

2015•2016
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterproef

Ontwerp en bouw van een extruder voor filament voor 3D-printtoepassingen

Promotor :
Prof. dr. ir. Wim DEFERME

Copromotor :
ing. Glen VANDEVENNE

Promotor :
ing. YANNICK AERTS

Gerome Reynders

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

2015•2016

Faculteit Industriële

ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterproef

Ontwerp en bouw van een extruder voor filament voor
3D-printtoepassingen

Promotor :
Prof. dr. ir. Wim DEFERME

Copromotor :
ing. Glen VANDEVENNE

Promotor :
ing. YANNICK AERTS

Gerome Reynders

*Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële
wetenschappen: elektromechanica*

Woord vooraf

Deze masterproef dankt haar bestaan aan Ing. Yannick Aerts, een oud-student van de faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen te Diepenbeek. Niet lang nadat hij afstudeerde, startte hij een onderneming op onder de naam Printhings3D. Door contact te houden met Ing. Glen Vandevenne, met wie hij afstudeerde, kreeg Ing. Aerts de kans om masterproefonderwerpen aan te brengen. Aangezien Ing. Vandevenne werd aangewezen als promotor voor mijn masterproef, kwam één van deze onderwerpen ook tot bij mij. Het idee om materialen te recyclen, het verwantschap met 3D-printen en de goede balans tussen ontwerpen en zelf bouwen, waren de kernelementen die mij aanspraken in deze masterproef. Vandaar dat ik ook meteen na het lezen van de beschrijving voor deze masterproef heb gekozen.

Graag wil ik ook Ing. Yannick Aerts, Ing. Glen Vandevenne en Prof. Dr. Ir. Wim Deferme bedanken voor hun inzet, interesse en geduld. Zij stonden steeds klaar om mij in de juiste richting te sturen, te helpen en belangrijke zaken bij te leren. Ik wil hun ook graag bedanken voor alle positieve feedback. Zij stonden steeds klaar om geleverd werk te evalueren en aan te brengen hoe dit kon worden verbeterd. Zij deden dit nooit op een negatieve manier, maar steeds op een vriendelijke, opbouwende wijze. Met hun werken was een unieke en zeer aangename ervaring.

Inhoudsopgave

Lijst van tabellen	5
Lijst van figuren	7
Verklarende woordenlijst	9
Abstract	11
Abstract in English	13
1 Inleiding	15
1.1 Situering.....	15
1.2 Probleemstelling	16
1.3 Doelstellingen.....	16
1.4 Methode	17
2 Bouw van de extruder	19
2.1 Het extrusieproces	19
2.2 Mechanische aspecten	20
2.2.1 Schroef	20
2.2.2 Motor.....	21
2.2.3 Koppeloverbrenging.....	22
2.2.4 Uitlijning	23
2.2.5 Richten van de extrusieschroef	24
2.2.6 De loop en toevoerzone.....	25
2.2.7 De nozzle.....	26
2.3 Thermische aspecten.....	27
2.4 Elektronische aspecten	30
2.4.1 De power supply.....	30
2.4.2 Spanningsregelaar	31
2.4.3 Temperatuurcontroller.....	32
3 Polymelkzuur	35
3.1 Algemeen.....	35
3.2 Productie van PLA.....	35
3.3 Eigenschappen van PLA.....	36
3.4 Additieven	36
3.5 Degradatie.....	37

4	Testresultaten	41
4.1	Test met misprints	41
4.1.1	Algemeen	41
4.1.2	Resultaten eerste test	42
4.2	Test met pellets	44
4.2.1	Algemeen	44
4.2.2	Toegevoegde elementen	44
4.2.3	Resultaten tweede test	45
4.2.4	Aanpassingen aan de extruder	47
4.2.5	Resultaten derde test.....	47
5	Besluit	51
6	Literatuurlijst.....	53
7	Bijlagen	55

Lijst van tabellen

<i>Tabel 1: Test m.b.t. degradatie PLA</i>	38
<i>Tabel 2: Gegevens en resultaten van de trekproef</i>	49

Lijst van figuren

<i>figuur 1: Schematische werking van Fused Deposition Modeling</i>	15
<i>figuur 2: Enkele criteria voor het controleren van filament</i>	17
<i>figuur 3: Schematische voorstelling van een extruder</i>	19
<i>figuur 4: Afbeelding van de boorschroef</i>	20
<i>figuur 5: Voorbeeld van het gebruikte motortype</i>	21
<i>figuur 6: Conceptueel ontwerp in Creo</i>	22
<i>figuur 7: Uitlijning van de koppelbuis (tweede ontwerp)</i>	23
<i>figuur 8: Toevoerzone (zonder fles als trechter)</i>	26
<i>figuur 9: Schematische weergave van die swell</i>	27
<i>figuur 10: Verwarmingselement</i>	28
<i>figuur 11: Verwarmingselement en thermokoppel</i>	29
<i>figuur 12: Elektronische aspecten</i>	30
<i>figuur 13: Voorbeeld van PWM</i>	31
<i>figuur 14: Illustratie van een gesloten systeem</i>	32
<i>figuur 15: De synthese van PLA</i>	35
<i>figuur 16: Isomeren van melkzuur</i>	36
<i>figuur 17: Afname M_n i.f.v. de tijd in verschillende omstandigheden</i>	39
<i>figuur 18: Geknipte misprints</i>	41
<i>figuur 19: Initiële plaatsing van het verwarmingselement</i>	42
<i>figuur 20: Enkele voorbeelden van filament uit de eerste test</i>	43
<i>figuur 21: Ondersteuning en koeling van het filament</i>	45
<i>figuur 22: Voorbeelden van de test met pellets</i>	46
<i>figuur 23: Schets van de opstelling van de trekproef</i>	48

Verklarende woordenlijst

- Filament: dun, draadvormig materiaal dat gebruikt wordt als inputmateriaal voor een 3D-printer.
- Amplitudo: verschil tussen 2 opeenvolgende extrema (bijvoorbeeld minimum en maximum). Niet te verwarren met amplitude, de maximale uitwijking ten opzicht van de evenwichtslijn.
- Eng.: hierop volgt een Engelse term, die couranter gebruikt wordt dan de term in het Nederlands.
- Omw/min: aantal omwentelingen per minuut (eenheid van rotatiesnelheid).
- Wt%: gewichtspercentage, verhouding van de massa van een toegevoegde stof ten opzichte van de massa van het mengsel.
- Ø: diameter

Abstract

Het bedrijf Printhings3D te Beringen maakt producten met behulp van 3D-printtechnieken. Deze technieken zijn echter nog duur in vergelijking met traditionele productiemethodes, vooral vanwege de hoge grondstofkosten. Vooralsnog worden misprints zonder meer weggegooid, zodat de dure grondstof verloren gaat. Het doel van deze masterproef is het maken van een extruder die de grondstoffen van misprints kan recycleren.

Na een literatuurstudie over de werking van een extruder wordt een basisontwerp gemaakt. Dit ontwerp wordt later omgezet in een functioneel prototype dat wordt getest met misprints enerzijds en basismateriaal in pelletvorm anderzijds. Tenslotte worden de mechanische eigenschappen van de geproduceerde grondstof vergeleken met aangekochte printergrondstof. Oorzaken van vastgestelde verschillen worden verklaard aan de hand van de literatuur.

Uit de tests blijkt dat de gerecycleerde grondstof vaak veel broser is dan de aangekochte grondstof. De literatuurstudie wijst drie mogelijke oorzaken aan: het verdampen van weekmakers in het extrusie- en/of printproces, een foute afkoelsnelheid en daardoor een te hoge kristalliniteit, of chemische degradatie. De aanwezigheid van vocht in combinatie met een hoge verwerkingstemperatuur, zorgt voor aanzienlijke degradatie. Door het materiaal op voorhand te drogen en een lagere verwerkingstemperatuur te hanteren, verbeteren de mechanische eigenschappen aanzienlijk. Chemische degradatie was dus de voornaamste reden voor het broos worden in de eerste tests.

Abstract in English

The company Printhings3D at Beringen uses 3D-printing techniques to create its products. These techniques are rather expensive in comparison to traditional production methods, mainly because of the high material costs. For the time being, misprints are disposed, and the expensive material is lost. The goal of this master's thesis is to develop an extruder, which can recycle the material of misprints.

Following a literature study about the functioning of an extruder, a concept design is made. Out of this design, a functional prototype is made. This is tested with both misprints and base material in the shape of pellets. Finally, the mechanical properties of the produced material are compared with those of purchased printing material. The causes of any dissimilarities are sought in a literature study.

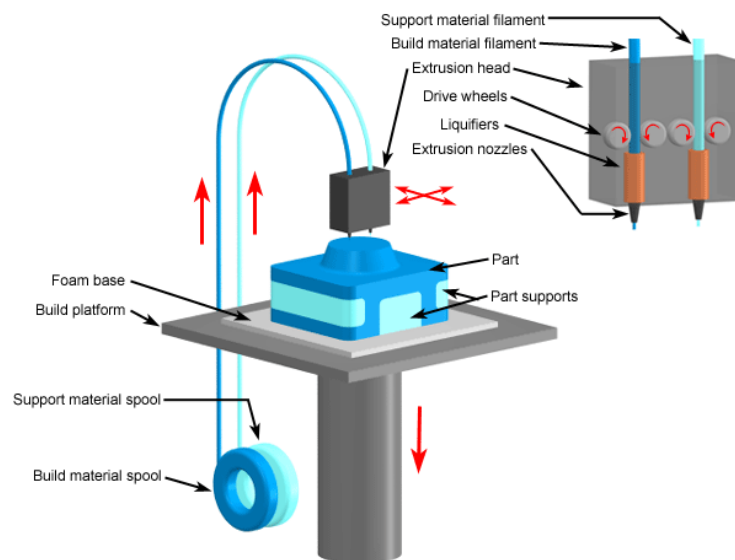
The first tests conclude/show that the recycled material is usually much more brittle than purchased material. The literature study shows in three possible causes: the evaporation of plasticizers during the extrusion or printing process, an incorrect cooling speed and therefore a high crystallinity, or chemical degradation. The presence of moisture combined with an elevated processing temperature will cause considerable degradation. Drying the material before processing and using a lower processing temperature will improve the mechanical properties considerably. The main reason for the embrittlement in the first tests was therefore chemical degradation.

1 Inleiding

1.1 Situering

Deze masterproef werd opgegeven door het bedrijf Printhings3D dat gevestigd is in Beringen. Dit is een recent opgerichte eenmanszaak gespecialiseerd in het printen van 3D-modellen voor particulieren en bedrijven.

De techniek die gebruikt wordt voor het maken van 3D-modellen is FDM of Fused Deposition Modeling. Hierbij wordt het model opgebouwd vanop een vlakke plaat. Een printerkop kan naar een gegeven positie gestuurd worden en hier een druppel plastic vezel aanbrengen. Dit gebeurt door een draad of filament in de printerkop te verwarmen. Het filament smelt niet echt maar wordt een ‘viskeuze vloeistof’. Zo kan het, net als inkt, aangebracht kan worden op de plaat. Het verschil met een gewone 2D-printer bestaat erin, dat na het printen van één laag (eventueel met ondersteunend materiaal), de plaat zakt en er een volgende laag op geprint kan worden. Door dit meermaals te herhalen kan een volledig object met ingewikkelde geometrie aangemaakt worden. Het is die ingewikkelde geometrie die FDM, en 3D-printen in het algemeen, zo interessant maakt. De techniek is de laatste jaren verder ontwikkeld, waardoor de kwaliteit van de producten nu in de buurt komt van producten van massaproductietechnieken (bv. spuitgieten).



figuur 1: Schematische werking van Fused Deposition Modeling [1]

De printers en filamenten zijn vanwege de toenemende interesse nu ook betaalbaarder geworden. Vele KMO's en eenmanszaken zoals Printhings 3D zijn recentelijk opgericht om met deze techniek hun eigen producten te ontwikkelen.

Ondanks de vooruitgang ondervindt FDM nog enkele hindernissen. Zo is de tijd om een product te printen is nog te lang. Daarom is het moeilijk om met conventionele massaproductietechnieken, zoals spuitgieten, te concurreren. Voor spuitgieten moet de seriegrootte echter wel groot zijn (>10.000) om de kosten van de mal terug te verdienen, wat bij FDM niet het geval is. Daarom wordt er vaker voor FDM gekozen indien de producten kleinere seriegroottes hebben.

1.2 Probleemstelling

De gebruikte grondstoffen zijn voornamelijk Polymelkzuur (PLA) en Acrylonitril-butadienstyreen (ABS), maar er zijn nog talrijke andere polymeren ontwikkeld (of nog in ontwikkeling) die geschikt zijn voor FDM. Deze worden aangekocht onder de vorm van filament, een opgerolde draad die 20 tot 50 euro/kg kost. [2] Deze draad wordt in industriële installaties vervaardigd via extrusie, een proces waarbij pellets of kleine korreltjes (diameter 1 tot 2mm) worden omgezet in filament. De gebruikelijke diameters hiervan variëren van 1,75 tot 3 mm. Deze pellets zijn de grondstoffen van verschillende processen zoals bv. spuitgieten. Hierdoor zijn ze ook goedkoper, afhankelijk van de olieprijs 2 tot 3 \$/kg.

Tot op heden wordt er bij 3D-Printhings enkel aangekocht filament gebruikt voor de 3D-printers. Er kan evenwel een hele besparing gebeuren indien het bedrijf beslist om niet langer filament aan te kopen, maar zelf een installatie te voorzien die pellets omzet in filament. De pellets zijn immers vrij verkrijgbaar. [3]

Met FDM is het onvermijdelijk dat er af en toe een misprint opduikt. Dit is een product dat niet verkocht kan worden omdat het niet aan de gestelde technische of esthetische eisen voldoet. Het kan in de huidige toestand niks meer opleveren maar heeft wel een zekere hoeveelheid materiaal en tijd gekost, wat natuurlijk negatieve gevolgen zijn voor het bedrijf. Een misprint is niet altijd te voorkomen, en hangt meestal af van de toestand van de printer. Er zijn echter wel mogelijkheden om het materiaal van de misprints te hergebruiken.

1.3 Doelstellingen

De hoofddoelstelling van deze masterproef is het maken van een extruder die de mogelijkheid voorziet om de misprints te recyclen, m.a.w. om te zetten in nieuw filament. Dit levert een aanzienlijke besparing op in grondstofkosten. Van belang is dat enerzijds de mechanische eigenschappen van het geproduceerde filament evenwaardig zijn aan die van het aangekochte filament. Anderzijds moet ook de draaddikte van het geproduceerde filament voldoen aan dezelfde eisen als aangekocht filament. Het bedrijf gebruikt standaard filament met een diameter 1,75mm en de variatie hierop is 0,05mm.

Het ontwerpen van een extruder is de eerste stap. Tegelijk wordt er een prototype vervaardigd zodat constante terugkoppeling naar het ontwerp mogelijk is. De volgende stap is het testen van de extruder. Dit kan gebeuren met verwerkte misprints maar ook met pellets die beide bestaan uit PLA. De voornaamste criteria zijn de grootte van de diameter maar vooral ook de variatie hierop.

Dit zijn de basisdoelstellingen. Verder is het ook interessant om verschillende materialen te testen, of ze geschikt zijn voor het omzetten in filament (vooral goedkope plastics zoals PET zijn interessant). De geschiktheid houdt vooral in dat er geen degradatie optreedt, dat het materiaal “zelfhechtend” is tijdens het printen en ook niet bros wordt achteraf.

Wat ook niet over het hoofd gezien mag worden is de grootte van de te recycleren stukken. Indien deze afmetingen hebben die te groot zijn als rechtstreekse input voor de extruder, moeten ze opgedeeld worden in kleinere stukken. Er moet dus ook een mechanisme voorzien worden om die grote stukken te verwerken.

Uiteindelijk is het de bedoeling om de extruder als vaste productie-eenheid in te stellen. Dit houdt in dat het prototype verder aangepast wordt indien de tests aangeven dat dit nodig is.

1.4 Methode

Het maken van de extruder begint bij het ontwerp. Voor het maken van het ontwerp wordt er gebruik gemaakt van het high-end tekenpakket: PTC Creo Parametric versie 3.0.

De belangrijkste componenten van het ontwerp kunnen afgeleid worden uit industriële extrusiemachines. Het werkingsprincipe en de functie van de verschillende componenten zijn vrijwel identiek. Uiteraard moet het ontwerp van de te maken extruder aangepast worden. Zo ligt de productiecapaciteit lager en daarmee zullen de dimensies ook in grootte afnemen. Er zijn enkele voorbeeldontwerpen te vinden op het internet, waaruit de hoofdafmetingen ingeschat kunnen worden.

Het vervaardigen van het prototype zal gebeuren door middel van enkele basisbewerkingen zoals boren, draaien en frezen. De student zal deze uitvoeren, zodat hiervoor geen extra werkkrachten ingeschakeld moeten worden.

Het testen zal gebeuren met PLA in zowel misprint- als pellet-vorm. Het controleren van de draaddikte en de variatie hierop kan gebeuren door die met een micrometer systematisch (bijvoorbeeld om de 10 cm) de lengte van de draad af te gaan. De mechanische sterkte kan achterhaald worden aan de hand van een trekproef.

<p>PERFORMANCE <i>mechanical resistance of the material</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tensile test and compression test to determine: <ul style="list-style-type: none"> • Strength • Elongation at break • Rigidity 	
<p>QUALITY <i>how good the finished product looks</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • General aspect • Surface finish • Feature detail accuracy • Consistency across prints 	
<p>PROCESS <i>ease of using the filament</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Spool supplied vs. coil only • Ease to feed into the printer • Frequency of filament getting tangled • Post-processing requirements 	

figuur 2: Enkele criteria voor het controleren van filament [4]

Indien het filament op basis van die criteria goedgekeurd wordt, kan het proefondervindelijk getest worden in de 3D-printers van het bedrijf. De geprinte producten kunnen vervolgens vergeleken worden met producten uit aangekocht filament. De kans op misprints, de sterkte van de producten en de ductiliteit zijn hierin de voornaamste criteria.

Het nagaan van de geschiktheid van andere materialen kan initieel gebeuren door opzoekwerk te verrichten. De materialen die mogelijk geschikt zijn, zullen getest worden door ze in de extruder om te vormen. Vervolgens wordt het filament op dezelfde wijze gecontroleerd en getest als in de voorgaande alinea beschreven.

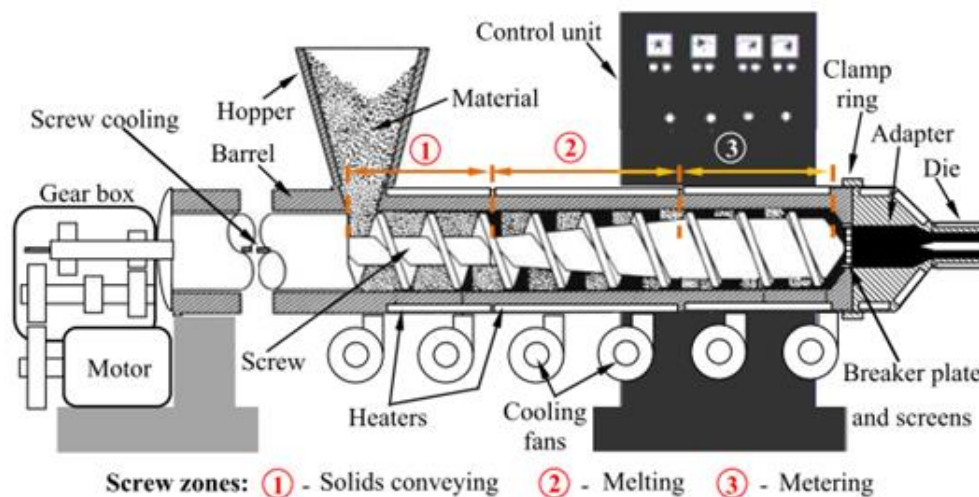
Het verkleinen van stukken kan op verschillende manieren gebeuren, maar de meest directe manier is een cruncher. Hierbij wordt het materiaal niet verwarmd om de stijfheid te verminderen, maar op verschillende punten onder druk gezet totdat het plooit en uiteindelijk breekt.

2 Bouw van de extruder

2.1 Het extrusieproces

Het design van de extruder is afgeleid van dat van industriële extruders en bestaat uit de volgende elementen:

- een extrusieschroef (screw)
- een motor die deze aandrijft aan een laag toerental (motor + gearbox)
- een buis die rond de schroef zit met hierop voorzien een gat voor een trechter (barrel)
- verwarmingselementen rond deze buis, met isolatie
- een nozzle op het einde van de buis



figuur 3: Schematische voorstelling van een extruder [5]

Het werkingsprincipe is als volgt: kleine stukjes van eenzelfde polymeer-grondstof worden in de trechter gebracht. Door zwaartekracht zullen deze in de buis vallen en meegenomen worden door de schroef. De buis wordt verwarmd tot op de temperatuur waarop de kunststof de gewenste viscositeit heeft, meestal is dat in de buurt van 100 Pa.s [6]. Door het transport van de kunststof door de verwarmde buis zal die ook smelten en die viscositeit bereiken. In combinatie met de juiste draaisnelheid van de schroef wordt er ook druk opgebouwd achteraan de buis. Door het aanbrengen van een nozzle, een afsluitelement met daarin een gat van gewenste diameter, heeft de kunststof de mogelijkheid om te ontsnappen. Hierbij vormt deze een draad of filament met een zekere diameter.

Dit werkingsprincipe, dat uitgebeeld wordt in figuur 3, is welgekend en wordt toegepast op industriële schaal voor het maken van filament uit pellets. Het verschil met deze masterproef is dat de te bouwen extruder veel kleinere hoeveelheden verwerkt. Dit zorgt ervoor dat het type schroef anders zal zijn. Een echte extrusieschroef heeft een binnendiameter die toeneemt naar het einde van de schroef toe, zoals te zien in figuur 1. Hierdoor worden de pellets opeengedrukt en smelten ze onder invloed van wrijving. De bedoeling is ook dat 80% van de warmte-energie van wrijving en dus mechanisch vermogen afkomstig is, de overige 20% komt van warmte-elementen. [7]

Gezien de afmetingen van de te maken extruder is het makkelijker om de warmte-energie van verwarmingselementen te laten komen. De reden hiervoor is als volgt: wanneer de grootte van een object afneemt (dimensies in meter ↓), zal het volume ($\sim m^3$) sneller afnemen dan de oppervlakte ($\sim m^2$). De oppervlakte, en alles wat daardoor getransporteerd wordt, zal dus belangrijker worden t.o.v. het volume en alles wat daarin zit. Specifiek voor deze toepassing wil dit zeggen dat de inhoud van de buis waarin de schroef en de pellets zich bevinden, relatief kleiner wordt t.o.v. de oppervlakte van de buis, wanneer de afmetingen kleiner worden.

Nu is het zo dat de warmte-inhoud afhankelijk is van de grootte van het volume en het warmtetransport door de wand, en dus door de oppervlakte, van een object gebeurt. Door de afmetingen te verkleinen zal het in het geval van de extruder dus makkelijker zijn om de temperatuur te beheersen via warmte-elementen, die zich rondom de schroef bevinden.

2.2 Mechanische aspecten

2.2.1 Schroef

Vanuit het algemeen werkingsprincipe van het extrusieproces wordt vervolgens een ontwerp gemaakt. Zoals eerder gezegd zijn de afmetingen van de te maken extruder kleiner dan die van de standaard extruder. Zo wordt er geschat dat de extrusieschroef 3 keer korter mag zijn en slechts de helft van de diameter van een standaard extrusieschroef mag hebben. [8]

De schroef hoeft dan ook geen extrusieschroef te zijn, een gewone boorschroef (Eng: auger bit) zorgt evenzeer voor transport en drukopbouw. Extrusieschroeven van deze afmetingen worden niet veel gebruikt, waardoor de prijs ervan relatief hoog ligt t.o.v. een boorschroef van dezelfde afmetingen. Zo kost een standaard extrusieschroef makkelijk \$270 exclusief transportkosten, en een standaard boorschroef slechts \$15. [9] [10]

Er is dus gekozen om gebruik te maken van een boorschroef met totale lengte 450 mm, buitendiameter 16 mm, en schroeflengte 360 mm. [10]



figuur 4: Afbeelding van de boorschroef [10]

Hierbij valt op te merken dat de achterkant van deze boorschroef een zeskant is (zoals bij een imbusleutel). Dit biedt verschillende mogelijkheden voor de aandrijving van de schroef.

2.2.2 Motor

Het type motor nodig om de schroef aan te drijven, moet draaien op een laag toerental, en toch een redelijk hoog koppel kunnen leveren. Een motor met reductiekast kan dat echter gemakkelijk voorzien. Het bedrijf heeft het volgende type motor voor deze toepassing voorzien:

- SsangYong type 86100-06000, ruitenwissermotor, 12V
- Heeft 4 aansluitpennen (rode draad, groene, 2 blauwe) en aardingsdraad.
- Dit is een permanente magneetmotor, de draaisnelheid van de spoel in dit veld wordt via een wormwiel omgezet naar de uitgaande as (lager toerental, hoger koppel).
- De draden gaan niet rechtstreeks naar de motor: 2 blauwe en de aarding gaan naar een ronddraaiende schijf die meedraait met de uitgaande as. Hierop zit een systeem dat de 2 blauwe draden verbindt wanneer de uitgaande as juist één omwenteling heeft gemaakt. Dit is het stuurmechanisme voor ruitenwissers (overbodig bij deze toepassing).
- De combinatie rood-blauw of groen-blauw laat de motor draaien aan respectievelijk 35 omw/min en 46 omw/min in onbelaste toestand. Door de andere blauwe draad niet te verbinden blijft de motor in één richting draaien zonder om te keren zoals bij de normale werking van een ruitenwissermotor.



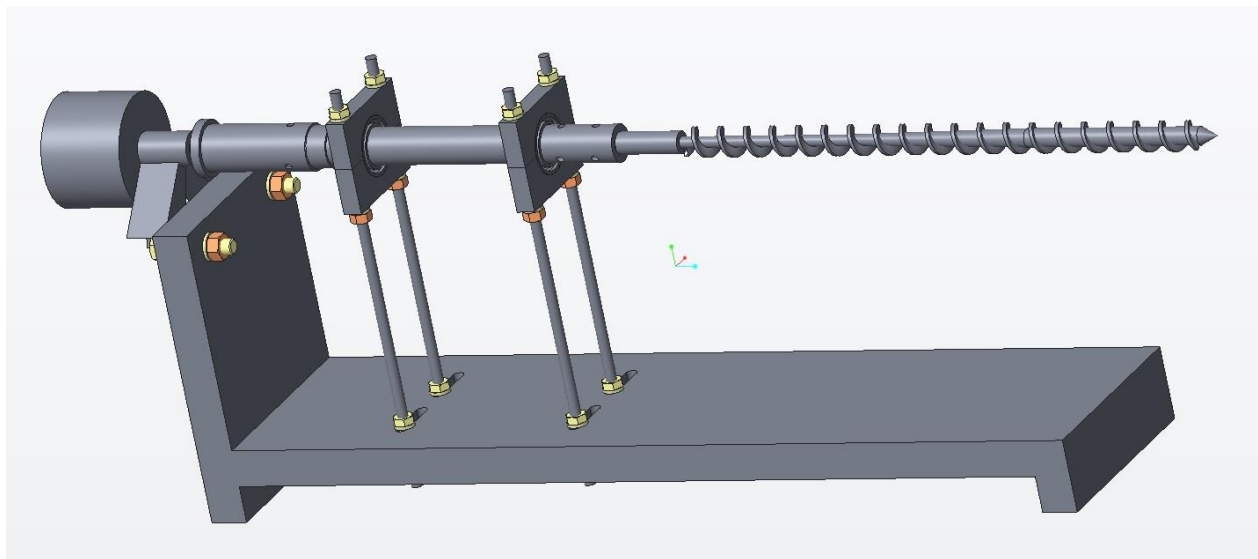
figuur 5: Voorbeeld van het gebruikte motortype [11]

Dit type motor vraagt in onbelaste toestand (46 omw/min) een stroomsterkte van ongeveer 2 A. Het exacte koppel dat de motor kan leveren is niet gekend. Wel is dat koppel te groot om de motor via het koppelstuk met de hand te blokkeren. Om toch een inschatting te maken: het koppelstuk zit tot 5 cm van de as af, de tegenwerkende kracht is ongeveer 200 N, wat leidt tot een koppel van om en bij de 10 Nm. Dit is veruit groot genoeg om aan de gewenste toepassing te voldoen. Door de motor mechanisch te blokkeren, piekt de stroomsterkte tot waarden van 5 tot 6 A. Dit is ook meteen de grootst mogelijke stroom die de motor kan vragen, aangezien het een permanente magneet DC-motor is.

Het koppelstuk (zie figuur 5) [11] dient normaal om een ruitenwisser aan te drijven. Het is via een moer (M8x1.25) bevestigd op de uitgaande as van de motor. De as bevat dus enkele mm schroefdraad op het einde en wordt daarna naar de motor toe breder zodanig dat een uitwendig gegroefde conus ontstaat. Het gat in het koppelstuk is een inwendig gegroefde conus. Door met de moer het koppelstuk vast te draaien op de as, grijpen de groeven op de conussen ineen, waardoor een groot koppel kan overgedragen worden.

2.2.3 Koppeloverbrenging

Dit systeem om het koppel over te brengen, wordt overgenomen in het ontwerp, daar een beter alternatief niet voor de hand ligt. Het koppel moet echter overgebracht worden op de zeskant achteraan de schroef. Ook moet de schroef gericht en uitgelijnd kunnen worden, zodat deze niet te veel schommelt. Vanwege deze vereisten, is het maken van een conceptueel ontwerp noodzakelijk. Met behulp van het tekenprogramma Creo Parametric versie 3.0 werd het ontwerp gemaakt dat te zien is in figuur 6.



figuur 6: Conceptueel ontwerp in Creo

Er bevindt er zich een dubbel gelagerde buis (koppelbuis genoemd) tussen de motor en de schroef. In bijlage 1 bevindt zich een detailtekening van de koppelbuis. Aan de linkerkant wordt deze aangedreven door de motor en aan de rechterkant drijft deze de schroef aan (hier nog getekend als extrusieschroef). Om deze koppelbuis aan te drijven is er gebruikgemaakt van het koppelstuk van de motor. Hier is namelijk een stuk van afgeslepen en een stalen buis op gebraseerd, coaxiaal met het conisch gat. De koppelbuis (diameter 16 mm) past in deze buis (inwendige diameter: 20 mm). Beide hebben 3 gaten die in hetzelfde vlak liggen maar telkens 120° verdraaid zijn t.o.v. elkaar. De gaten in de koppelbuis zijn voorzien van een inwendige schroefdraad M4x1. Hierdoor kan een schroef van M4x1 hierin gedraaid worden. De gaten in de stalen buis zijn groter, nl. 6 mm diameter, zodat de schroeven van M4 er gemakkelijk doorheen gaan. Wanneer de stalen buis de koppelbuis overlapt, zodat de gaten elkaar overlappen, kunnen drie schroeven van M4 door de gaten in de stalen buis gestoken worden en in de gaten van de koppelbuis gedraaid worden.

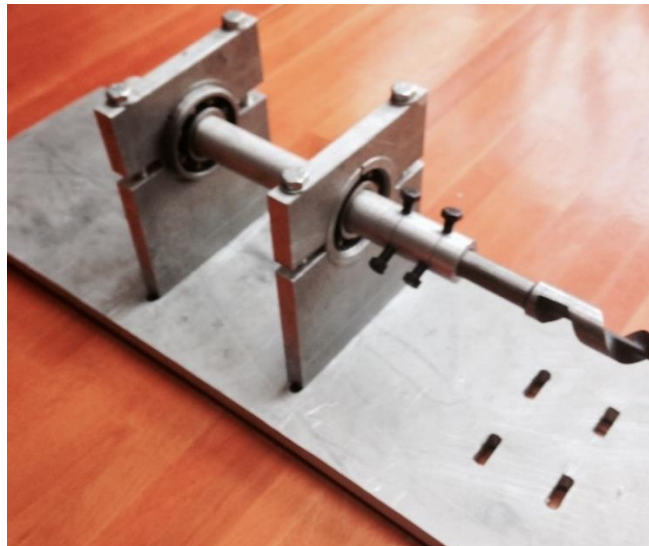
Indien de stalen buis nu rond zijn as begint te draaien, raakt deze de schroeven van M4 zodat de koppelbuis meedraait. Er wordt m.a.w. een koppel overgebracht. Zelfs wanneer de stalen buis en de koppelbuis niet volledig coaxiaal liggen, geeft dit geen problemen. Omdat er speling zit tussen de stalen buis en de koppelbuis mag de stalen buis wat slingeren rond zijn as (wat immers onvermijdelijk is). Het koppel wordt immers via de schroeven overgebracht.

2.2.4 Uitlijning

Het eerste prototype, voornamelijk bedoeld om de dimensies juist in te schatten, zag er uit zoals weergegeven op figuur 6. Twee lagers (type 6204-RSL) worden gebruikt om de koppelbuis uit te lijnen. Om de lagers vast te zetten, worden deze geklemd tussen twee stukken met halfcirkelvormige gaten die rond de lagers passen. Kruisend aan de as van deze gaten zijn 2 door beide stukken lopende gaten geboord. Hierdoor kunnen ze op 2 schroefdraden bevestigd worden. Dit systeem moet dienen om de lagers enerzijds vast te klemmen, en anderzijds om de hoogte van de lagers te kunnen regelen.

De schroefdraden zelf steken elk door hun eigen gleuf in de basisplaat. Met 2 moeren wordt een schroefdraad vastgezet op de basisplaat, een houten plaat van 15 mm dik. Dit systeem zorgt ervoor dat beide lagers 2 vrijheidsgraden bezitten wat betreft het vastzetten, in een vlak loodrecht op de richting van het uiteinde van de extrusieschroef naar de motor. De lagers kunnen dus horizontaal en verticaal versteld worden. De positionering van de lagers bezit dus een zekere flexibiliteit.

Dit systeem om de lagers te bevestigen is echter wat veranderd (zie figuur 7). Allereerst is er gekozen om gebruik te maken van een rechthoekige aluminium basisplaat met dikte 10 mm. Wat betreft stijfheden, doorbuiging en nauwkeurigheid is dit veel beter dan een houten basisplaat.



figuur 7: Uitlijning van de koppelbuis (tweede ontwerp)

Om de lagers te bevestigen, wordt er ook geen schroefdraad gebruikt. Het onderste blokje met halfcirkelvormig gat wordt uit aluminium gemaakt (van dezelfde plaat als de basisplaat, dus ook met een dikte van 10 mm), en reikt tot tegen de aluminium basisplaat. In de basisplaat zijn 4

gleuven voorzien, in de twee onderste stukken zijn telkens 2 gaten geboord met daar schroefdraad in getapt (M6x1). Zo kunnen de onderste stukken vastgezet worden met elk 2 bouten van M6. Beide stukken zijn door de gleuven nog steeds horizontaal verstelbaar.

Deze aanpassing levert een voordeel maar evenzeer een nadeel op. Door de onderste stukken tot tegen de basisplaat te laten reiken, en ze stevig aan te draaien met de bouten, is het systeem voor de uitlijning van de koppelbuis veel stijver geworden. Hier tegenover staat dat beide lagers niet meer verticaal verstelbaar zijn. De lagers worden nu vastgeklemd door 2 bouten (M6x40) in het bovenste stuk aan te draaien. Deze lopen door gaten in het bovenste stuk. In het onderste stuk lopen deze gaten verder maar daar zijn ze voorzien van schroefdraad.

De aluminium platen zijn elk bewerkt geweest met een handmatig gestuurde freesmachine. De platen werden eerst uit een grotere vlakke plaat geslepen, om vervolgens bewerkt te worden aan de randen. Zodoende zijn deze platen ook effectief rechthoekig.

De stukken nodig om de lagers vast te klemmen zijn ook op deze manier bekomen. Twee platen zijn samen gefreesd zodat hun afmetingen vrijwel identiek zijn. Beide platen werden ook gezamenlijk ingespannen bij het boren van het gat voor de lagers. Op die manier liggen ook de gaten in beide platen ook op vrijwel dezelfde hoogte. Hierna zijn de platen doorgeslepen ter hoogte van de gaten, om de bovenste en onderste stukken te verkrijgen. Vervolgens zijn deze geslepen kanten vlak gefreesd.

Het belangrijke van dit bewerkingsproces is dat de koppelbuis nu verticaal uitgelijnd is. De hoogte is niet verstelbaar maar de as van de buis ligt wel evenwijdig aan de basisplaat.

2.2.5 Richten van de extrusieschroef

Wat nog op figuur 7 te zien is, is de mechanische koppeling tussen de koppelbuis en de extrusieschroef. Deze heeft 2 functies: ten eerste moet de koppelbuis de extrusieschroef kunnen aandrijven of met andere woorden koppel er op overbrengen. Ten tweede moet de as van de extrusieschroef ook zo goed mogelijk samenvallen met die van de koppelbuis, oftewel de extrusieschroef moet uitgelijnd en gericht worden. Deze twee functies kan de mechanische koppeling vervullen.

De koppeling bestaat uit 6 schroeven (M4x15). Deze kunnen vastgedraaid worden in 6 overeenkomstige gaten met schroefdraad (M4x0,70). De gaten liggen telkens per drie in eenzelfde vlak loodrecht op de as van de koppelbuis. Onderling liggen ze op 120° verdraaid rond diezelfde as. In de koppelbuis zelf is een gat geboord van 12 mm. De 6 schroefgaten lopen door tot aan dit gat. De 6 schroeven van M4 kunnen dus aangedraaid worden en komen daardoor dicht bij de aslijn van de koppelbuis terecht.

Eerder werd al gezegd dat de extrusieschroef achteraan de vorm heeft van een regelmatige zeshoek, zoals bij een inbussleutel. Die zeshoek heeft een omschreven cirkel van net iets kleiner dan 12 mm. De achterkant van de extrusieschroef past dus in het gat in de koppelbuis.

Door de 6 schroeven aan te draaien lopen ze vast tegen de vlakken van de zeshoek. Dit zorgt al meteen voor de mogelijkheid om koppel over te dragen. De extrusieschroef zal dan wel nog niet gealigneerd zijn met de koppelbuis. Hiervoor is het geheel eerst in een draaibank gestoken. De koppelbuis wordt aangedreven aan lage snelheid (enkele omw/min), terwijl er op de draaibank 2 meetklokken bevestigd zijn. Deze meten de uitwijking van de extrusieschroef op 2 punten: vooraan waar de schroef in de koppelbuis steekt, en achteraan op de punt van de schroef. Door de 6 schroeven te verdraaien kunnen deze uitwijkingen geminimaliseerd worden (op de punt: amplitudo van 0,50 mm).

2.2.6 De loop en toevoerzone

In de loop (Eng. “barrel”) worden de pellets door de schroef naar voren gedreven. Op het einde van de loop smelten de pellets en wordt er druk opgebouwd. Om die drukopbouw te kunnen verwezenlijken is het belangrijk dat er niet te veel speling tussen de loop en de extrusieschroef zit. De buis die gebruikt wordt als loop is van aluminium, is 36 cm lang, heeft een buitendiameter van 20 mm en een binnendiameter van 17 mm. De schroef (buitendiameter 16 mm) heeft in het ideale geval dus 0,50 mm speling aan beide kanten.

De loop zit rond de extrusieschroef maar raakt die niet. De loop moet dus een aparte bevestiging hebben. Aangezien de voedingszone zich ook op de loop bevindt, zijn beide op dezelfde plaats bevestigd op de basisplaat. Hiervoor is een gelijkaardig systeem gebruikt zoals dat uit het conceptueel ontwerp. In de basisplaat zitten 4 gleuven, dit is duidelijk te zien op figuur 7. Door deze gleuven komen 4 schroefdraden (M6x1) die met moeren bevestigd zijn op de basisplaat. Op deze schroefdraden komen 2 houten blokken te zitten die vervaardigd zijn uit 1 blok. In het midden is eerst een gat van 20 mm geboord, later is het blok doorgezaagd in het midden. Door de houten blokken op elkaar te klemmen kan de loop, die zich in het gat bevindt, bevestigd worden.

De blokken zijn bevestigd op de 4 schroefdraden, zoals te zien is op figuur 8. De hoogte kan ingesteld worden door de 4 moeren die het onderste stuk ondersteunen te verdraaien. De loop komt tussen de blokken, het bovenste blok komt op de schroefdraden te zitten, en met nog eens 4 moeren langs boven kan het geheel vastgezet worden.

In het bovenste blok is ook een systeem voorzien voor de materiaaltoevoer. In het blok is een gat geboord dat loodrecht staat op het vlak waarin de blokken in 2 gezaagd zijn. Door de wand van de loop is ook een gat geboord. In principe loopt er dus één gat van bovenaf tot aan de extrusieschroef. De diameter hiervan is 14 mm. Om een soort trechter (Eng. “hopper”) te voorzien, is er nog een extra blokje hout met trechtersvormig gat bovenop het bovenste blok gezet. Hierin kan een simpel PET-flesje gedraaid worden, dat vanboven opengemaakt is zodat het als trechter kan dienen. Omdat hier geen grote krachten opkomen, is het extra blokje met dubbelzijdige plakband vastgezet.



figuur 8: Toevoerzone (zonder fles als trechter)

Dankzij de gleuven kan het geheel loodrecht op de richting van de extrusieschroef in horizontale zin verplaatst worden. Door de onderste moeren gelijk bij te draaien kan het geheel ook in de verticale zin verplaatst worden. Deze bewegingsvrijheden laten toe dat de as van de loop ongeveer gelijk kan komen te liggen met de as van de extrusieschroef. Samen met een goede uitlijning zou dit er voor moeten zorgen dat de schroef niet tegen de wand van de aluminium buis schuurt. Dit zou voor kleine metaaldeeltjes kunnen zorgen die dan ook in het filament terechtkomen, wat ongewenst is.

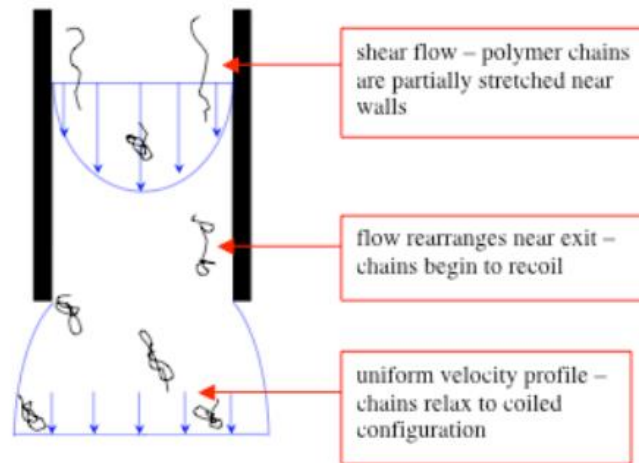
Zoals eerder gezegd, is dit systeem met schroefdraad niet zo stijf als het systeem dat gebruikt wordt voor de uitlijning. Dit is immers ook niet nodig. Het uitlijningssysteem bepaalt de positie en richting van de as van de extrusieschroef. Het systeem om de loop vast te houden moet daarentegen flexibeler zijn, en in staat zijn om de loop zo juist mogelijk rond die as te leggen. Moest de extrusieschroef dan toch ergens contact maken met de loop, dan is het best zo dat de loop gewoon even mee beweegt, zodat er geen te grote wrijvingskrachten optreden. Daarom dat dit systeem dus minder stijf moet zijn, en de uitvoering met de schroefdraad voor dit systeem de beter oplossing is.

2.2.7 De nozzle

Het laatste mechanische aspect is de nozzle. Die bevindt zich aan het uiteinde van de loop, daar waar het PLA normaal de loop moet verlaten. Het functie van de loop is dan ook om ervoor te zorgen dat er niet gewoon “gesmolten” materiaal uit de loop komt, maar een mooie draad van de juiste diameter. Aangezien de nozzle eigenlijk de buis afsluit op een kleine opening na, werkt die indirect ook als weerstand, en zorgt dus voor drukopbouw.

De gewenste diameter van de draad is $1,75 \pm 0,05$ mm. Het is echter niet mogelijk om een gat van 1,75 mm te boren in de nozzle en dan te verwachten dat er een draad met dezelfde diameter uitkomt. Een fenomeen dat men “die swell” noemt, zorgt ervoor dat de diameter van de uitgaande stroom toeneemt bij het verlaten van de nozzle of matrijs (Eng.: die; vandaar de naam “die swell” of “matrijszwellung”).

Boven T_m gedraagt PLA, zoals dat bij polymeren het geval is, zich als viskeuze vloeistof. Het reologische gedrag hiervan is anders dan Newtoniaanse vloeistoffen zoals water. PLA gedraagt zich als een pseudoplastische vloeistof, wat wil zeggen dat het onder invloed van verhoogde schuifspanning een lagere viscositeit krijgt. De polymeerketens die zich in een stroming bevinden, hebben de neiging om zich gelijk te oriënteren onder invloed van schuifspanningen. Als de schuifspanning dan plots verdwijnt, wanneer de stroming een buis verlaat bijvoorbeeld, hebben die ketens de neiging om zich plots terug op te krullen. Daardoor neemt de diameter van de stroming toe. [12] Dit staat verder geïllustreerd in figuur 9.



figuur 9: Schematische weergave van die swell [13]

Het effect van die swell op de diameter hangt ook af van factoren zoals de snelheid, temperatuur, etc. waardoor de precieze diameter moeilijk te voorspellen is. Daarom is er gekozen om het gat in de nozzle een diameter te geven van 1,5 mm, iets kleiner dan de nodige 1,75 mm. Indien dit niet geschikt blijkt te zijn, kan altijd een nozzle met een andere en betere diameter gemaakt worden.

De technische tekeningen van nozzle zijn te vinden in bijlage 2. Dit is in principe een cilindervormig object dat in de holle buisvorm van de loop past (\varnothing 16mm). Dit is geen vaste passing, aangezien de nozzle af en toe eraf moet. Om die op zijn plaats te houden is een klein gat (M3) geboord door de loop en in de nozzle. Door hier een kleine schroef in te draaien, wordt voorkomen dat de vloeistofdruk de nozzle uit de loop duwt. Verder zit er op uiteinde van de nozzle nog een flens, die in kleine mate als koelvin fungeert.

2.3 Thermische aspecten

Zoals onder het puntje “extrusieproces” werd verteld, wijkt deze kleinere uitvoering af van de standaard extruder op het vlak van smeltenergie. In plaats van wrijving tussen de pellets als belangrijkste warmtebron te gebruiken, wordt een verwarmingselement gebruikt. Het gebruikte verwarmingselement is te zien op figuur 10.

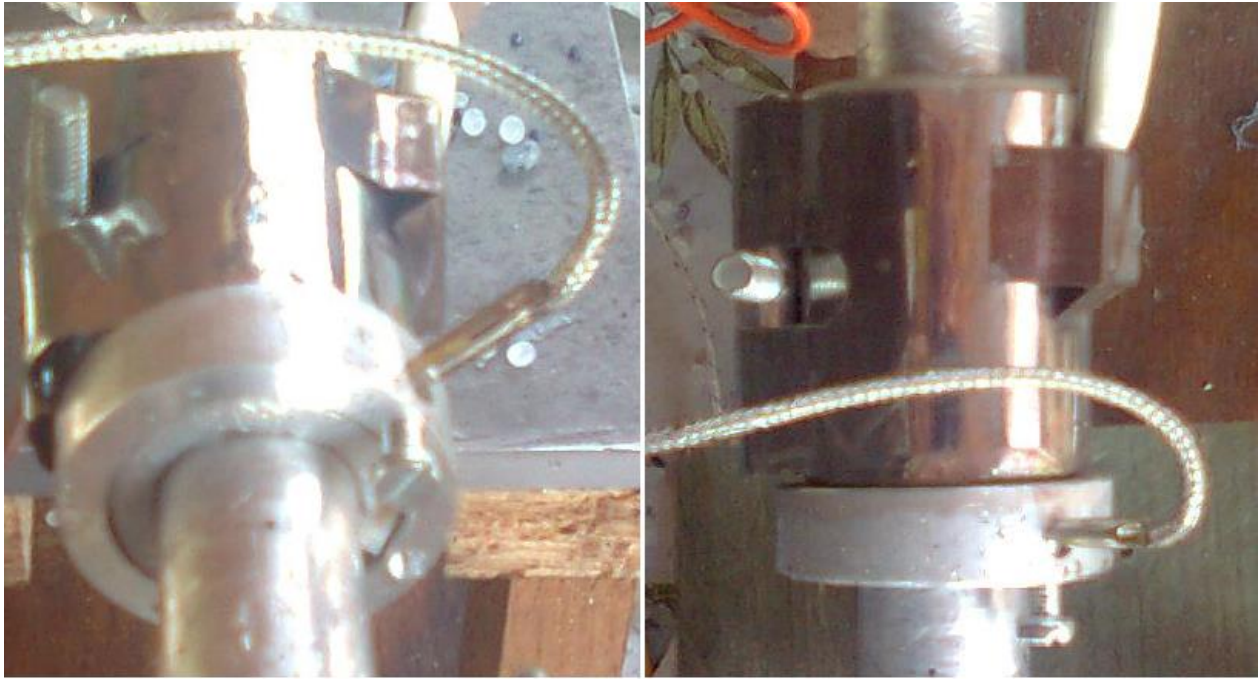


figuur 10: Verwarmingselement [14]

Dit type werkt op 220V, kan 300W leveren, is 50mm lang en heeft een inwendige diameter van 30mm. De maximum gebruikstemperatuur is 330 °C. Het is belangrijk dat die diameter groter is dan de uitwendige diameter van de loop, waar het verwarmingselement op komt te zitten. Er moet immers een manier voorzien worden om een thermokoppel tegen de wand van de loop te bevestigen, om zo een gesloten kringloop te maken en uiteindelijk een bepaalde temperatuur te handhaven. Dit wordt verder besproken bij de elektronische aspecten.

Zodoende bevindt er zich nog een hol cilindrisch stuk tussen het verwarmingselement en de loop. De buitendiameter hiervan is 30 mm en de binnendiameter 19,95 mm. In principe zit dit stuk dus met een vaste passing rond de loop, waardoor het niet kan verschuiven. Om het toch verstelbaar te maken, is de wand doorgeslepen op één punt aan de omtrek. Door een wig in deze speelt te drijven, neemt de binnendiameter zeer licht toe, en komt het stuk lossere te zitten waardoor het toch verschoven kan worden.

Het verwarmingselement heeft ook zijn eigen klemsysteem. Het is in principe ook een holle cilinder, maar deze is evenzeer niet volledig gesloten over de omtrek. Met een bout met als kop een inbus, kan het verwarmingselement vast of los gedraaid worden rondom een cilinder van 30 mm.



figuur 11: Verwarmingselement en thermokoppel

Het thermokoppel komt zo dicht mogelijk bij de warmtebron te staan, zodat de vertraging tussen het aansturen van het warmte-element en het meten van de temperatuursveranderingen geminimaliseerd wordt. Zoals op figuur 11 te zien, bevindt het thermokoppel zich op enkele mm van de rand van het verwarmingselement. De kop van het thermokoppel is cilindrisch van vorm en 5,5 mm dik, en zit tegen de wand van de loop aan. Er zit dus een gat ($\text{Ø } 6 \text{ mm}$) in de holle cilinder die het verwarmingselement met de loop verbindt. Om het thermokoppel op zijn plaats te houden, zit hier nog een holle cilinder met wanddikte 5 mm en lengte 10 mm rond. Hierin zit evenzeer een gat (ook $\text{Ø } 6 \text{ mm}$, dit wordt gealigneerd met het andere gat) om het thermokoppel door te steken. Haaks hierop zit een gat met schroefdraad (M4x0,70, zie ook figuur 11). Hierdoor wordt een schroef in gedraaid waarmee verhinderd wordt dat het thermokoppel uit de gaten kan komen.

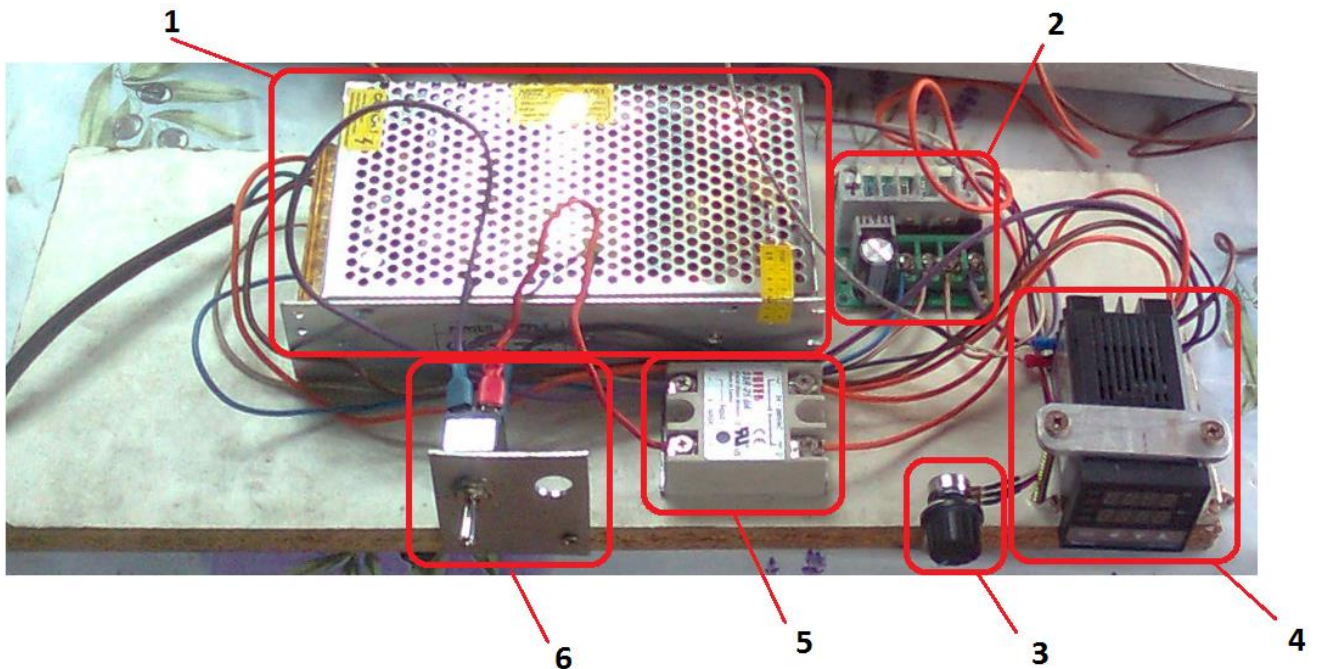
Zoals op de figuren te zien, zijn deze stukken allemaal uit aluminium gemaakt. Dit heeft immers een zeer goede thermische geleidbaarheid, wat de thermische koppeling tussen het verwarmingselement en de binnenkant van de loop bevordert.

Wat de isolatie betreft, is er gebruik gemaakt van glaswol. Deze heeft een maximale bedrijfstemperatuur van 250 tot 400 °C. [15] Aangezien de testtemperaturen nooit hoger oplopen dan 220 °C, zou dit normaal ook geen problemen mogen geven. De isolatie is telkens in stukken gesneden van een bepaalde breedte en wordt enkele keren rond het te isoleren deel gewikkeld en daarna met één laag aluminiumfolie omgeven om de glaswol vast te houden en af te schermen van de omgeving. Hierna wordt het geheel nog met enkele elastieken of ijzerdraad omgeven om de vorm te behouden. In principe kan het verwarmingselement genoeg warmte-energie produceren om de nodige bedrijfstemperatuur te handhaven. De isolatie dient dan ook vooral om energie te besparen en om de warme delen af te schermen.

2.4 Elektronische aspecten

Naast de werkende componenten van de extruder zelf, is er ook een elektrische en elektronische aansturing nodig om die componenten correct te laten werken. Zo is er een motorsturing nodig, zodat de draaisnelheid van de extrusieschroef kan variëren, maar evenzeer een mechanisme om een zekere temperatuur te handhaven. Om de orde te bewaren zijn alle componenten op een houten plank bevestigd. De aanwezige elektronische elementen zijn in figuur 12 met een cijfer aangeduid:

1. De power supply
2. Spanningsregelaar
3. Draaiknop
4. Temperatuurcontroller
5. Relais
6. Schakelaar



figuur 12: Elektronische aspecten

2.4.1 De power supply

De functie van dit element is zoals de naam het zegt de installatie van vermogen te voorzien. De motor om de extrusieschroef aan te drijven werkt op 12 V en kan dus niet direct aan het net gekoppeld worden. De power supply moet dus de netspanning van 230 V omzetten in 12 V. De netspanning komt binnen via de dikkere zwarte kabel. Aan de uitgangen van de power supply wordt dankzij de interne elektronica 12 V ter beschikking gesteld. De specificaties van de power supply zijn te vinden in bijlage 3.

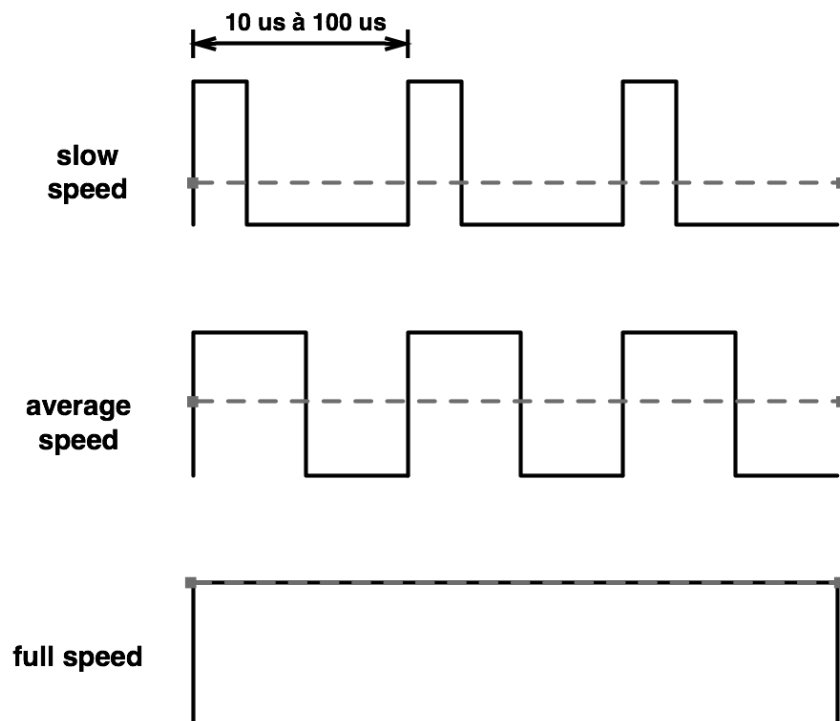
Belangrijk is dat er gekozen werd voor het 20 A-model. Dit model kan steeds de gevraagde stromen leveren, zelfs wanneer de DC-motor geblokkeerd is. Zoals in 2.2.2 werd gezegd, is de piekstroom voor de motor 6A. Het 20A-model kan deze stroom leveren, en nog genoeg overhouden voor het leveren van stroom aan andere apparatuur (bijvoorbeeld een extra motor, ventilator, ...)

2.4.2 Spanningsregelaar

Wanneer er enkel gebruik gemaakt zou worden van een voeding, zou er ook enkel 12 V ter beschikking zijn, en zou de motor maar aan één enkele snelheid kunnen draaien bij een gegeven tegenkoppel. Aangezien het type motor een permanente magneetmotor is, is de sterkte van het magnetisch veld constant, het wordt niet beïnvloed door de situatie van het anker. Dit houdt ook in dat bij eenzelfde koppel, het toerental van de DC-motor recht evenredig is met de ankerspanning. Door dus de spanning over het anker te laten variëren, kan men het toerental evenredig laten variëren. [16]

De spanning komende van de power supply is 12 V en is constant. De spanningsregelaar en de draaiknop (respectievelijk nummer 2 en 3 op figuur 12) hebben de functie deze spanning onderaf te regelen. Ze doen dit met behulp van pulsbreedtemodulatie, vaak afgekort tot PBM of PWM in het Engels. De bedoeling hiervan is om, vertrekkende van een vaste ingangsspanning, een lagere spanning te vormen door continu aan en uit te schakelen. De gemiddelde spanning die dan verkregen wordt is de gemiddelde waarde gedurende één cyclus (zie figuur 13).

In principe schakelt de motor dus telkens aan en terug uit. De cyclustijden zijn echter zo kort, dat de motor niet de tijd krijgt om volledig op toeren te komen of terug uit te bollen. De schakelfrequentie is immers veel te hoog daarvoor (hier: 13 kHz). Zodoende blijft de motor steken op een tussensnelheid, en lijkt het alsof hij draait op de gemiddelde spanning van de cyclus. Hoe breder de stukken van maximale spanning of “pulsen”, hoe hoger de gemiddelde spanning en hoe sneller de motor draait. Vandaar de naam “pulsbreedtemodulatie”.

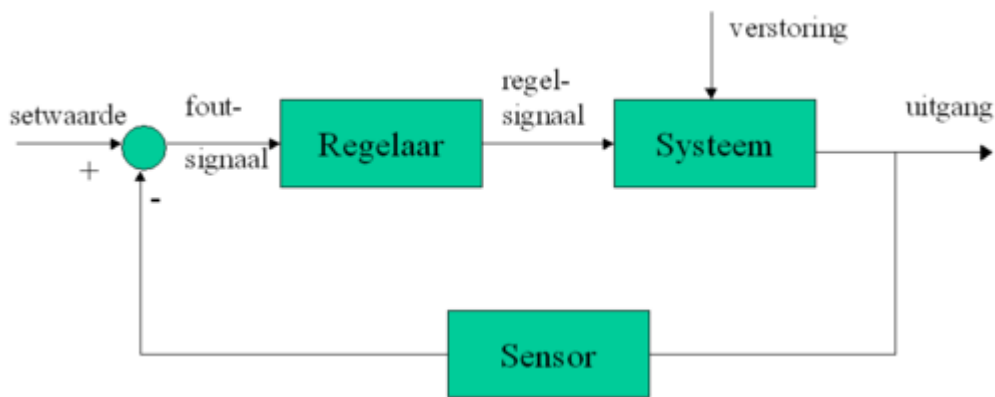


figuur 13: Voorbeeld van PWM [17]

Door de stand van de draaiknop te veranderen, kan de gemiddelde spanning gewijzigd worden en dus een ander toerental bekomen worden. De maximale spanning is de voedingsspanning (12 V). Dit komt overeen met een toerental van 46 omw/min. Volgens de specificaties (zie bijlage 4) is de minimaal haalbare pulsbreedte 10%. Dankzij de spanningsregeling kan er dus een toerental bereikt worden tussen 4,6 en 46 omw/min.

2.4.3 Temperatuurcontroller

De temperatuurcontroller (nummer 4 op figuur 12) heeft als doel de loop een zekere temperatuur te laten bereiken en deze te behouden. Hiervoor is een gesloten systeem nodig. Inwendig wordt een bepaalde setwaarde ingesteld. Dit is de gewenste temperatuur, die met enkele simpele pijltjestoetsen kan ingegeven worden. Die waarde verschijnt ook op het display en wordt vergeleken met de waarde van het thermokoppel, dat continu de temperatuur meet aan de wand van de loop (zie 2.3) en dus dienst doet als sensor. Inwendig wordt de fout van de gemeten waarde tot de setwaarde omgezet in een regelsignaal. Dat regelsignaal stuurt het verwarmingselement aan. De storingen op het systeem zijn invloeden zoals convectie, straling, conductie, kortom de fysische verschijnselen die het systeem terug willen afkoelen. Deze zijn continu aanwezig en ook variabel in de tijd.



figuur 14: Illustratie van een gesloten systeem [18]

Het gebruikte type regelaar is de meest voorkomende PID-regelaar. Deze combineert de voordelen van een P-, I- en D-regelaar. De proportionele of P-actie versterkt eenvoudig de fout tussen de setwaarde en de gemeten waarde. Hierdoor zal de regelaar een signaal uitsturen dat de uitgangswaarde van het systeem zal laten veranderen in de richting van de setwaarde. Er is echter altijd een standfout: wanneer de gewenste waarde bereikt wordt, is de fout nul en de versterking ervan ook nul. De altijd aanwezige storingen, de continue afkoeling in dit geval, zullen continu de uitgangswaarde doen afwijken van de gewenste waarde. Indien de storingen constant zijn in de tijd, zal er een regelsignaal uitgestuurd worden dat net voldoende is om de storingen te compenseren. Een blijvende standfout is echter het gevolg.

Om die standfout te compenseren, is een integrerende of I-regelaar aan het systeem toegevoegd. Deze integreert de waarde van fout over de tijd. In het geval van een standfout zal de geïntegreerde

waarde constant toenemen. Er zal dus enkel een evenwicht mogelijk zijn tussen regelsignaal en verstoringen wanneer er geen verschil is tussen setwaarde en gemeten waarde.

De differentiërende of D-actie is toegevoegd voor het stabiliserend effect dat deze heeft op de regelkring. [19]

De groottes van de P-, I- en D- regelaar kunnen ingesteld worden via de knoppen van de display. Belangrijk hierin is dat deze niet oneindig groot kunnen zijn: een zeer grote P- of I- waarde zouden het systeem instabiel maken en hevig laten schommelen rond de setwaarde. Deze waarden zijn echter ook beperkt door het maximale thermische vermogen van het verwarmingselement.

De aansturing van het verwarmingselement is het tweede belangrijke aspect van de werking van de temperatuurcontroller. Een normale PID-regelaar krijgt een variabele waarde als foutsignaal binnen en stuurt een variabele waarde uit als regelsignaal. Dit is bij de gebruikte PID-regelaar niet het geval. Die zou dan als vermogenbron moeten fungeren en een waarde tussen 0 en 230 V naar het verwarmingselement moeten sturen. Dit zou de regelaar veel groter en duurder maken dan nu het geval is.

Er is echter een andere oplossing: in plaats van een variabele waarde uit te sturen, wordt een spanning van 12V uitgestuurd. Deze is echter niet continu, maar schakelt aan en uit volgens het principe van PBM, zoals beschreven bij de spanningsregelaar. Zo kan er toch een variabele gemiddelde waarde worden uitgestuurd. Deze spanning wordt vervolgens naar een relais gestuurd (nummer 5 op figuur 12). Dit relais zal ervoor zorgen dat een contact van 230 V gesloten wordt zolang er 12 V over de andere kant van het relais staat. De waarde tussen 0 en 12 V wordt dus omgezet naar de overeenkomstige waarde tussen 0 en 230 V.

De regelaar is ook meteen galvanisch gescheiden van het verwarmingselement, zodat die niet als vermogensbron fungeert maar enkel als sturelement. Het contact van 230V, binnen het relais, bevindt zich in de vermogenskring van het verwarmingselement, en zal dit ook aanschakelen als het contact gesloten is.

Om de temperatuurcontroller handmatig aan of uit te schakelen, is er een aparte schakelaar voorzien (nummer 6 op figuur 12). Die bevindt zich in de 12 V-stuurkring van de PID-regelaar en de laagspanningskant van het relais. Slechts wanneer deze schakelaar is aangeschakeld kan de PID-regelaar in werking treden.

Belangrijk om hierbij op te merken is dat de PBM-frequentie van het uitgestuurde signaal een veel lagere frequentie heeft dan die van de spanningsregelaar. Een relais is immers een mechanisch element dat niet oneindig veel kan schakelen. De PID-regelaar is gemaakt om een relais aan te sturen, en houdt hier rekening mee. Daarom duren de cycli enkele seconden, en geen tientallen microseconden zoals bij de sturing van de motor. Dit is echter geen probleem voor de handhaving van de gewenste temperatuur: de temperatuur van de loop verandert veel trager dan de snelheid van de motor, en kan vrijwel constant gehouden worden (ingestelde waarde ± 2 °C in stabiele omstandigheden, zo blijkt uit de tests). De datasheets van de het relais en de schakelaar zijn te vinden in de bijlagen (respectievelijk bijlage 5 en bijlage 6).

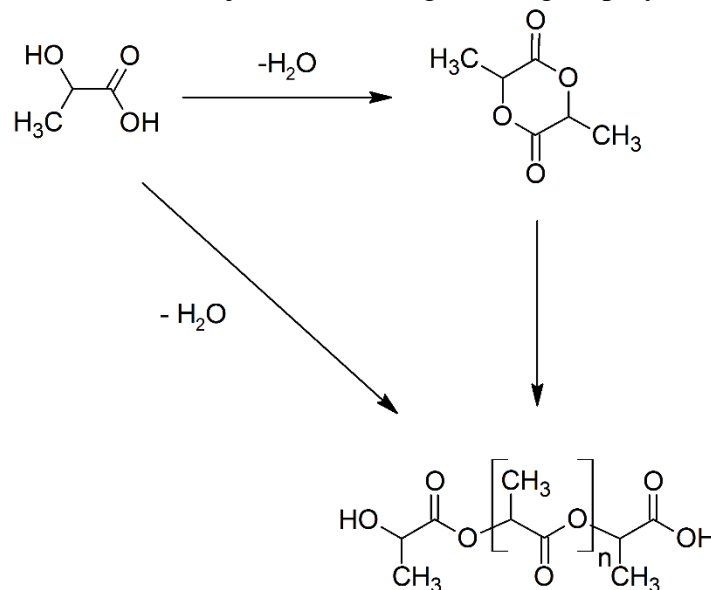
3 Polymelkzuur

3.1 Algemeen

De stof die gebruikt wordt doorheen de hele masterproef is PLA of polymelkzuur (Eng.: polylactic acid). Dit is een thermoplastisch polymeer dat de laatste jaren aan populariteit wint omdat het wordt geproduceerd uit hernieuwbare plantaardige stoffen. Voorbeelden hiervan zijn maïszetmeel en suikerriet. Dit zijn duurzame grondstoffen, in tegenstelling tot traditionele aardolie die gebruikt wordt voor de productie van de meest gebruikte polymeren. [20]

3.2 Productie van PLA

Voor het creëren van lange polymeerketens vertrekt men van het monomeer melkzuur en het cyclisch diëster lactide. Deze stoffen zijn respectievelijk links- en rechtsboven op de onderstaande figuur te zien. Melkzuur is een organische stof die zowel natuurlijk als synthetisch geproduceerd kan worden. Deze stof kan via directe condensatie omgezet worden tot een polymeer. Hierbij komen echter veel watermoleculen vrij die de vorming van langere polymeerketens verhinderen.

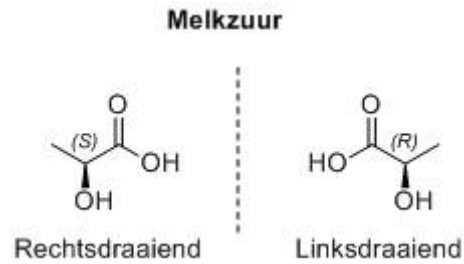


figuur 15: De synthese van PLA [21]

Daarom wordt de polycondensatie stapsgewijs uitgevoerd. Er worden korte stukken keten of oligomeren gevormd. De vrijgekomen watermoleculen worden verwijderd (bv. door het blootstellen aan vacuüm) en vervolgens worden de oligomeren verder gecombineerd tot langere polymeerketens.

Het melkzuur heeft echter nog een invloed op het geproduceerde PLA. Melkzuur is een chiraal molecule. Er bestaan 2 isomeren van melkzuur, die optisch gezien het spiegelbeeld van elkaar zijn. De ene wordt rechtsdraaiend of L-melkzuur genoemd en de andere linksdraaiend D-melkzuur, te

zien in figuur 16. L-melkzuur is een lichaamseigen stof, die bijvoorbeeld in het spierweefsel geproduceerd wordt. Het melkzuur dat zich in zure melk bevindt, is dan weer een mengeling van L- en D-melkzuur, dit wordt ook racemisch melkzuur genoemd.



figuur 16: Isomeren van melkzuur [22]

Het soort melkzuur dat gebruikt wordt om PLA te produceren zal ook bepalen welk soort PLA er verkregen wordt. Er bestaat dus een onderscheid tussen poly-l-melkzuur of PLLA, poly-d-melkzuur of PDLA en poly-l/d-melkzuur of racemisch PLA. [23]

3.3 Eigenschappen van PLA

De eigenschappen van de verschillende soorten zuiver PLA liggen duidelijk uiteen. PLLA heeft een kristalliniteit van 37%, een T_g van 60 - 65 °C en een T_m van 173 - 178°C. Omdat PLLA het snelst biologisch afbreekt, wordt deze het vaakst gebruikt in de medische sector, voor hechtingen etc.

Door PLLA te mengen met PDLA neemt de thermische stabiliteit toe. Zo wordt het meer hitte-resistent (mechanische sterkte blijft behouden tot 110°C) en stijgt T_m tot in het bereik van 170 tot 230 °C. Ook T_g en de kristalliniteit nemen toe.

Het stijgen van T_g en T_m is goed voor de hitteresistentie van het polymeer. Een polymeer dat zijn sterkte behoudt bij hogere temperaturen wordt gezien als een polymeer met hogere kwaliteit. De hoge kristalliniteit zorgt er echter voor dat PLA in zijn zuivere vorm behoorlijk broos is . Het is daarom gewenst dat er additieven of andere stoffen worden toegevoegd aan het polymeer om het taaier te maken. [24]

3.4 Additieven

De voornaamste additieven die aan PLA worden toegevoegd om het sterker te maken, zijn weekmakers of impact modifiers. Zoals de naam het zegt: ze vergroten de impactenergie nodig om het materiaal te breken. Een bros materiaal, zoals zuiver PLA, heeft een relatief hoge elasticiteitsmodulus (kortweg E-modulus) maar een beperkte breukrek. Wanneer men zo een materiaal probeert te vervormen zal het opeens bros breken en daarbij relatief weinig energie opnemen. Impact modifiers vergroten die energie door de breukrek te verhogen en daarbij de E-modulus liefst zo weinig mogelijk te verlagen. Hierdoor wordt het polymeer taaier.

Additieven zijn een wereld op zich, er bestaan talloze soorten additieven die een bepaald effect kunnen bekomen op de eigenschappen van plastics. Zodoende is een bedrijf dat PLA produceert

continu op zoek naar de beste combinatie van additieven om de eigenschappen van hun PLA te optimaliseren. Daardoor is het ook moeilijk om te achterhalen welke additieven er nu precies in de geleverde PLA zitten. Enkele mogelijkheden zijn:

- Ethyleen copolymeer additieven (bv. Biomax Strong 100 van Dupont): deze verhogen de taaiheid, flexibiliteit en impactenergie zonder de transparantie te beïnvloeden, toevoegd in grootteordes van 1 tot 5 wt%. [25]
- Fda compliant polymer PLA modifier (bv. Biomax Thermal 300) : verhoogt de thermische stabiliteit tot 95°C door toevoegen van 2 tot 4 wt%. [26]
- High aspect ratio carbonate-based engineering materials (bv. EMforce Bio van Specialty Mineral) : deze mineraaldeeltjes vertragen scheurpropagatie en verhogen de impactenergie. [26]

De bijkomende eisen die aan deze additieven gesteld worden zijn enerzijds dat ze de optische transparantie van de stoffen niet beïnvloeden. Anderzijds mogen ze ook het biodegradeerbaar gedrag van PLA niet beïnvloeden.

Dit soort additieven wordt met het basis-PLA in de pellets verwerkt. Deze pellets worden daarna geleverd aan andere bedrijven die ze verwerken tot specifieke producten. Na het ondergaan van deze verwerkingsprocessen (bv. extrusie, spuitgieten, ...) beschikken de producten over de gewenste mechanische eigenschappen. Dit impliceert dus ook dat de werking van de additieven niet gewijzigd wordt door het ondergaan van deze verwerkingsprocessen.

Andere additieven, zoals kleurmiddelen, beïnvloeden doorgaans enkel de optische eigenschappen, en hebben geen invloed op de mechanische eigenschappen. Ze worden vrijwel altijd in pelletvorm toegevoegd aan de basis PLA-pellets, meestal in de grootteorde van 4 wt%. De 2 soorten pellets worden zo uniform mogelijk gemengd en vervolgens verwerkt. [27]

3.5 Degradatie

Het belangrijkste nadeel van het verwerken van PLA is dat het thermisch degradeert wanneer het zich in gesmolten toestand bevindt (boven T_m , 170 – 230°C). Dit degraderen houdt in dat de lange polymeerketens met hoog moleculair gewicht zullen breken. Hierdoor ontstaat terug lactide, de stof die nodig was om de ketens te vormen door polycondensatie.

Er zijn 2 belangrijke factoren die de hoeveelheid degradatie beïnvloeden: de temperatuur van de smelt en het tijdsinterval waarin het PLA op die temperatuur gehouden is. Hoe hoger de temperatuur en hoe groter de tijdsspanne, hoe meer degradatie er optreedt in het polymeer.

Er is echter nog een factor die de degradatie versterkt: de aanwezigheid van water. H₂O is namelijk de stof die werd afgesplitst tijdens de polycondensatiereactie. Dit is echter een omkeerbare reactie. De ketens kunnen in de juiste omstandigheden evenzeer breken wanneer er water aanwezig is. Het toevoegen van water versterkt daarom ook aanzienlijk de degradatie van lange polymeerketens tot kortere ketens bij temperaturen boven T_g (afhankelijk van het PLA, vanaf 55°C).

Omdat degradatie inhoudt dat de lengte van polymeerketens afneemt en dus dat het gemiddelde moleculair gewicht (M_n) zakt, wordt de graad van degradatie uitgedrukt in de relatieve daling van het gemiddelde moleculair gewicht. [28]

Bij een test tijdens werd M_n gemeten voor en na het extruderen van PLA in verschillende omstandigheden. Initieel bedroeg M_n 40.000 g/mol voor gedroogde PLA pellets. Er werden bij 2 schroefsnelheden en temperaturen M_n -waarden gemeten. Ook werd een test uitgevoerd met “vochtige” pellets, deze bevatten 0,3 w% water, oftewel 3 g water per kg PLA. [29] De resultaten zijn zichtbaar in de volgende tabel:

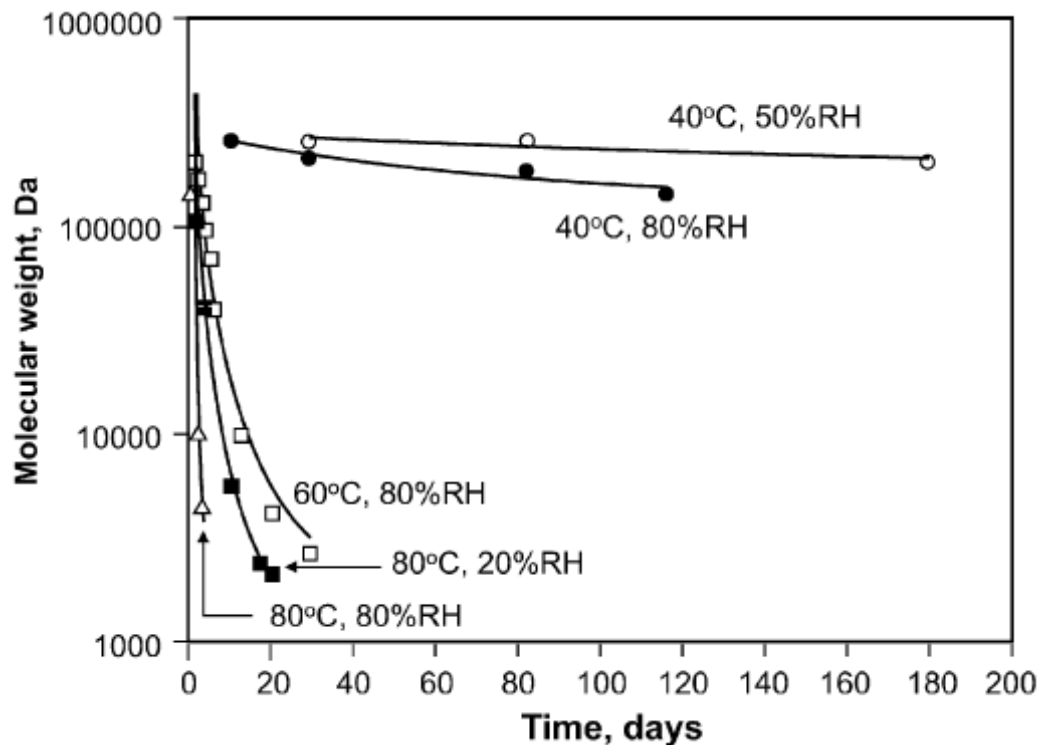
Tabel 1: Test m.b.t. degradatie PLA

Temperatuur [°C]	210	240	210 (vochtig)
M_n [g/mol] bij $n = 120$ rpm	33.600	25.600	18.400
M_n [g/mol] bij $n = 20$ rpm	30.200	13.600	12.000

Deze resultaten illustreren hoe een verhoogde extrusietemperatuur steeds een negatief effect heeft op M_n en dus degradatie bevordert. Een lagere schroefsnelheid houdt in dat het materiaal langer in een bepaalde temperatuurzone is gebleven en dus evenzeer verder gedegradeerd is. Ook de aanwezigheid van water verlaagt M_n aanzienlijk.

Om degradatie te verminderen mag de werkingstemperatuur in de extruder dus niet te hoog zijn. Ook moet er voldoende doorstroming van materiaal gebeuren, zodat het PLA niet te lang boven zijn smelttemperatuur blijft.

Wat water betreft, wordt steeds aangeraden om de pellets eerst te drogen voordat ze verwerkt worden, op een temperatuur van 60 – 100°C, gedurende enkele uren. Het bewaren van PLA moet dan logischerwijze ook in een droge omgeving gebeuren. De temperatuur hiervan moet ook lager zijn dan T_g . Degradatie o.i.v. H_2O begint namelijk vanaf T_g en de snelheid ervan neemt verder toe met de temperatuur. Deze snelheid is veel kleiner dan die bij het verwerken boven T_m , maar toch significant wanneer het over opslag gedurende meerdere dagen gaat. Dit staat geïllustreerd in figuur 17.



figuur 17: Afname M_n i.f.v. de tijd in verschillende omstandigheden [30]

Hieruit valt af te leiden dat een omgeving met temperatuur boven T_g en een hoge relatieve vochtigheid (RH) het gemiddelde moleculair gewicht sterk reduceert over meerdere dagen tijd. Bij lagere temperaturen en relatieve vochtigheden treedt er vrijwel geen degradatie op. Het bewaren van PLA kan dus perfect gebeuren in normale omstandigheden (bv. op een kamer-temperatuur van 20°C, bij 50% rel. vochtigheid).

De reden waarom degradatie van PLA tot moleculen met een laag moleculair gewicht voorkomen moet worden, is dat het de elasticiteit beïnvloedt. Het materiaal zal minder flexibel worden en een lagere treksterkte hebben. Ook de impactenergie daalt sterk. [30] Met andere woorden: het gedegreerde materiaal is brosser. Dit is vrijwel nooit gewenst aangezien het PLA na het vormgevingsproces nog dienst moet doen. Men moet echter niet vergeten dat dit juist de voornaamste eigenschap is van PLA: de bioafbreekbaarheid. Dit is een van de belangrijkste redenen voor de populariteit van PLA.

4 Testresultaten

4.1 Test met misprints

4.1.1 Algemeen

Het bouwen van de extruder heeft iets langer dan 3 weken geduurd. Hierna was het prototype gereed om te testen. Het idee was om uit de tests mogelijke verbeteringen af te leiden, en aan de hand daarvan elementen te wijzigen of toe te voegen om de prestaties van de extruder te verbeteren.

De eerste test is gebeurd met materiaal afkomstig van misprints. Er werd enkel materiaal van dezelfde kleur (wit PLA) gebruikt. Er is echter nog geen voorziening gemaakt om deze misprints om te zetten tot vormen die klein genoeg zijn om het extrusieproces te doorlopen. Daarom zijn de misprints met behulp van een handbediende grote knipschaar (normaal bedoeld om metaalplaten door te knippen), en een kleinere zijknijptang tot kleinere stukjes herleid.



figuur 18: Geknipte misprints

Deze stukjes hebben afmetingen die nooit groter zijn dan ongeveer 5 mm. Wat wel opvalt is dat ze totaal niet afgerond zijn, en behoorlijk scherpe kanten hebben. Dit zorgt er in de eerste instantie voor dat de stukjes sterk de neiging hebben om te blokkeren in de trechtersvorm van de voedingszone. De beste manier om dit te voorkomen is door de stukjes slechts met kleine hoeveelheden tegelijk toe te voeren, en continu te controleren of ze wel door de schroef worden meegenomen. De schroef neemt bij elke omwenteling één of twee van zulke stukjes mee. Indien een stukje maar half mee kan, raakt het geklemd tussen de rand van de schroef en de rand van de loop. Dit blijkt echter geen probleem: de rand is behoorlijk scherp, en de motor levert genoeg koppel om het blokkerende stukje ter plekke door te snijden. Dit gaat gepaard met een kleine dip in de draaisnelheid van de schroef.

Wat het verwarmingselement betreft, is er gekozen om dit in eerste instantie in het midden te zetten over de lengte van de loop (zie figuur 19). Hiervoor zijn twee redenen. Enerzijds zou dit ervoor moeten zorgen dat het materiaal voldoende vloeibaar is tegen de tijd dat het bij de nozzle aankomt.

Zo kan er geen eventuele verstopping optreden. Anderzijds zal de extruder in latere tests ook PLA-pellets moeten verwerken. Die hebben echter geen specifieke kleur, dat wordt immers bekomen door extra kleurpellets toe te voegen. Het geproduceerde filament moet echter uniform van kleur zijn. Om dit te bekomen moet de smelt van beide soorten pellets goed gemixt worden. Dit gebeurt voornamelijk wanneer de smelt nog door de extrusieschroef wordt bewogen. Vandaar dat de smelt zich over een zeker lengte van de schroef moet zitten. Om deze twee redenen lijkt het logisch om het verwarmingselement op een zekere afstand van de nozzle te zetten.



figuur 19: Initiële plaatsing van het verwarmingselement

Zoals nog op figuur 19 te zien is, is er zowel voor als achter het verwarmingselement isolatie aangebracht. Dit zorgt ervoor dat de temperatuur van en in de loop meer gelijkmatig is, en over het algemeen ook hoger. Zonder isolatie zou de smelt bij het bereiken van de nozzle al terug kunnen stollen. De ingestelde temperatuur voor deze test is 220 °C, voldoende hoog in het smeltgebied van 170 – 230 °C.

Het toerental varieert tussen 15 en 35 omw/min, hoewel de ideale draaisnelheid rond de 25 omw/min ligt. Bij dit toerental is het nog net haalbaar om te volgen met de materiaaltoevoer, bij een hoger toerental draait de schroef te snel om continu materiaal toe te voegen via de trechter.

4.1.2 Resultaten eerste test

Eens er voldoende materiaal is toegevoegd, begint er zoals verwacht materiaal uit het gat in de nozzle te komen. Dit betekende al meteen één ding: de functie van een extrusieschroef kan in deze omstandigheden volledig vervuld worden door een boorschroef. De eerder genomen keuze om geen dure extrusieschroef aan te kopen maar gewoon een goedkopere standaard boorschroef, was dus de juiste. Deze boorschroef zorgt evenzeer voor materiaaltransport en drukopbouw, zoals de eerste test bewijst.

In figuur 20 zijn enkele voorbeelden te zien van het eerste filament dat de extruder heeft geproduceerd. Meteen valt op dat het PLA geenzins de neiging heeft om als draad met continue dikte uit de extruder te komen. Er is ook nog geen systeem voorzien om de draad te ondersteunen of op te rollen. Zodoende heeft de draad de neiging om op te krullen of aan de nozzle te blijven plakken. Als men de draad uitrekt vormt deze zeer dunne en lange vezels vooraleer te breken.



figuur 20: Enkele voorbeelden van filament uit de eerste test

De snelheid waarmee de draad uit de extruder komt, of kortweg extrusiesnelheid is ongeveer 1 à 2 millimeter per seconde. Om het transport van de vaste stukjes PLA naar de smeltzone te bevorderen, is de extruder onder een hoek van 10° met de horizontale geplaatst. De transportrichting binnen de loop is dus neerwaarts gericht. Dit is ingevoerd omdat de vaste stukjes PLA soms de neiging hebben om op te stropen voor ze de smeltzone bereiken. Op het einde van de test is de nozzle eraf gehaald zodat de loop kan leeglopen. Dit zijn de dikkere “koeken” die rechts op het schaalte liggen op figuur 20.

Het belangrijkste resultaat dat de eerste test heeft opgeleverd, is dat het geëxtrudeerde materiaal veel brosser is dan verwacht. Hiervoor zijn geen speciale tests nodig: een aangekochte filamentdraad is plooibaar, taai, en zal eerst verkleuren op plaatsen waar plastische vervorming voorkomt, om vervolgens daar in te snoeren en te breken. Bij het eerste geproduceerde filament is direct duidelijk dat dit niet het geval is: wanneer de draad wordt geplooid breekt ze vrijwel direct zonder veel te buigen. De geproduceerde filamentdraad is aanzienlijk brosser dan de aangekochte draad. De literatuurstudie die achteraf is uitgevoerd (het hoofdstuk over Polymelkzuur) geeft enkele mogelijk verklaringen, nl. chemische degradatie en het verminderen van het effect van additieven.

Tijdens de eerste test leek het verdampen van additieven of het verminderen van het effect ervan de belangrijkste oorzaak. De additieven zorgen voor het taaiere worden van het PLA dat in zuivere vorm behoorlijk broos is. Het is niet uit te sluiten dat die additieven verdampen tijdens de verwerkingsprocessen van het materiaal: enerzijds is er het extruderen van pellets om zo filament te vormen, en anderzijds is er het 3D-printen zelf. In beide processen wordt het materiaal kortstondig gesmolten om er zo de vorm te kunnen veranderen.

4.2 Test met pellets

4.2.1 Algemeen

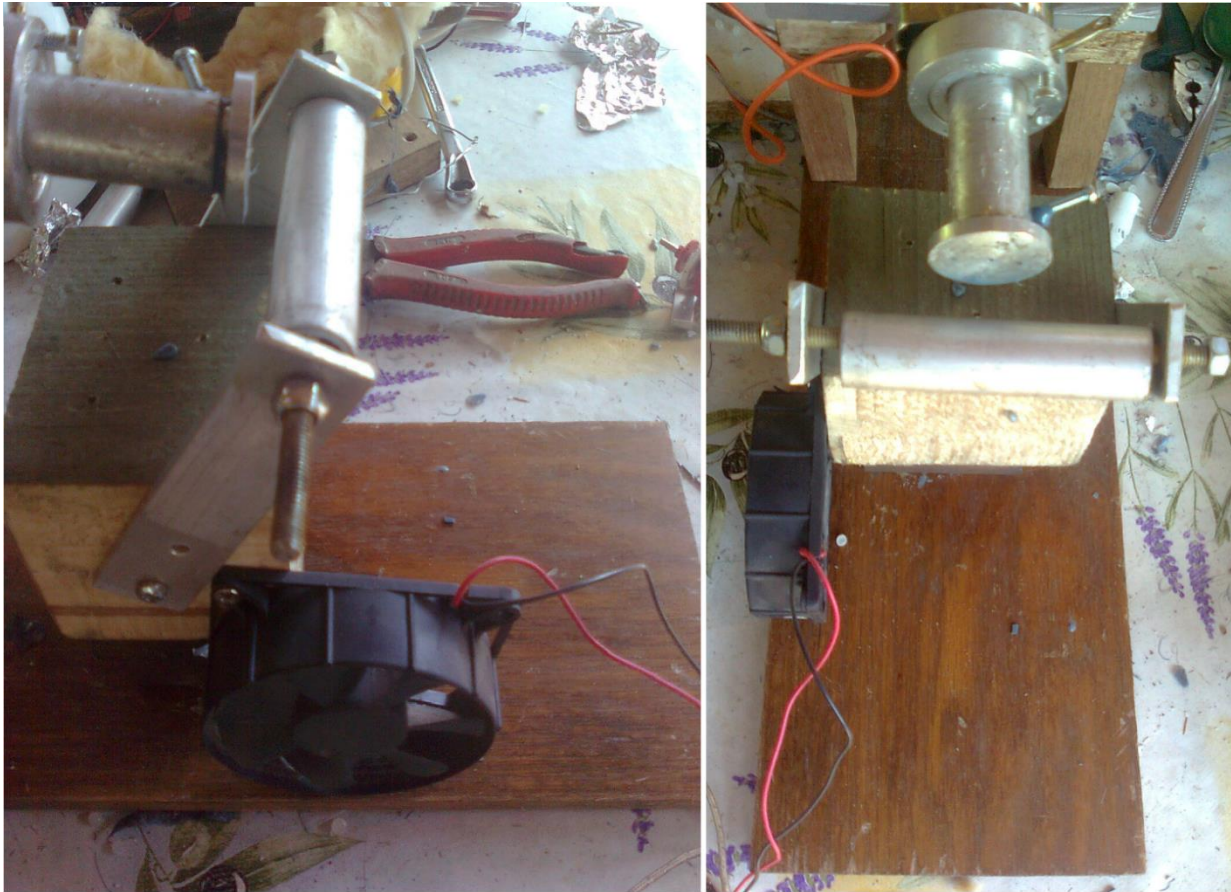
Om uit te kunnen sluiten dat het printen van PLA effect heeft op de invloed van de additieven, wordt de test herhaald zonder iets aan de extruder zelf te veranderen. In plaats van fijngesneden misprints wordt er echter gebruik gemaakt van echte PLA-pellets, die ook in de industrie gebruikt worden in grote extrudeerinstallaties. Deze zijn ingekocht bij het bedrijf Colorfabb, dat zowel filament van alle soorten en kleuren als pellets verkoopt. [3]

4.2.2 Toegevoegde elementen

De verse filamentdraad van de vorige test had de neiging om te krullen, tegen de nozzle te blijven plakken, en zo nog verder te krullen in allerlei grillige vormen. Om dit te voorkomen moet er ergens een systeem voorzien worden om de draad weg te leiden van de nozzle, en op te laten rollen, en liefst onderweg te koelen. Door de temperatuur te reduceren zal de draad zich meer gedragen als een viskeuze vaste stof, die niet de neiging heeft om ergens aan te blijven plakken.

Voor de test met pellets is er dan ook een mechanisch element toegevoegd. Het lijkt zo te zijn dat het ondersteunen van het filament best kan gebeuren vlak nadat het uit de nozzle komt. Daarom is er een aluminium rol geplaatst ongeveer 1,5 cm achter het gat in de nozzle en 0,5 cm eronder (zie figuur 21). De draad zal over de rol lopen, en daarna naar beneden zakken, in dit geval ongeveer 15 cm. De zwaartekracht zal op die manier aan de draad trekken, door ze weg van de nozzle en over de rol te trekken.

De trekkracht in de draad mag echter niet te hoog worden, anders rekt de draad uit en ontstaat er een insnoering. Dat gebeurt meestal op de plaats waar de draad het minst sterk is, daar waar de temperatuur het hoogst is: aan de uitgang van de nozzle. Als de afstand van de rol tot de grond te groot is, zal het gewicht van de draad achter de rol teveel trekspanning in de draad voor de rol genereren en daar een insnoering doen ontstaan. Anderzijds mag die afstand ook niet te klein zijn: dan is er niet genoeg trekkracht om de draad over de rol te trekken, en begint deze op te hopen tussen de nozzle en de rol. Bij deze testomstandigheden blijkt een afstand van 15 cm ideaal te zijn.



figuur 21: Ondersteuning en koeling van het filament

Ook nog te zien op figuur 21 is een extra luchtkoeling in de vorm van een ventilator. Deze koelt het zakkende filament en het filament dat al op de plank ligt.

4.2.3 Resultaten tweede test

Het eerste merkbare effect bij het gebruiken van pellets is dat het de doorstroming aanzienlijk verbetert. De extrusiesnelheid, die eerst 1 à 2 mm/s bedroeg, is nu toegenomen tot ongeveer 5 à 7 mm/s. Dit is eenvoudig te verklaren: de pellets zijn niet zo scherp en hoekig van vorm als de geknipte stukjes misprints. Het zijn kleine afgeronde bolletjes, met een diameter van $\pm 1,5$ mm. De pellets zijn dus niet alleen gladder maar ook kleiner. Dit zorgt er enerzijds voor dat ze veel minder snel voor een verstopping zorgen in de trechter, en dus niet één voor één moeten toegevoegd worden zoals de stukjes misprints. Anderzijds neemt de hoeveelheid materiaal die per seconde door de extrusieschroef wordt verplaatst ook toe (het “debiet” stijgt). Dit verklaart ook meteen waarom de extrusiesnelheid toeneemt.

In tegenstelling tot de eerdere test heeft het filament de neiging om zichzelf op te rollen wanneer het op de plank terecht komt, zoals een touw dat neergelaten wordt op de grond (zie figuur 22). Deze rolletjes hebben een behoorlijk kleine diameter (meestal 1,5 cm). Dankzij de koeling heeft de draad echter niet de neiging om zich op eerder gelegde stukken draad vast te hechten. De rolletjes kunnen dus uitgerekt worden zoals een veer, zoals voorgedaan is met één van de rolletjes op figuur 22.



figuur 22: Voorbeelden van de test met pellets

Het belangrijkste resultaat van deze test is alleszins dat de taaigheid van het filament niet aanzienlijk verbeterd is. Wanneer de draad geplooid wordt of de rolletjes/veertjes te ver worden uitgerekt zullen ze nog steeds bros breken. Hoewel deze test met pellets is gebeurd, en niet met materiaal van misprints, komt de mechanische sterkte van het geproduceerde filament nog steeds niet in de buurt van die van aangekocht filament .

Dit wijst erop dat het printen van PLA niet de belangrijkste oorzaak is voor het verlies van de taaigheid. Aangezien er nu gewoon pellets worden gebruikt, net zoals in een industriële extrudeerinstallatie, zou het mogelijk moeten zijn om gelijkwaardig filament te maken wat betreft de mechanische sterkte. Dit doet vermoeden dat de omstandigheden in de extruder zelf (of beter gezegd: in de loop) de oorzaak zijn voor de het broser worden van het PLA.

De literatuurstudie bevestigt dit vermoeden: een temperatuur boven T_g en de aanwezigheid van vocht zullen voor aanzienlijke degradatie zorgen, wat evenveel wil zeggen als het broser worden van het PLA. De verwerkingstemperatuur is zeker hoog genoeg, zo'n 220 °C. De pellets werden ook niet gedroogd voor gebruik, wat de aanwezigheid van vocht niet ondenkbaar maakt. Om eerder genoemde redenen werd het verwarmingselement ook in het midden van de loop gezet, op een zekere afstand van de nozzle (± 12 cm), zoals te zien op figuur 19. Dit zorgt er echter ook voor dat het materiaal voor minstens die afstand in gesmolten toestand verblijft. Dit wil zeggen dat de omstandigheden gunstig voor degradatie ook nog een zekere tijd aanhouden. Kortom: al het PLA dat tot nu toe door de extruder is verwerkt, heeft aanzienlijk aan sterkte verloren door degradatie.

4.2.4 Aanpassingen aan de extruder

Uit de vorige test is gebleken dat de omstandigheden in de extruder te zeer degradatie bevorderen, en dat de extruder zelf dus aangepast moet worden. Een eerste oplossing is voor de hand liggend: de verwerkingstemperatuur verlagen. De vooreerst gebruikte temperatuur van 220 °C ligt vrij hoog in het smeltgebied van PLA (170 - 230 °C). Functionerende voorbeeldontwerpen en de literatuurstudie geven aan dat de verwerkingstemperatuur aanzienlijk lager mag liggen (180 - 210°C). [28] [31] De temperatuur aanpassen gebeurt door een andere gewenste temperatuur in te stellen op de temperatuurcontroller. De PID-regelaar zal er vervolgens voor zorgen dat deze temperatuur gehandhaafd wordt.

Om ervoor te zorgen dat het PLA minder lang in gesmolten toestand blijft, kan het verwarmingselement naar het einde van de loop verplaatst worden. Zoals op figuur 21 te zien is, bevindt de rand van het verwarmingselement zich dicht bij het einde van de loop. Deze foto is genomen na het verplaatsen van het verwarmingselement (nog geen isolatie toegevoegd). De ondersteuning voor het filament was toen nog onveranderd ten opzichte van de vorige test. De afstand is alleszins gereduceerd van 12 tot 4 cm.

Bij het stoppen van een test wordt de motor stopgezet en het verwarmingselement uitgeschakeld. Het PLA dat nog in de loop zit, stolt dan gewoon. Het zou niet al te praktisch zijn om de loop eraf te halen en het PLA uit de buis en van de schroef af te halen. Tussen enkele tests in is dat gebeurd, en het duurt makkelijk 30 minuten om de volledige schroef en loop te zuiveren van PLA-resten. Hieruit bleek wel dat al het materiaal zich in gesmolten toestand bevindt, eens het door het gebied in de loop dat overeenkomt met de plaats van het verwarmingselement, is gepasseerd. Zodoende kan het verwarmingselement perfect op 4 cm van het einde van de loop zitten zonder dat er ongesmolten deeltjes tot bij de nozzle geraken.

Bij het starten van een nieuwe test is de loop doorgaans nog gevuld met materiaal van de vorige test. Het duurde bij alle vorige tests echter vrij lang tot al het materiaal (van het verwarmingselement tot aan de nozzle) terug gesmolten was, makkelijk tot 20 minuten na het opstarten van de verwarming. Ook dit wijst erop dat het verwarmingselement beter wat dicht bij het einde van de loop kan worden geplaatst. Zo duurt het minder lang tot het materiaal tussen het verwarmingselement en de nozzle gesmolten is, en het extruderen kan beginnen.

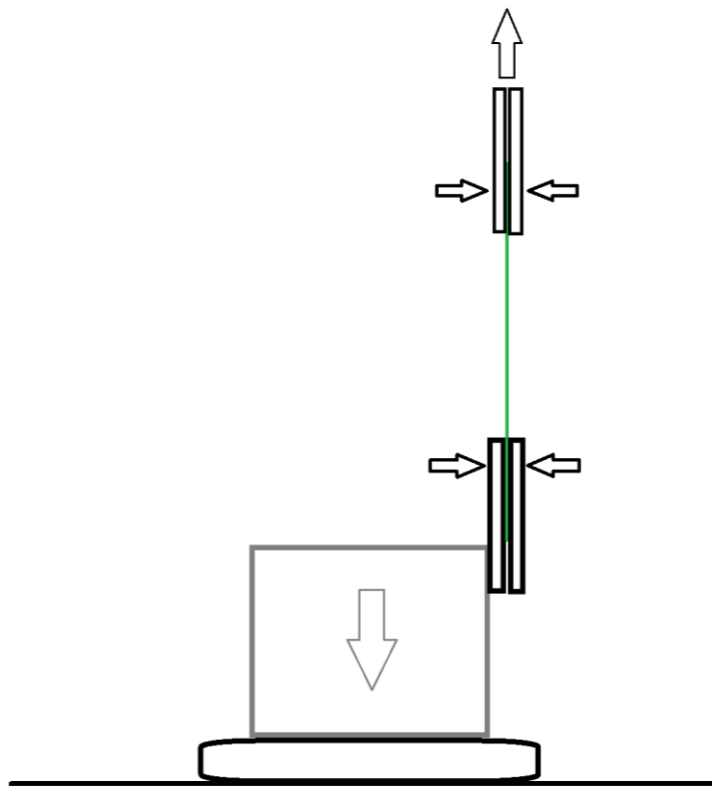
4.2.5 Resultaten derde test

De derde test is uitgevoerd na het doorvoeren van de in de vorige paragraaf genoemde aanpassingen. De verwerkingstemperatuur die wordt gehanteerd is 195 °C, en de extrusiesnelheid ligt net zoals bij de vorige proef in de buurt van 7 mm/s. Door de lagere temperatuur is de viscositeit van de draad hoger. Dit valt vooral op omdat de het filament minder zwak is ter hoogte van de uitlaat van de nozzle. De draad heeft hier veel minder de neiging tot insnoering, maar nog steeds de neiging om op te krullen.

Om dit te voorkomen moet de het filament voort getrokken worden. Zoals bij de vorige test gebeurt dat door de draad te laten zakken, zodat het eigengewicht van de draad onder invloed van de

zwaartekracht een trekkracht genereert ter hoogte van de nozzle en de ondersteuningsrol. Bij deze test moet de draad echter al een stuk verder zakken dan bij de test 2. Daar zakte de draad tot op de houten plank (figuur 21) en vormde daar kleine rolletjes/veertjes (figuur 22). Bij test 3 moet de draad verder zakken om opstopping en/of opruilen ter hoogte achter de nozzle te voorkomen. Daarom wordt de draad over de rand van de plank, van de tafel af, tot op de grond neergelaten, waar die zich in grote cirkelvormen neerlegt (diameter 20 tot 50 cm). Dit gedrag is ook het eindresultaat van vele voorbeeldontwerpen. [31]

Het belangrijkste resultaat is echter dat het geproduceerde filament veel taaier is geworden. De geproduceerde filamenten uit de vorige tests waren telkens zeer bros, en konden makkelijk gebroken worden door eraan te trekken of ze te plooiën. Om de toegenomen taaierheid te illustreren, wordt een simpele trekproef uitgevoerd. Zoals te zien op de schets in figuur 23, wordt een stuk filament van een bepaalde lengte aan beide zijden voor minstens 5 cm ingeklemd. Hiervoor worden twee houten plankjes en een metalen serre-joint gebruikt (beter gekend als “sergeant”). Het hout is zachter dan het filament van PLA, zodat het zelf zal vervormen door de klemkracht, in plaats van het filament te beschadigen. Een van deze klemmen wordt met een grotere serre-joint tegen een betonblok (massa: 23,4 kg) bevestigd.



figuur 23: Schets van de opstelling van de trekproef

Het uitvoeren van de trekproef gebeurt als volgt: het geheel wordt op een elektronische weegschaal gezet (nauwkeurigheid: 0,1 kg) en gewogen terwijl de draad niet onder spanning staat. De massa wordt afgelezen en genoteerd. Vervolgens wordt de bovenste klem recht omhoog getrokken met een toenemende kracht ($\pm 0,5$ kg/s). Hierdoor neemt het totale gewicht dat op de weegschaal drukt

af. De spanning in de draad neemt echter toe. Bij een bepaald gewicht zal de draad zijn treksterkte of maximale trekspanning bereiken, en breken. De trekkracht op de draad vlak voor het moment van breken kan simpelweg berekend worden als het verschil tussen het gewicht in spanningsloze toestand en het gewicht vlak voordat de draad breekt.

Om de trekspanning in de draad te berekenen, moet ook de minimale doorsnede over de lengte van het niet-ingeklemde stuk draad gekend zijn. Gezien dat de doorsnede cirkelvormig is, kan deze simpelweg berekend worden op basis van de diameter van de draad. Die wordt opgemeten over de lengte van het niet-ingeklemde stuk draad met een elektronische schuifmaat (nauwkeurigheid: 0,01 mm). De plaats waar het stuk het dunste is voor de trekproef, waar ook de breuk zal optreden, stelt de doorsnede voor die wordt gebruikt bij het berekenen van de treksterkte. In de volgende tabel zijn de resultaten van de trekproef te zien, uitgevoerd op aangekocht filament (A) en geproduceerd filament (P) uit de derde test.

Tabel 2: Gegevens en resultaten van de trekproef

Soort filament	A	A	A	P	P	P
Diameter (mm)	1,75	1,73	1,76	1,10	1,12	1,20
Doorsnede (mm ²)	2,41	2,35	2,43	0,95	0,99	1,13
Afgelezen massa bij breuk (kg)	11,8	11,0	12,0	5,0	5,8	6,1
Trekkracht bij breuk (N)	115,8	107,9	117,7	49,1	56,9	59,8
Treksterkte (N/mm ²)	48,1	45,9	48,4	51,6	57,8	52,9

Om de trekproef representatief te maken, wordt deze zowel voor het aangekocht als het geproduceerd filament op 3 verschillende stukken draad uitgevoerd. Er wordt ook op gelet dat de draad overal gelijk ligt met de globale trekkracht, en dus nergens ook maar de minste knik vertoont, dat zou immers onjuiste resultaten opleveren.

Het resultaat is alleszins duidelijk: het zelf geproduceerde filament is doorgaans dunner, maar heeft een even hoge of zelfs hogere treksterkte dan het aangekochte filament. Dit bewijst ook dat de aanpassingen van de 3^e test ten opzichte van de 2^e test wel degelijk een positieve invloed heeft op de mechanische sterkte van het geproduceerde filament.

Anderzijds bewijzen de resultaten van de 3^e test ook dat chemische degradatie van PLA onder invloed van een hoge verwerkingstemperatuur en de aanwezigheid van vocht de hoofdreden is voor het brosse mechanische gedrag van het filament geproduceerd in de eerste en tweede test. Aangezien het aangekochte filament en het geproduceerde filament gelijkwaardig zijn wat de mechanische sterkte betreft, verloopt de werking van de additieven zoals gewenst. Het extrusieproces heeft met andere woorden geen negatieve invloed gehad op de werking van de additieven.

5 Besluit

Deze masterproef had als doel het ontwerpen en bouwen van een extruder voor het maken van filament voor 3D-printtoepassingen. Zodoende werd een conceptueel ontwerp gemaakt, en aan de hand daarvan werd een functionerend prototype gemaakt.

De gebouwde extruder werd steeds getest met polymelkzuur of PLA. Dit materiaal wordt gemaakt op basis van plantaardige stoffen en is hernieuwbaar. Dit lijkt positief, maar geeft ook een bedreiging voor de mechanische sterkte van producten die vervaardigd worden uit PLA. Wanneer deze stof verwarmd wordt tot boven de glasovergangstemperatuur (± 55 °C) zal deze onvermijdelijk beginnen te degraderen. Dit houdt in de dat de lange polymeerketens waaruit het materiaal bestaat, inkorten, wat evenveel wil zeggen als het verlies van mechanische sterkte. De treksterkte, flexibiliteit en dus ook de taaheid gaan er aanzienlijk op achteruit.

De tests met de extruder bevestigen dit. Zowel materiaal komende van misprints als materiaal in pelletvorm werden hiervoor gebruikt. De eerste tests leverden enkel bros filament op. De oorzaak hiervan waren verwerkingsomstandigheden die degradatie te zeer bevorderden. Hieruit werden 3 aanpassingen aan de extruder afgeleid om degradatie te beperken. Ten eerste werd de verwerkingstemperatuur gereduceerd van 220 °C tot 200 °C. Ten tweede werd ook tijdspanne waarin het PLA zich op deze temperatuur bevindt ingekort. Als laatste werden het materiaal voor extrusie ook gedroogd. De aanwezigheid van vocht is een belangrijke degradatieversterkende factor.

Na het doorvoeren van deze aanpassingen werd nogmaals getest, met PLA in pelletvorm. Het geproduceerde filament had dit keer aanzienlijk betere mechanische eigenschappen. Om dit te bewijzen werd een trektest uitgevoerd. Het resultaat was duidelijk: het aangekochte filament had een treksterkte van 45 tot 49 N/mm², terwijl het geproduceerde filament een treksterkte had van 51 tot 58 N/mm². Dit bewijst dat chemische degradatie de belangrijkste oorzaak was tot het verlies van mechanische sterkte in eerdere test.

Algemeen wil dit zeggen dat de bioafbreekbaarheid van PLA, wat op zich een positieve eigenschap lijkt, evenzeer de grootste zwakte is van dit materiaal. Telkens wanneer het materiaal verwerkt wordt, zal dit gepaard gaan met een onomkeerbaar verlies van mechanische sterkte. Hieruit kan worden besloten dat PLA niet in aanmerking komt om herhaaldelijk gerecycleerd te worden.

In de toekomst kunnen nog extra tests uitgevoerd worden met PLA afkomstig van misprints. Door de cyclus van printen-recycleren-printen te herhalen, kan het verlies van mechanische sterkte door meervoudige recyclage verder onderzocht worden. In deze masterproef werd enkel een literatuurstudie en een serie van tests met betrekking tot PLA uitgevoerd. Via dezelfde methode kunnen ook andere materialen, zoals bijvoorbeeld PET en ABS, getest worden op hun recycleerbaarheid.

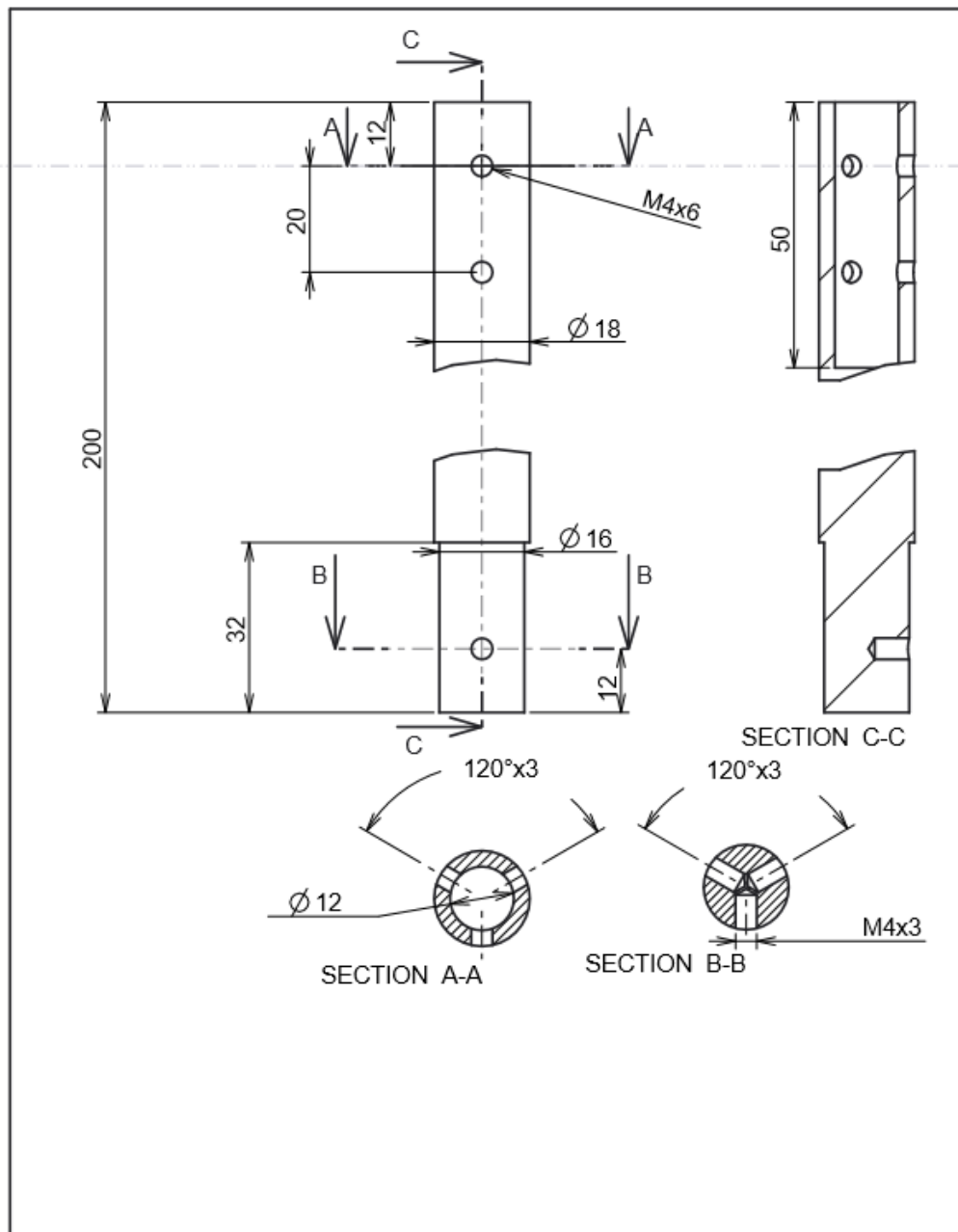
6 Literatuurlijst


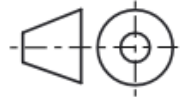
- [1] „<http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>,” [Online]. [Geopend December 2015].
- [2] „3Dprinterpro,” [Online]. Available: <http://www.3dprinterpro.com/pr/red-pla-filament/>. [Geopend November 2015].
- [3] [Online]. Available: <http://colorfabb.com/pla-pellets-pack-221>. [Geopend April 2016].
- [4] [Online]. Available: <http://my3dmatter.com/best-pla-filament-supplier-for-3d-printing-needs/>. [Geopend December 2015].
- [5] [Online]. Available: http://isac.wdfiles.com/local--files/intelligent-control-of-single-screw-polymer-extruder/diagram_of_single_screw_extruder.png. [Geopend 12 December 2016].
- [6] K. Hamad, M. Kaseem en F. Deri, Melt Rheology of Poly(Lactic Acid)/Low Density, Faculty of Science, Department of Chemistry, Laboratory of Materials Rheology (LMR), 2011.
- [7] B. Van Mieghem en B. Vanbael, Polymer Processing [slides], Diepenbeek: UCLL-Departement FIIW, 2015.
- [8] [Online]. Available: <http://www.instructables.com/id/Build-your-own-3d-printing-filament-factory-Filame/>. [Geopend 17 September 2015].
- [9] [Online]. Available: <http://nl.aliexpress.com/item/1-pcs-45-30mm-Single-screw-for-plastic-machine-45mm-screw-for-extrusion-injection-blowing-cable/32328970585.html>. [Geopend 28 April 2016].
- [10] [Online]. Available: http://www.amazon.com/Threaded-Shank-Power-Auger-Drill/dp/B00SL0PZ5Q/ref=sr_1_7?s=power-hand-tools&ie=UTF8&qid=1461847326&sr=1-7&keywords=auger+bit+16mm. [Geopend 28 April 2016].
- [11] [Online]. Available: <http://www.ebay.de/itm/SSANGYONG-Korando-KJ-Scheibenwischer-Motor-Wischermotor-vorne-86100-06000-/261796364962>. [Geopend 28 April 2016].
- [12] Reologisch gedrag van kunststoffen, Diepenbeek: UCLL, Departement FIIW, 2015.
- [13] C. W. MacMinn en G. H. McKinley, Tubeless Siphon and Die Swell Demonstration, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA 02139, 2004.
- [14] [Online]. Available: <http://www.ebay.com/itm/1pcs-AC-220V-Ceramic-Stainless-Steel-Band-Heater-30mm-x-50mm-/121803488405?hash=item1c5c0dbc95:g:9TEAAOSwQTVWAPgI>. [Geopend November 2015].
- [15] [Online]. Available: <http://www.isover-technische-isolatie.nl/Industrie-isolatie/Prestaties/Maximale-bedrijfstemperatuur2/Maximale-bedrijfstemperatuur>. [Geopend Februari 2016].

- [16] G. Vandensande en M. Daenen, Toegepaste elektrotechniek, Diepenbeek, Departement FIIW, 2013.
- [17] [Online]. Available: http://shop.dwengo.org/sites/default/files/voltagecontrol_pwm_0.png. [Geopend Mei 2016].
- [18] [Online]. Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d0/Gesloten_regelsysteem.png/500px-Gesloten_regelsysteem.png. [Geopend Mei 2016].
- [19] J. Baeten, „De klassieke regelaars,” in *Basis Regeltechniek*, Diepenbeek, Departement FIIW, 2005.
- [20] „Groene Grondstoffen,” Food & biobased research, [Online]. Available: <http://groenegrondstoffen.nl/downloads/Infosheets/Bioplastics%20PLA%20eigenschappen.pdf>.
- [21] [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic_acid. [Geopend 4 April 2016].
- [22] [Online]. Available: <http://chemieblog.com/wp-content/uploads/2013/06/Melkzuur.jpg>. [Geopend 4 April 2016].
- [23] J. Van Velthuijsen, „Polymelkzuur: van suiker tot chirurgisch hechtmateriaal,” *KNAW/KNCV*, 2001.
- [24] E. Kolodka, PLLA for Diverse Applications, Dept. of Chemical Engineering University of North Dakota, 2014.
- [25] [Online]. Available: http://www.dupont.com/content/dam/dupont/industries/packaging-and-printing/packaging-and-printing-landing/documents/Biomax_Strong.pdf. [Geopend Mei 2016].
- [26] R. Auras, L.-T. Lim, S. E. M. Selke en H. Tsuji, in *Poly (lactic acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing And Application*, New Jersey, Wiley, 2010.
- [27] [Online]. Available: <https://www.filabot.com/products/pla-colorant-additives?variant=13784111492>. [Geopend Mei 2016].
- [28] L.-T. Lim, R. Auras en M. Rubino, Processing technologies for poly(lactic acid)., Department of Food Science, University of Guelph, Guelph, Ontario N1G 2W1, Canada., 2008.
- [29] V. Taubner en R. Shishoo, „Influence of processing parameters on the degradation of poly(l-lactide) during extrusion,” *J Appl Polym Sci*, 2001.
- [30] D. Henton, P. Gruber, L. J. en J. Randall, „Polylactic acid technology,” *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*, 2005.
- [31] [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=T7aXFIj_Obk. [Geopend April 2016].

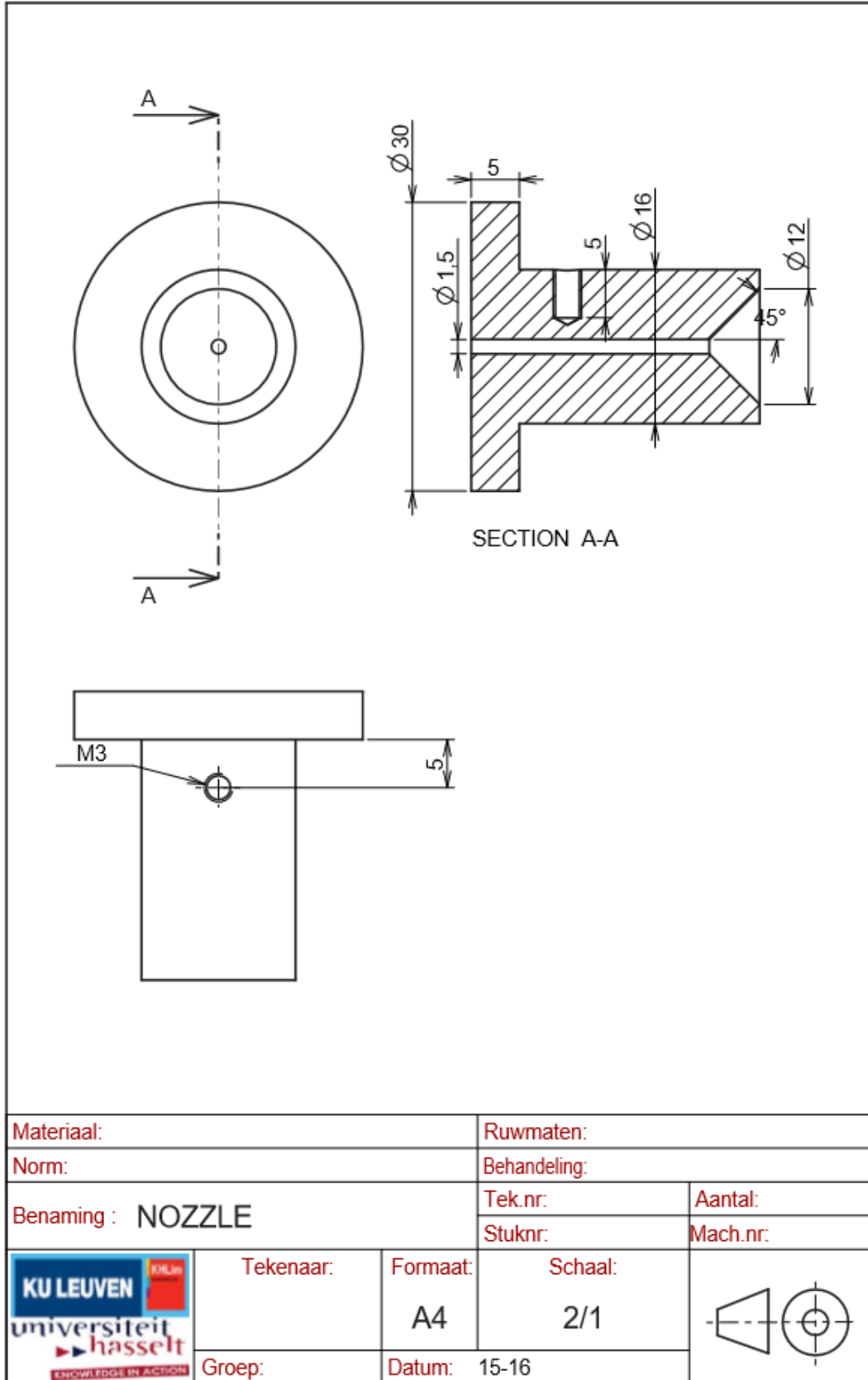
7 Bijlagen

bijlage 1: Technische tekening koppelbuis



Materiaal:		Ruwmaten:	
Norm:		Behandeling:	
Benaming : KOPPELBUIS		Tek.nr.:	Aantal: 1
		Stuknr.:	Mach.nr.:
	Tekenaar: Gerome Reynders	Formaat: A4	Schaal: 1/1
	Groep: EM 1	Datum: 2015-16	
			

bijlage 2: Technische tekening nozzle



bijlage 3: Specificaties power supply (20A, type S-250-12)

Features:

Universal AC input / full range

It's good quality & high performance

Input: AC 110-220V 50/60Hz

Out put: **DC 12V 1A, 3A, 5A, 10A, 15A, 20A, 25A, 30A**

100% full load burn-in test

Protections: overload/ over voltage/ short circuit

Cooling by free air convection

This Power Supply Unit "DOES NOT" come with installation instruction, wiring cable, on/off switch, or screws.

Professional installation of qualified electrician is highly recommended.

How to calculate Support max LED Strip Length:

Assumption: Your LED Strip 60LEDs/m, and each LED 0.2W, then calculate max LED Strip Length: $0.2W/LED \times 60LEDs/m = 12W/m$, $60W(\text{this listing}) = 12W/m = 5m$, So, Support the LED Strip (60LEDs/m, 0.2W/LED) Length

(Max)=5M

(Not suggest for use in bathroom)

Connection:

L, N: AC power input

GND: DC power output "-"

V: DC power output "+"

+V / ADJ: Adjust the output voltage

Safety Compliance: CCC/ FCC / CE

Working Temperature: 0~40C

Storage Temperature: -20~60C

Ambient Humidity: 0~95% Non-Condensation

Bron: http://www.ebay.com/itm/12V-1A-30A-Switching-Power-Supply-Driver-For-LED-Strip-light-Display-220V-110V/161285389741?_trksid=p2045573.c100033.m2042&_trkparms=aid%3D111001%26algo%3DREC.SEED%26ao%3D1%26asc%3D20131017132637%26meid%3Dc063082f58ce495c9d9cb06e16ab0671%26pid%3D100033%26rk%3D2%26rkt%3D4%26sd%3D172160515245

bijlage 4: Specificaties spanningsregelaar

++ Product Description ++

Brand new with high quality

High efficiency and infinitely variable speed

Stable, durable and long service life

Convenient to connect wire and do not need soldering

Fuse available

Name: DC motor

Shape: Nude packing

Dimension: about 67 x 64 x 30 mm (length x width x height)

Specifications:

Working voltage: DC 9V-60V (Ultra wide input voltage) 20A

Static Current: 0.02 A (Standby)

PWM Duty Cycle: 10% -100%

PWM Frequency: 13 khz

Product mix: 1 x speed-controll switch with lead, 4 x terminals (2 for power and motor respectively), 1 x LED light

Functions: 1. Suitable for regulating speed

2. Fuse available:

A. When electric appliance is overloaded or cutting-out, the fuse will be burnt out in the shortest time so as to protect electric appliance and controllable silicon; if the power is not cut off immediately when short circuit happens, you may be in danger of electric shock.

B. When electric appliance is leaking of electricity, the fuse will be burnt out in the shortest time so as to protect the safety of the staff and appliance.

Bron: <http://www.ebay.com/itm/Pulse-Width-Modulation-PWM-DC-Motor-Speed-Control-Governor-Switch-9V-60V-20A-/231627938495?hash=item35ee19dabf:g:ONQAAOSwLVZVrM3->

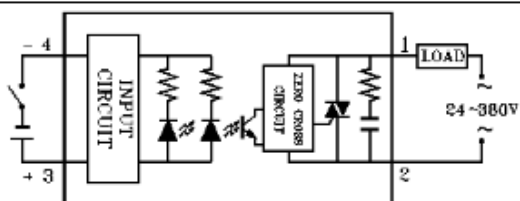


SSR Series DC to AC Solid State Relay

Specification

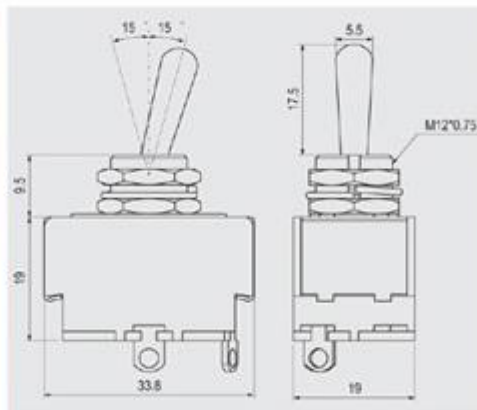
Type	Terminal Type						PCB Type
Model	SSR-10DA	SSR-25DA	SSR-40DA	SSR-25DA-H	SSR-40DA-H	SSR-P03DA	
Rated Load Current	10A	25A	40A	25A	40A	3A	
Input Data							
Operating Voltage	3~32VDC						
Min. ON / OFF Voltage	ON ≥ 2.4V , OFF ≤ 1.0V						
Trigger Current	7.5mA / 12V						
Control Method	Zero Cross Trigger						
Output Data							
Operating Voltage	24~380VAC			90~480VAC		24~480VAC	
Min. Blocking Voltage	600 VAC < Repetitive >						
Voltage Drop	1.6 V / 25°C						
Max. Durated Current	135A	275A	410A	275A	410A	135A	
Leakage Current	3.0mA	3.0mA	3.0mA	5.0mA	5.0mA	3.0mA	
Response Time	ON < 10ms , OFF < 10ms						
General Data							
Dielectric Strength	Over 2.5KVAC / 1min.						
Isolation Strength	Over 50MΩ / 500VDC						
Operating Temperature	-20°C ~+80°C						
Housing Material	Intensive ABS						
Weight	Appr. 105g						Appr. 15g

Connection Diagram



bijlage 6: Datasheet van de schakelaar (type R13-28L)

R13-28



Rating	15A 125V AC 10A 250V AC
Contact resistance	50mΩ Max
Insulation resistance	DC 500V 100MΩ Min
Dielectric strength	AC 1500V 1 minute
Cut-out	
	4 mm max

FEATURES

- * MATERIAL: Frames are metal plated. Terminals are nickel plated brass.
- * Phenolic base.
- * Standard toggle lever.
- * Indicator plate and waterproof boot are optional.



R13-28

FUNCTION				TERMINAL
A ON OFF 2P SPST	E ON OFF ON 6P DPDT	I ON (ON) 3P SPDT	S (ON) OFF 4P DPST	0 1 .250" SQ
B ON ON 6P DPDT	F ON OFF 4P DPST	K (ON) OFF (ON) 6P DPDT	U (ON) ON (ON) 6P DPDT	0 5 SO
C ON ON 3P SPDT	G (ON) OFF (ON) 3P SPDT	M ON OFF (ON) 6P DPDT	L ON ON (ON) 6P DPDT	0 6 SC 3
D ON OFF ON 3P SPDT	H ON OFF (ON) 3P SPDT	P ON (ON) 6P DPDT		0 7 SC 4

* () = momentary

Bron: http://www.kysanelectronics.com/Products/datasheet_display.php?recordID=4755

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

Ontwerp en bouw van een extruder voor filament voor 3D-printtoepassingen

Richting: **master in de industriële wetenschappen: elektromechanica**

Jaar: **2016**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Reynders, Gerome

Datum: **1/06/2016**