovenop elkaar geëxtrudeerd worden, zodat een muurtje ontstaat dat blijft staan. Om dat te testen is er een groter volume en reservoir nodig dan de kleine spuitjes met 10 mL materiaal. Daarom wordt teruggegrepen naar de kitspuit. Omdat het al bekend is dat het mengsel lastig te spuiten is, wordt er eerst een insert gemaakt die het mengsel van de brede koker naar de smalle spuitmond begeleid. De insert is gemaakt van hard schuim door middel van draaien. De vorm is hiernaast te zien in de afbeelding. Om de oppervlakte van het schuim glad te maken is er een dun laagje van de polyurethaan giethars aangebracht. Om hergebruik te kunnen garanderen is de oppervlakte daarna behandeld met een lossingsmiddel. Dat is ook getest op een teststrookje. Bij het teststrookje kwam echter niet alleen de gegoten laag los, maar ook de onderlaag die het materiaal glad maakte. Hierna is het experiment gestart.

### Benodigheden

Naast de standaard benodigheden voor de giethars en het mengen:

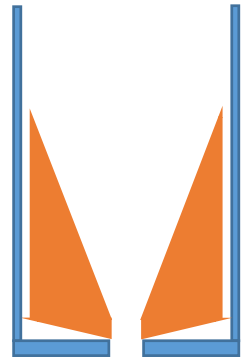
Kitkoker met 13mm spuitmond en plunjer

Kitpistool

Zelfgemaakte insert

Plankje

Rondhoutje



### Werkwijze

Eerst wordt het mengsel aangemaakt. De eerste twee maal een dubbele hoeveelheid: 20 gram A component, 16,6 gram B component en 25,62 gram zaagsel en de laatste keer een enkele hoeveelheid, de helft van de hiervoor genoemde waarden.

In de kitkoker wordt eerst de insert geplaatst en daarna wordt het gevuld met het mengsel. Nadat de plunjer is aangebracht wordt er druk opgebouwd. Het zaagsel wordt in elkaar geperst en heeft nog maar 1/3 van zijn originele volume. De druk wordt verhoogd voor het spuiten van het mengsel en er wordt gericht op de plank om een streep te maken.

### Resultaten

Er gebeurde niets. Na de verhoging van de druk is er niets uit de spuitmond gekomen. Het mengsel heeft zich vastgezet in de koker en de druk verhogen heeft geen effect. Het mengsel is via de achterkant van de koker weer er uit gehaald en hardt vanzelf uit.

Een oplossing is om het gat te vergroten waardoor het mengsel moet gaan. Daarop zijn de gaten van de kitkoker en de insert opgeboord van 10,4 mm naar 16 mm.

Opnieuw is de test gedaan en nogmaals zit het mengsel vast. De gaten zijn toen opgeboord naar 22 mm en de test is herhaald. Nog steeds geen beweging in het mengsel te krijgen zodra het opeen geperst is.

### Conclusie

Het blijkt niet mogelijk te zijn om het mengsel met een plunjer door een spuitmond heen te krijgen die kleiner is dan de cilinder van het reservoir. De interne afschuiving van het materiaal gaat richting 0. Dat maakt dat het materiaal niet wilt vloeien, zoals water of gesmolten kunststof. Een vergelijking zou kunnen zijn dat het zich gedraagt als nat zand.

Om het mengsel te kunnen spuiten is een andere manier van extruderen nodig.

De brokken die weer uit de kitkoker zijn gehaald zijn uitgehard en laten zien dat ook redelijke volumes door en door uitharden en dat ook daarvan de materiaaleigenschappen goed zijn. Er is hierbij wel te merken dat het een exotherme reactie betreft, de stukken voelen handwarm aan. Eventueel kan later hiermee een test gedaan worden dat zich richt op verspanend bewerken.

## ○ Experiment 5 – Hoge druk opbouw met vleesmolen

### **Inleiding**

In het vorige experiment is er geprobeerd met de hand een muurtje te maken door middel van extruderen met een kitspuit. Het extruderen wilde alleen niet lukken. Het mengsel van giethars en zaagsel vloeit nagenoeg niet en kan daarom niet door gaten heen gedrukt worden.

Er een andere manier van extruderen nodig. Het eerste idee is om een zelf een extruder te bouwen die direct op een 3D printmachine geplaatst kan worden. In verband met materiaalkosten en bouwtime is er voor een alternatief gekozen. Een vleesmolen heeft net zoals een extruder een schroef die het materiaal naar voren duwt en dan door een mal perst. In een plastificeermachine voor het spuitgieten werkt dat net zo en smelt het granulaat door de wrijving. De extruderschroeven kunnen dus vaste en vloeibare stoffen verwerken. Omdat het giethars-zaagsel mengsel daartussenin zit wordt verwacht dat een extrusieschroef ook dat mengsel kan verwerken. Door een vultrechter voor worst te monteren voor de vleesmolen kan een lange streep worden gemaakt.

### **Benodigheden**

Het giethars-zaagsel mengsel

De vleesmolen met schroef, nieuwe persplaat en de hendel.

Een plankje om te extruderen

### **Werkwijze**

Eerst wordt de opstelling klaargezet. De vleesmolen wordt aan de rand van de tafel bevestigd en de hendel, schroef, persplaat en vultrechter worden op hun plek gezet. Een plankje ervoor om de streep op te vangen. Het mengsel van giethars en zaagsel aangemaakt in de hoeveelheden: A: 30 gr., B: 34,9 gr. en Z: 38,43. Daarmee is er genoeg materiaal om de vleesmolen en de trechter te vullen. Vervolgens in de molen gestopt en er wordt doorgedraaid zodat de druk wordt opgebouwd en uiteindelijk een lange streep wordt geëxtrudeerd.

Als eerste wordt er normaal geëxtrudeerd zoals men dat met worstvullen doet. Daarbij zit de vultrechter op de molen. Om minder weerstand te bieden is de gatenschijf vervangen door een schijf die zo veel mogelijk ruimte biedt om het materiaal door te laten gaan. Het snijwiel wordt ook weggelaten om dezelfde reden en daarnaast heeft het geen toepassing bij het experiment.

Als het op deze manier lukt kan er een slangetje worden aangesloten, zodat daarmee bewegingen uitgevoerd kunnen worden die de 3D printer nabootsen. In latere stadia kan het slangetje in de 3D printer worden gezet en kan de aanvoer handmatig worden gedaan.

Als het op deze manier niet lukt zal het waarschijnlijk liggen aan de versmallingen in de vultrechter. Verder zit er nog een randje voor de gatenschijf waar materiaal in kan blijven hangen.

Om dat te verhelpen kunnen nieuwe trechters worden 3D geprint, een mondstuk moet worden gedraaid of met vacuümvormen kan een mondstuk worden gemaakt.

### **Resultaten**

De eerste poging van dit experiment is niet geslaagd. De schroef van de vleesmolen werkte perfect. Met licht aandrukken van het zaagsel pakte de schroef het op en transporteerde het naar de voorkant van de vleesmolen. Daar had het alle ruimte om door te schuiven. Het randje voor de nieuwe gatenschijf heeft weinig invloed. Het mengsel drukt al snel in de vultrechter. De vultrechter heeft twee maal een sterke vernauwing en op de eerste grote blijft het mengsel hangen. De druk kan dan nog flink worden opgebouwd, het wordt dan lastig om de hendel rond te draaien. Uiteindelijk scheurt de vultrechter open. De axiale druk is te hoog geweest.

De klonten die uit de vleesmolen komen zijn sterk geperst. De verwachting is dat die klonten heel sterk kunnen worden.

### **Conclusie**

Met de eerste poging van dit experiment is het weer duidelijk geworden dat het mengsel niet door een sterke vernauwing heen te persen. Waarschijnlijk kan het wel lukken als de vernauwing zich over een grotere lengte voordoet, waardoor het samenpersen meer geleidelijk gaat. Om dit te verbeteren kan een zelfontworpen mondstuk gemaakt worden zoals aangegeven in de inleiding of er wordt een mondstuk van een sterker materiaal aangekocht zoals van RVS.

O. – Aardgas en elektriciteit, gemiddelde prijzen van eindverbruikers

<b>Aardgas en elektriciteit, gemiddelde prijzen van eindverbruikers</b>				
		Onderwerpen	Aardgasprijs	Aardgasprijs
		Onderwerpen	Verbruiksklassen huishoudens	Verbruiksklassen huishoudens
		Onderwerpen	Minder dan 20 GJ	20 tot 200 GJ
Belastingen	Perioden	Prijscategorieën	euro per GJ	euro per GJ
Inclusief BTW en belastingen	2007	Transactieprijs	30,351	19,873
Inclusief BTW en belastingen	2008	Transactieprijs	29,835	20,195
Inclusief BTW en belastingen	2009	Transactieprijs	32,403	20,87
Inclusief BTW en belastingen	2013 4e kwartaal	Transactieprijs	34,179	22,075
Inclusief BTW en belastingen	2013	Transactieprijs	33,558	22,951
Inclusief BTW en belastingen	2014 1e kwartaal	Transactieprijs	28,521	21,429
Inclusief BTW en belastingen	2014 2e kwartaal	Transactieprijs	41,623	24,824
Inclusief BTW en belastingen	2014 3e kwartaal	Transactieprijs	55,935	27,613
Inclusief BTW en belastingen	2014 4e kwartaal*	Transactieprijs	29,743	21,683
Inclusief BTW en belastingen	2014*	Transactieprijs	32,592	22,456



<b>Aardgasprijs</b>	<b>Elektriciteitsprijs</b>	<b>Elektriciteitsprijs</b>	<b>Elektriciteitsprijs</b>
<b>Verbruiksklassen niet-huishoudens</b>	<b>Verbruiksklassen huishoudens</b>	<b>Verbruiksklassen niet-huishoudens</b>	<b>Verbruiksklassen niet-huishoudens</b>
<b>1 000 TJ en meer</b>	<b>2,5 tot 5 MWh</b>	<b>2 000 tot 20 000 MWh</b>	<b>150 000 MWh en meer</b>
<b>euro per GJ</b>	<b>euro per kWh</b>	<b>euro per kWh</b>	<b>euro per kWh</b>
8,046	0,175	0,105	0,075
9,541	0,178	0,108	0,084
7,152	0,193	0,119	0,083
9,596	0,203	0,1	0,077
9,623	0,192	0,103	0,08
9,652	0,187	0,12	0,084
7,784	0,176	0,109	0,081
6,768	0,173	0,102	0,078
8,273	0,175	0,102	0,085
8,151	0,177	0,108	0,081

