




Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

BACHELOROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: <i>Bachelor Maskiningeniør</i>	Vår semesteret, 2021 Åpen / Konfidensiell
Forfatter: <i>Tiedemann Bratten</i>	 (signatur forfatter)
Fagansvarlig: <i>Hirpa G. Lemu, UiS</i> Veileder(e): <i>Hirpa G. Lemu, UiS</i> <i>Jørgen Grønsund, UiS</i>	
Tittel på bacheloroppgaven: <i>Eksperimentell studie av ekstruderte filamenter av plastmaterialer for 3D printing</i> Engelsk tittel: <i>Experimental study of extruded filaments of plastic materials for 3D printing</i>	
Studiepoeng: 20 poeng. Essay i vitenskapsteori/etikk er inkludert.	
Emneord: - Eksperimentelt - Plast - Ekstrudering - 3D printing	Sidetall: 69 + vedlegg/annet: 34 Stavanger, 14.05.2021

I Forord

Min bacheloroppgave er en eksperimentell studie om ekstruderte filamenter av resirkulert termoplast til bruk i 3D-printer. Oppgaven er gjennomført i Stavanger i tidsperioden våren 2021. Hovedmålet er å undersøke om dette kan være et nytt bruksområde for resirkulert plast. Studien går gjennom prosjektaktiveter for plasten som filamentproduksjon, 3D-printing, strekktest for materialegenskaper og mikroskop.

Å bidra gjennom ingeniørfaglig arbeid som kan spare miljøet, men også verdifulle ressurser er et dagsaktuelt tema. Resultatene vil derfor gi et viktig svar om termoplasten er anvendelig innenfor hurtig modellfremstilling.

Opgaven mellom IVAR (Interkommunalt, Vann, Avløp og Renovasjon) og UiS (Universitetet i Stavanger) var opprettet høsten 2020, gjennom søknad ble jeg den heldige til å ta på meg arbeidet. I arbeidsperioden har oppgaven vært både utfordrende og spennende, men med god veiledning og oppfølging har jeg løst problemer på veien.

Først vil jeg takke min professor, Hirpa Gelgele Lemu, for god veiledning fra start til slutt ved å peke på riktig retning for å skrive en god rapport med riktig standard. Jeg vil også takke ingeniør, Jørgen Grønsund, for god oppfølging og veiledning med det praktiske arbeidet utført i denne eksperimentelle studien. UiS har også vært en viktig brikke til å gi utfordringer innenfor nyskapende teknologi og satt min kunnskap på prøve under bachelor perioden.

Jeg vil også takke ansatte ved IVAR for deres arbeid til å gjøre denne studien mulig, jeg vil i tillegg takke Synnøve Krog for fin omvisning av anlegget. Studien hadde ikke vært mulig å gjennomføre uten det toppmoderne ettersorteringsanlegget til IVAR.

II Sammendrag

Denne eksperimentelle studien er en undersøkelse om resirkulert HDPE, LDPE og PP sortert av ettersorteringsanlegget IVAR kan ha et bruksområde innenfor 3D-printing.

Oppgaven er beskrevet gjennom ulike aktiviteter for til slutt å gi et helhetlig resultat for produksjonsmetoden som testes. Følgende aktiviteter som filamentproduksjon, 3D-printing, strekktest av materialer og mikroskop, gir til slutt grunnlaget for konklusjonene.

Materialet PLA er tatt med gjennom prosjektaktivitetene for å fungere som en referanse i forhold til de andre resirkulerte termoplastene. Ettersom PLA er en av de mest utbredte termoplasttypene innenfor 3D-printing vil dette gi en god sammenligning til ønsket resultat.

Konklusjoner tatt etter gjennomførte metoder er først at PP materialet ikke kunne bli laget til et funksjonelt filament til 3D-printer. Dette var grunnet den lave viskositeten til materialet i smeltet form. PP kunne derfor ikke være med gjennom de resterende prosjektaktivitetene.

HDPE og LDPE viste seg å ikke være egnet til 3D-printing grunnet sine grunnleggende materialegenskaper. Termoplastene viste høy prosent krystallinsk struktur gjennom krympingen som skjedde ved nedkjøling fra smeltet form. De indre molekylære kreftene ved den krystallinske strukturen skapte krympingen som førte til at modeller med ekstraordinære utforminger ikke kunne fremstilles. Det ble produsert prøvestykker av LDPE på 3D-printer, men med forbehold om at utformingen ikke var optimal. Dette var mulig grunnet LDPE sin lavere tetthet som gir et mykere og mer fleksibelt materiale.

Resultater fra strekktest av LDPE ble målt opp mot databladet der samme test er utført for en formstøpt prøve. Resultatet til den 3D-printede prøven ga mye større forlengelse under strekk, men ikke like god strekkfasthet som testen utført

i databladet. 3D-printet prøve 1 av PLA hadde samme utforming som 3D-printet strekktest i datablad, resultatene ga tilnærmet like tall.

De absolutte funnene var at både HDPE og LDPE ikke er egnet til fremstilling av modeller ved 3D-printer. PP plasten kan potensielt ha et bruksområde innenfor 3D-printing, men et filament med riktige krav må kunne fremstilles først.

Videre arbeid vil være å bruke lenger tid og forbedre filamentekstrudering slik at et filament av PP er mottakelig i 3D-printer. Sett på forhånd har PP plasten bedre materialegenskaper egnet for 3D-printing enn HDPE og LDPE. Også en videre undersøkelse av formstøping av modeller kan være et godt bruksområde for de resirkulerte termoplastene.

Innhold

I Forord	i
II Sammendrag	ii
Figurliste	vii
Tabelliste	ix
Forkortelser og symboler	x
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	2
1.3 Målsetting og begrensninger	2
1.3.1 Hovedmål	2
1.3.2 Delmål	2
1.3.3 Begrensninger	3
1.4 Oppgavestruktur	3
1.4.1 Gantt-Chart	4
1.4.2 Arbeidsstruktur	4
2 Teoretisk grunnlag	6
2.1 Hurtig prototyping og additiv produksjon	6
2.1.1 DAK - Dataassistert konstruksjon	7
2.1.2 Konvertering til .STL filformat	8
2.1.3 Slicing - Programmet Cura	8
2.1.4 FFM - Fused Filament Fabrication	10
2.2 Termoplast	11
2.2.1 HDPE - High Density Polyethylene	12
2.2.2 LDPE - Low Density Polyethylene	13
2.2.3 PP - Polypropylene	14
2.2.4 PLA - Polylactic acid	15
2.3 Filamentproduksjon og testing	16

2.3.1	Filamentekstrudering	16
2.3.2	MFR - Melt Flow Rate	17
2.3.3	Utfordringer ved HDPE, LDPE og PP i FFM	19
3	Metode og materialer	21
3.1	Materialer og eksperimentelt utstyr	21
3.1.1	Materialer	21
3.1.2	Eksperimentelt utstyr	21
3.2	Filamentproduksjon	22
3.2.1	Forberedelse av plast	22
3.2.2	Filamentekstrudering - Precision 350	23
3.2.3	"Circular Cooling Flow" - Kjøling for filamentekstrudering	25
3.3	Testing	26
3.3.1	#3DBenchy - Modell for egenskapstest ved 3D-printer	26
3.3.2	Ulike metoder for 3D-print	27
3.3.3	Strekktest for 3D-printede prøvestykker	29
3.3.4	Forberedelse av materialer for mikroskop	30
3.4	Besøk til IVAR ettersorteringsanlegg	32
4	Resultat og diskusjon	34
4.1	Filament produksjon	34
4.1.1	HDPE - High Density Polyethylene	34
4.1.2	LDPE - Low Density Polyethylene	36
4.1.3	PP - Polypropylene - Med original kjøling	38
4.1.4	PP - Polypropylene - Med "Circular Cooling Flow" kjøling	40
4.1.5	PLA - Polylactic acid	42
4.2	#3DBenchy - Modell for egenskapstest ved 3D-printer	44
4.2.1	HDPE - High Density Polyethylene	44
4.2.2	LDPE - Low Density Polyethylene	46
4.2.3	PLA - Polylactic acid	47
4.3	Prøvestykker for strekktest - 3D-print	48
4.3.1	HDPE - High Density Polyethylene	48
4.3.2	LDPE - Low Density Polyethylene	48

4.3.3	PLA - Polylactic acid	49
4.4	Strekkttest av materialer	51
4.4.1	PLA - Polylactic acid	51
4.4.2	LDPE - Low Density Polyethylene	53
4.5	Mikroskop undersøkelse av materialer	55
5	Konklusjon	57
	Referanser	59
A	HDPE Datablad	74
B	LDPE Datablad	76
C	PP Datablad	78
D	PLA Datablad	80
E	PLA strekktest rapport	84
F	LDPE strekktest rapport	87
G	Mikroskop bilder av materialer	90

Figurliste

1	Gantt Chart	4
2	Arbeidsstruktur (WBS)	5
3	CAD i SolidWorks viser underliggende oppbygning.	7
4	#3DBenchy modell i STL format	8
5	Brukergrensesnitt av Cura. #3DBenchy modell.	9
6	Illustrasjon av FFM Produksjon	10
7	Amorf struktur (venstre) mot krystallinsk struktur (høyre)	12
8	Maskinen Precision 350 fra 3Devo	16
9	Granulert PLA (øverst venstre), HDPE (øverst høyre), LDPE (nederst venstre) og PP (nederst høyre)	21
10	SHR3D IT maskin levert av 3Devo.	23
11	.STL fil illustrasjon av "Circular Cooling Flow" komponent	25
12	"Circular Cooling Flow" montert på maskin ved ekstrudering	25
13	#3DBenchy egenskapstest	27
14	De ulike arbeidsflater brukt til 3D-print	28
15	Retning av mønster for 3D-printede strekkprøver.	29
16	Citopress-30 maskin for støping av mikroskop prøver.	30
17	Antistick til Citopress-30.	30
18	Prøver for mikroskop med blank side opp.	31
19	Prøver for mikroskop med slipt side opp.	31
20	Olympus GX53 mikroskop koblet til datamaskin	32
21	Ankomsthall for restavfall	33
22	Sortering av restavfall	33
23	HDPE - Filament diameter i forhold til tid anløpt	35
24	LDPE - Filament diameter i forhold til tid anløpt	37
25	PP med vanlig kjøling - Filament diameter i forhold til tid anløpt	39
26	PP med "Circular Flow" kjøling - Filament diameter i forhold til tid anløpt	41
27	PLA - Filament diameter i forhold til tid anløpt	43
28	(a) #3DBenchy modell av HDPE på pakketeip. (b) Underside av #3DBenchy modell av HDPE.	45

29	#3DBenchy modell av LDPE på pakketeip	46
30	#3DBenchy modell i PLA	47
31	LDPE strekktest prøver	49
32	PLA strekktest prøver	50
33	Ufullstendig print av PLA strekktest prøve	51
34	PLA strekktest prøver etter test	52
35	LDPE strekktest prøver etter test	54
36	Mikroskop bilder av slipt side av prøver ved 20x zoom	55
37	Mikroskop bilder av blank side av prøver ved 20x zoom	56

Tabelliste

1	HDPE materialegenskaper	13
2	LDPE materialegenskaper	14
3	PP materialegenskaper	15
4	PLA materialegenskaper	15
5	HDPE - Innstillinger ved maskin gitt i forhold til tid anløpt	34
6	LDPE - Innstillinger ved maskin gitt i forhold til tid anløpt	36
7	PP med original kjøling - Innstillinger ved maskin gitt i forhold til tid anløpt	38
8	PP med "Circular Flow" kjøling - Innstillinger ved maskin gitt i forhold til tid anløpt	40
9	PLA - Innstillinger ved maskin gitt i forhold til tid anløpt	42
10	Tabell over resultater ved ulike innstillinger av 3D-printer for #3DBenchy modell av HDPE	44
11	Tabell over resultater ved ulike innstillinger av 3D-printer for #3DBenchy modell av LDPE	46
12	Tabell over resultater ved ulike innstillinger av 3D-printer for #3DBenchy modell av PLA	47
13	Tabell over innstillinger ved 3D-print av strekktester for LDPE	48
14	Tabell over innstillinger ved 3D-print av strekktester for PLA	49
15	Tabell over PLA strekktest rapport	51
16	Tabell over LDPE strekktest rapport	53

Forkortelser og symboler

Forkortelser

HDPE	High Density Polyethylene, <i>polyeten med høy tetthet</i>
LDPE	Low Density Polyethylene, <i>polyeten med lav tetthet</i>
PP	Polypropylene, <i>polypropen</i>
PLA	Polylactic acid, <i>polymelkesyre</i>
3D	Tredimensjonal
DAK	Datamaskin-assistert konstruksjon
FFM	Fused Filament Fabrication, <i>smeltet filamentfremstilling</i>
IVAR	Interkommunalt, Vann, Avløp og Renovasjon
MFR	Melt Flow Rate, <i>smeltestrømningshastighet</i>
mm	Millimeter, måleenhet
MPa	Megapascal, N/M^2 , trykkenhet
STL	Stereolithography
UiS	Universitetet i Stavanger

Symboler

%	Prosent
°C	Grader temperatur i Celsius
μ	Micro, representerer 10^{-6}

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Denne eksperimentelle studien har som formål å undersøke prosessen fra gjenvinningsplast til ferdig 3D-printede modeller. Tre ulike typer plast ble levert til UiS fra ettersorteringsanlegget IVAR for å bruke i utviklingen[1]. Plasten har per idag få gode bruksområder, derfor var det interessant å undersøke muligheten for 3D-printing for å fullføre resirkuleringsløpet. Det var ønskelig å bli kjent med prosessen å produsere egne filamenter for 3D-printer ved en ny maskin kjøpt inn til universitetet, en optimalisering for godt resultat ble utført ved å bruke en rekke ulike innstillinger ved filament-ekstruderingsmaskinen. De ekstruderte filamentene ble testet i 3D-printer med testmodeller, prøvestykker ble produsert for strekktest og undersøkelse av plasten ble gjort i mikroskop.

Gjenvinningsplasten blir levert i form av pellets, små korn med en lengde på ca. 2 millimeter. Dette gjør at plasten må behandles og formes til et filament, en jevn tråd med en gitt diameter slik at den er mottakelig for 3D-printer. Videre skal det produseres 3D-printede testmodeller for å undersøke plastens anvendelighet for å lage modeller. Dersom modeller er mulig å produsere vil det bli laget prøvestykker for strekktest til teste plastens materialeegenskaper; styrke, strekk modulus og forlengelse.

De tre ulike plasttypene er materialene ettersorteringsanlegget har mulighet for å sortere med høy nok presisjon til at den er tilnærmet ren. De ulike termoplastene er HDPE, LDPE og PP. Alle de tre materialene har grunnleggende materialeegenskaper som gjør det utfordrende i forhold til funksjonaliteten for arbeidsområdet som testes. For den eksperimentelle studien er plasten PLA også tatt med for å måle anvendeligheten for resirkuleringsplasten. PLA er en av de mest brukte plasttypene innenfor 3D-printing og vil fungere som en god referanse gjennom prosjektaktivitetene [2].

1.2 Problemstilling

Problemstillingen ble derfor som følger;

Har resirkulert termoplast av HDPE, LDPE og PP et bruksområde innenfor FFM og 3D-printing?

1.3 Målsetting og begrensninger

For oppgaven er det blitt utarbeidet ulike målsetninger for hva som er ønsket av den eksperimentelle studien. De ulike delkapitlene gir en innføring av omfang, mål og begrensninger.

1.3.1 Hovedmål

Hovedmålet for utførelsen av studien er å gi et resultat til UiS og IVAR ettersorteringsanlegg om den resirkulerte termoplasten har et bruksområde innenfor FFM. Også en generell fremgangsplan av hvordan produksjon av egne filamenter kan bli utført ved UiS er ønskelig.

1.3.2 Delmål

Innenfor oppgaven er det definert delmål for å komme fram til ønsket resultat. Dersom ikke hovedmålet blir oppnådd er det derfor viktig å ha delmål i sikte.

Erfaringer gjort ved prosessen vil bli dokumentert for å kunne videreføre kunnskap til andre som vil fortsette arbeidet. Dette blir viktig i forhold til at resultater og fremgangsplaner kan brukes i videre undersøkelser.

Læringsutbyttet gir et godt grunnlag for videre arbeid i industrien. Materialteknologisk kunnskap opparbeidet i løpet av arbeidsperioden vil gi et godt grunnlag for annet arbeid i fremtiden.

1.3.3 Begrensninger

For at ikke arbeidet skal bli for omfattende innenfor den gitte tidsperioden er oppgaven begrenset av ulike faktorer. Fra start er det begrenset til fire typer plast som skal gjennom prosjektaktivitetene. Underveis kan det oppstå andre begrensninger hvis ikke prosessen går etter planen. Ettersom de ulike aktivitetene kommer til å avhenge av hverandre som en dominoeffekt kan det gjøre at et gitt materiale ikke kan ta steget videre.

3D-printeren som blir brukt til eksperimentering er en felles maskin for en stor andel studenter innenfor instituttet har tilgang til. Et bookingsystem er satt opp for å sette av sin tid til maskinen. Jobber på printeren kan ta flere dager og studenter kan booke over lengre perioder. Det var derfor viktig å være tidlig ute og planlegge for å ikke bli begrenset av andre studenters arbeid.

I tidsperioden denne studien blir utført er det en global pandemi i verden[3]. I starten av året 2020 ble viruset Covid-19 spredt over hele kloden, dette har satt en enorm stopper for samfunnet. I 2021, ett år etter første nedstenging av samfunnet er vi fortsatt pålagt strenge anbefalinger og restriksjoner for å unngå smittespredning. Tilgang til universitetet kan derfor bli begrenset eller ikke tilgjengelig på veldig kort notis av myndighetene. Ettersom det eksperimentelle utstyret er lokalisert på UiS kan dette gi begrenset tilgang til nødvendig utstyr eller mulighet for veiledning.

1.4 Oppgavestruktur

Oppgaven er delt inn i 6 kapitler. Forklaringene under gir et innblikk av hva man kan forvente av de ulike kapitlene.

Kapittel 1 gir bakgrunn for oppgaven. Omfanget av arbeidet er også beskrevet her.

Kapittel 2 presenterer den teoretiske bakgrunnen for de ulike programmer, pro-

duksjonsprosesser og materialer brukt i studien.

Kapittel 3 beskriver problemstillinger, angrepsmåter for å løse problemet og bakgrunn for de valgte metoder samt selve metoden.

Kapittel 4 tar for seg all informasjon fra undersøkelser og eksperimenter. Måleresultater og observasjoner presenteres i en kronologisk rekkefølge av utførelse. Også analyse og vurdering av resultater blir presentert. Fordeler og ulemper i forhold til metoder brukt i studien blir også vurdert.

Kapittel 5 gir konklusjon og anbefalinger til fremtidig arbeid basert på arbeidet utført i oppgaven.

1.4.1 Gantt-Chart

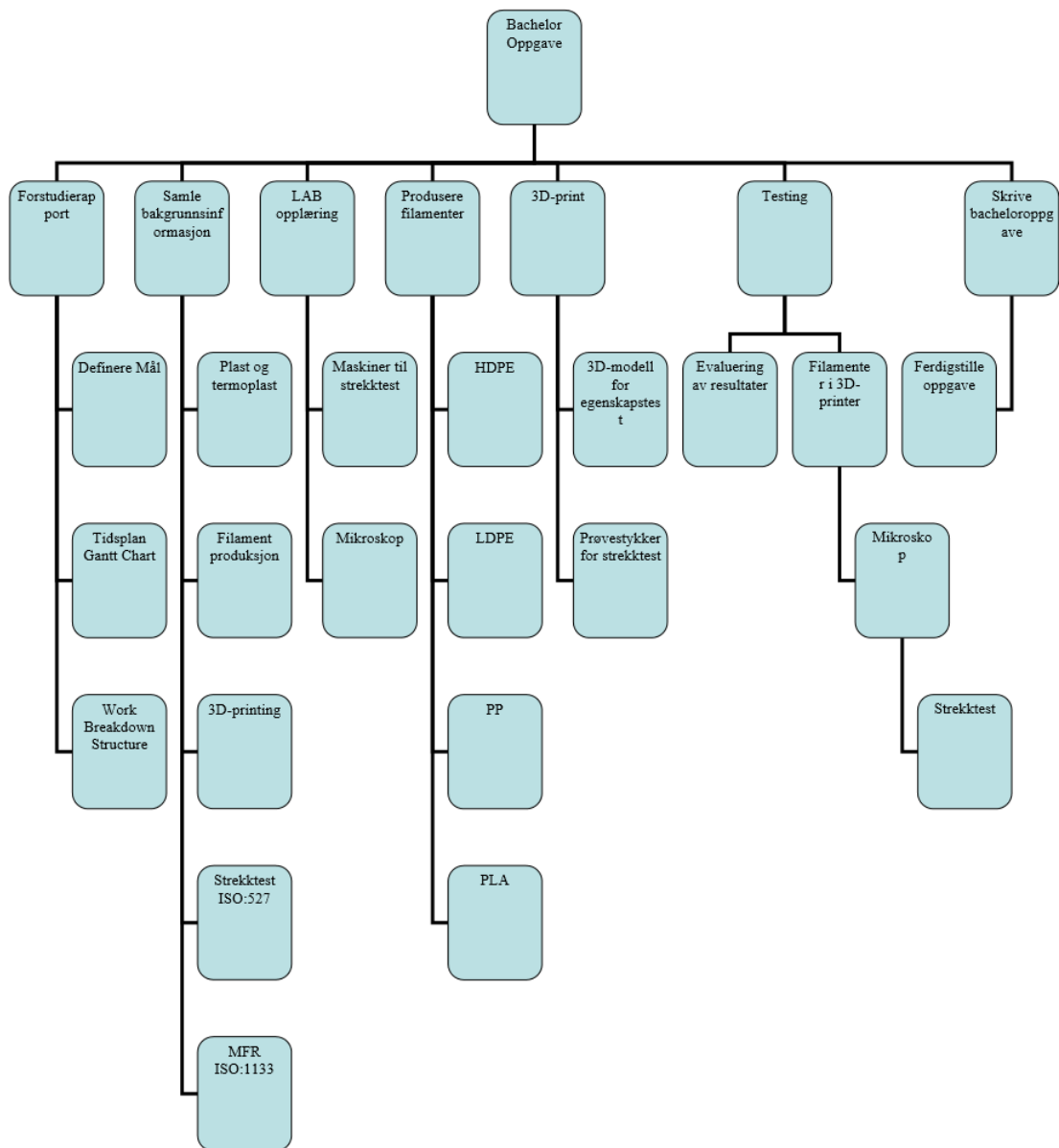
Tidsplan brukt som hjelpemiddel gjennom utførelsen av studien. Gantt-chartet ble utarbeidet ved forstudierapporten lagt til som vedlegg.

Måned	Januar				Februar				Mars				April				Mai		
Ukenummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Forstudierapport	■	■	■	■	■														
Samle bakgrunnsinformasjon		■	■	■	■	■													
Skrive oppgave					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
LAB opplæring				■	■														
Produsere filamenter				■	■	■	■	■											
Produsere prøvestykker									■	■	■	■	■						
Utføre testing										■	■	■	■	■					
Evaluering av resultater														■	■	■			
Ferdigstille Bachelor																		■	■

Figur 1: Gantt Chart

1.4.2 Arbeidsstruktur

Det helhetlige arbeidstreet for den eksperimentelle studien. Dette treet er forbedret med grunnlag i arbeidsstrukturen presentert i forstudierapporten.



Figur 2: Arbeidsstruktur (WBS)

2 Teoretisk grunnlag

For å forstå oppgaven og kunne gjøre rede for resultatene er det viktig å ha et godt teoretisk grunnlag. Studiet som maskiningeniør har lagt grunnlaget for forståelse av avanserte produksjonsmetoder, samtidig gitt kunnskapen til å analysere og vurdere egne resultater. I de kommende underkapitler er det presentert god informasjon om hva de ulike hovedaktivitetene dreier seg om, men også presentert i kronologisk rekkefølge av hvordan prosessen går fra råmateriale til utført testing.

2.1 Hurtig prototyping og additiv produksjon

Hurtig modellfremstilling eller ”Rapid Prototyping” er produksjonsmetoden brukt for å fremstille modeller på kort tid[4]. Selve metoden vil si å kunne vise til en fysisk prototype på kort tid uten å bruke dyre materialer eller produksjonsmetoder. I dagens utvikling ser vi en mye større bruk av denne type produksjonsmetode ettersom maskiner og teknologi har drevet frem muligheten for en slik prosess.

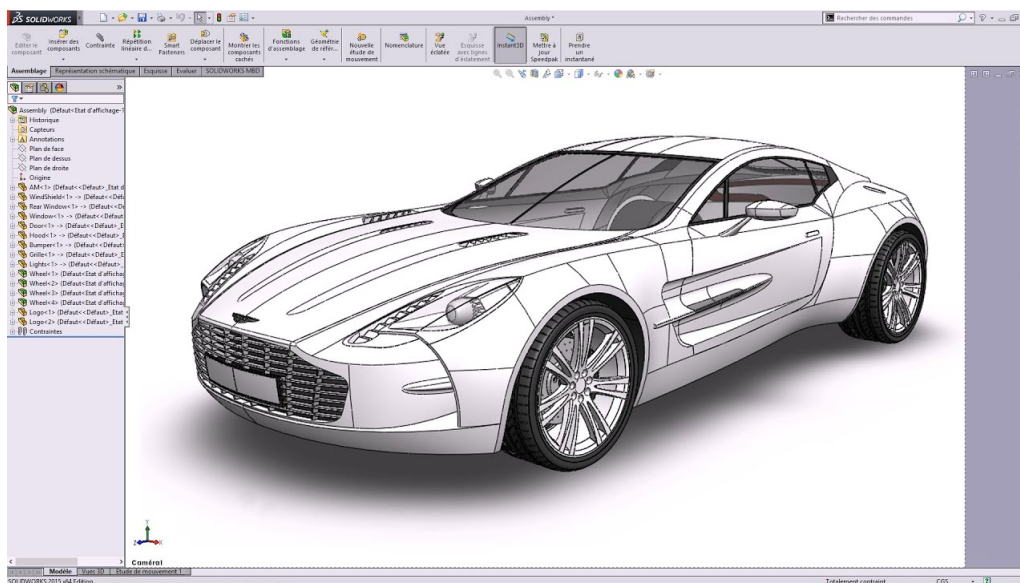
Produksjonsmetoden har fått en endring i terminologi fra ”Rapid Prototyping” til ”Additive Manufacturing”[4]. Dette kommer av at metoden for å produsere en modell på kort tid med minst mulig materialsvinn har vist seg å være best ved produksjon av flerlagsmetode. Denne metoden går ut på å lage en modell i et kosteffektivt materiale ved å legge flere tynne lag oppå hverandre til å resultere i en solid modell. Den typiske 3D-printeren som har blitt mer allmen kjent de siste årene praktiserer akkurat denne metoden for å fremstille fysiske modeller.

I industrien er dette nå blitt en kost- og tidssparende metode brukt til å fremstille prototyper[4]. Å kunne vise til en fysisk modell gir et mye større overblikk over både feil og mangler, likt som riktige utforminger. I en gitt utviklingsprosess vil derfor dette være av stor hjelp før en større produksjon av modellen eventuelt blir satt i gang med et mer kostbart materiale. I dag ser vi også at maskiner er blitt presis nok til at den hurtig fremstilte modellen er egnet for direkte bruk, dette skaper hurtigere fremstillinger som igjen sparer ressurser.

Ved hurtig modellfremstilling er det likevel flere steg som må gjennomføres før en ferdig fremstilt modell. De ulike stegene gitt under er generelle for all hurtig modellfremstilling gjort ved bruk av 3D-printer.

2.1.1 DAK - Dataassistert konstruksjon

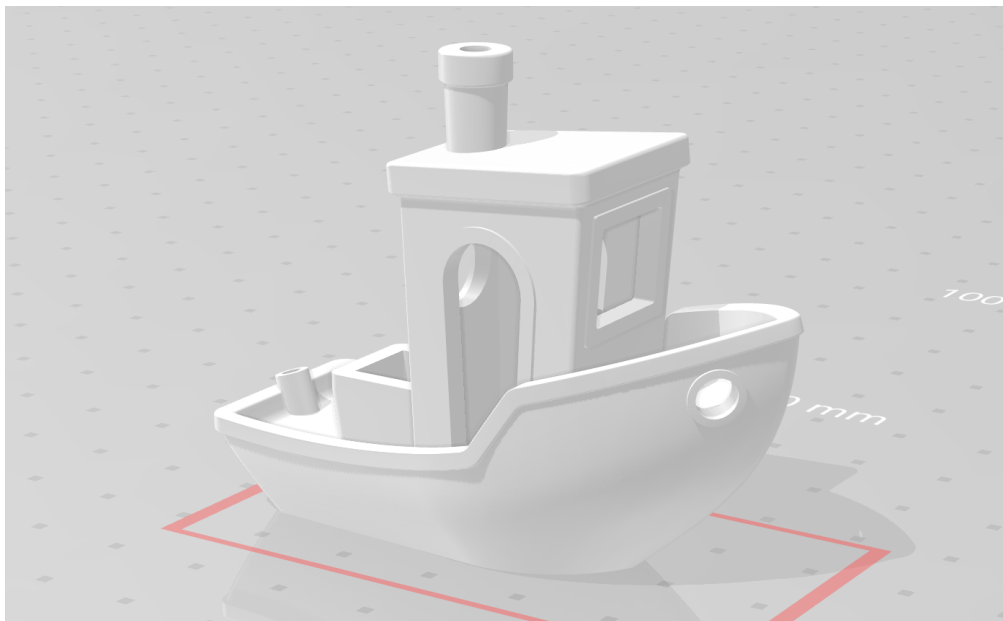
Alle fremstilte modeller ved 3D-printer må starte fra et dataprogram som beskriver den utvendige geometrien[4]. En dataassistert konstruksjon, også kjent som DAK er hva vi kaller en tredimensjonal modell representert på datamaskinen. I Figur 3 viser illustrasjonen den underliggende oppbygningen av modellen vist ved konturene[5]. En slik fremstilling kan involvere profesjonelle DAK modelleringsprogrammer som f.eks. Solid Works, Fusion 360° og lignende[6]. Slike programmer er blitt stort utbredt for ingeniører og designere for å optimalisere arbeidsflyt, men også nivået for detaljer, dokumenteringer og produktivitet.



Figur 3: CAD i SolidWorks viser underliggende oppbygning.

2.1.2 Konvertering til .STL filformat

STL filkonvertering er nødvendig for å endre en 3D-modell til riktig filformat[4]. En konvertering til .STL filformat vil fjerne den underliggende oppbyggingen av modellen og heller håndtere den fra de ytre overflatene. I figur 4 kan vi se at den underliggende oppbyggingen er fjernet i forhold til fremstillingen i figur 3. De ulike filformatene brukt av ulike DAK programmer er mange, et standardisert filformat for 3D-objekter er derfor implementert for en lettere prosess. Endringen i filformatet gjør at det som var en DAK modell nå blir behandlet som et 3D-objekt i datamaskinen, dette hjelper ved at alle 3D-objekter blir behandlet på lik måte.

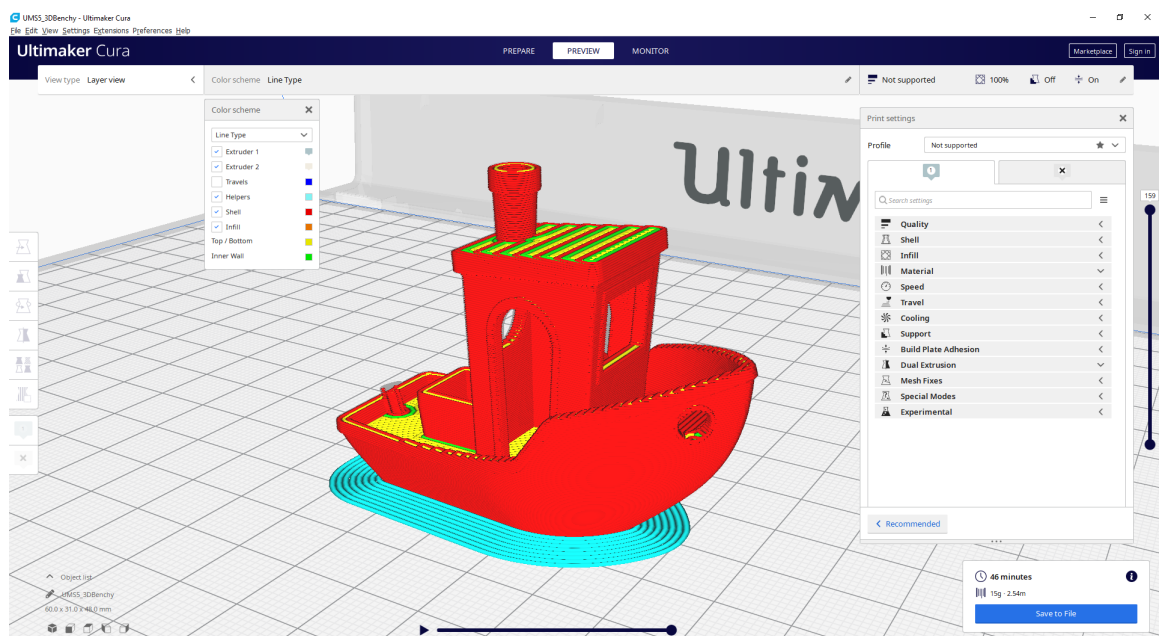


Figur 4: #3DBenchy modell i STL format

2.1.3 Slicing - Programmet Cura

Programmet som definerer de ulike parameterne for hvordan modellen skal bli 3D-printet kalles et slicing program[4]. For denne studien brukes programmet Cura, en velkjent programvare med et godt grensesnitt[7]. I programvaren er mange ulike innstillinger, de viktigste for denne studien er gitt i listen under.

- Temperatur ved dysen for ekstrudering (°C)
- Laghøyde (mm)
- Veggtykkelse (mm)
- Fyllingstetthet (%)
- Byggeplate temperatur (°C)
- Printe hastighet (mm/s)
- Kjøling (%)



Figur 5: Brukergrensesnitt av Cura. #3DBenchy modell.

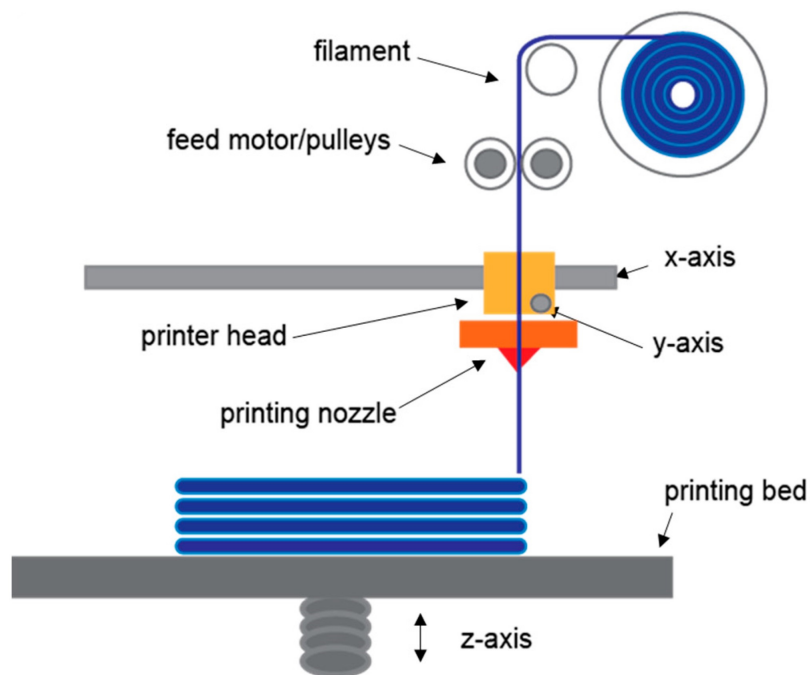
De ulike innstillingene er viktige faktorer for å sikre at modellen blir av ønskelig kvalitet. De viktigste parametrene i forhold til modellkvalitet ligger i de fire øverste punktene av listen. Temperaturen ved ekstrudering er essensiell i den forstand at materialet må smeltes effektivt nok for å gi en fin laminær flyt av materialet ut dysen, ellers kan oppbygning skje og skape ujevnheter i prosessen. Laghøyde er definisjonen av hvor tykt hvert lag av modellen er satt til å bli produsert. Laghøyde

sammen med fyllingstetthet er de to parameterne som har størst innvirkning på tid anløpt, likt med dette avhenger det også av hvor robust modellen blir.

2.1.4 FFM - Fused Filament Fabrication

Fused filament fabrication, smeltet filament fremstilling er 3D-print prosessen som bruker et kontinuerlig filament av termoplast[8]. En FFM printer fungerer på følgende måte[9]:

- 1 - En oppvarmet dyse gir ut flytende plast i tynne lag oppå hverandre.
- 2 - Lagene blir lagt på en arbeidsflate.
- 3 - Etter lagene blir lagt vil til slutt den 3D printede delen bli formet.



Figur 6: Illustrasjon av FFM Produksjon .

3D-printing er en metode innenfor additiv produksjon[4], og selve begrepet 3D-printing er allment kjent. Produksjonsmetoden viser til å legge lag for lag oppå

hverandre til man har en tredimensjonal modell. En god sammenligning kan være den tradisjonelle 2-aksede printeren for fotografier, ved å tilføre en tredje akse i z-retning vil det bli mulighet for å lage 3D-modeller.

En økende utvikling i teknologi på dette området har gjort at kostnaden for 3D-printere har gått betraktelig ned de siste årene[10]. Dette har gjort at flere aktører har fått muligheten til å lage sine egne modeller i sitt eget hjem. Et skifte fra hurtig prototyping til modellbygging har derfor skjedd, dette fordi folk flest ikke bruker 3D-printere på lik måte som industrien. Dette har utviklet seg til en stor hobby for flere, store internettsamfunn har blitt opprettet hvor en kan dele sine modeller med andre klart for 3D-printing.

2.2 Termoplast

Plast i dag er stort utbredt, men også et felt hvor det gjenstår mye forskning på sine spesielle egenskaper, som oppbygningen av selve materialet og bruksområdet[11].

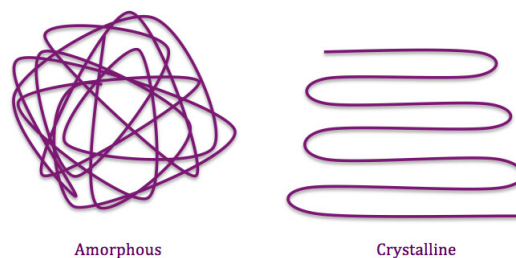
Materialet er enten bygget opp av naturlige eller syntetiske polymerer som er hovedkomponenten i plast[11]. Kjedeformede molekyler skaper de kjemiske forbindelsene i plasten, dette utgjør grunnlaget i materialet. Plast er definert inn i ulike grupper, for denne studien er det satt fokus på termoplast.

Termoplast består av lange kjeder av molekyler linket sammen[12]. Ved romtemperatur er materialet solid, men ved oppvarming svekkes de molekylære kreftene slik at materialet blir mykt og fleksibelt. Innenfor termoplast må vi skille mellom to hovedgrupper:

Amorf struktur er også kjent som ikke-krystallinske materialer[13]. Den karakteristiske oppbygningen gir at materialet ikke har en regelmessig molekylær oppbygging. Amorf struktur gir ofte gjennomsluktige materialer, et kjent eksempel er glass. Den tilfeldige strukturen gjør materialet dårlig resistent mot utmattelse og slitasje, likt med dårlig motstand mot kjemikalier ettersom at molekylene er mer

åpen for dypere angrep i materialet.

Krystallinsk struktur har polymære kjeder i regelmessig oppbygning[14]. Denne strukturen er grunnlaget for de mekaniske egenskapene for materialet. Med en slik oppbygning har som regel materialet en gitt farge. Med tett innpakning av molekyler skaper det god resistens mot utmattelse og slitasje, også god motstand mot kjemikalier ettersom at de tette molekylære bindingene forhindrer dypere angrep i materialet.



Figur 7: Amorf struktur (venstre) mot krystallinsk struktur (høyre)

I figur 7 er forskjellen i struktur illustrert[15]. De amorfe materialer er lette å arbeide med innenfor modellering. De er modellerbare over et bredere temperaturspekter som gjør det lettere å prosessere ved FFM. Krystallinske materialer har et mer spesifikt smeltepunkt som gjør det vanskeligere å behandle[16]. Den regelmessige oppbygningen gir store indre molekylære krefter som skaper en høy prosent krymping ved nedkjøling av materialet.

2.2.1 HDPE - High Density Polyethylene

Polyeten med høy tetthet er en termoplastisk polymer[17]. Typisk for denne typen plast er sin gode egenskap styrke til tetthet rate, sammen med sin resistens mot flere løsningsmidler gjør det materialet godt egnet for produksjon av f.eks. plastflasker, trykkrør, avløpsrør og emballasje. Med sin tetthet og liten forgrening i den kjemiske oppbygningen gir det sterke indre molekylære krefter. Grunnet oppbygningen gjør det materialet godt motstandsdyktig mot utmattelse og stress.

High Density Polyethylene (HDPE)	
Tetthet	950 kg/m ³
Smeltepunkt	120 - 180 °C
MFR	0.37 g/10 min
Krystallinitet	70 - 80 %
Rate for krymping	1.5 - 4.0 %

Tabell 1: HDPE materialegenskaper

HDPE er en semi-krystallinsk termoplast[17][18]. For denne studien er krympeegenskapen til HDPE essensiell å dokumentere. Krympingen av HDPE vil skje i krystalliseringsfasen, oppvarming og nedkjøling av materialet rundt 110°C. Nivået av krystallisering vil være avhengig av prosessparameterne brukt; temperatur, trykk, tykkelse, kjølehastighet osv.

Videre viktigere faktorer som molekylær vekt og vektdistribusjon vil ha en effekt på krystallisering. Krymping kan gi en effekt mellom 1.5 - 4% i forhold til opprinnelig flytende størrelse[19]. Nivået på krymping er avhengig i forhold til tid og temperatur ved ekstruderingsprosesser brukt i denne studien. Lettere sagt vil krystallisering skape et indre stress i materialet som gjør at det krymper etter oppvarming ved hurtig nedkjøling etterfulgt.

2.2.2 LDPE - Low Density Polyethylene

Polyeten med lav tetthet er også en semi-krystallinsk termoplastisk polymer [20]. Den største forskjellen mellom HDPE og LDPE er at sistnevnte har en lavere tetthet enn sin nærmeste slektning. Også forskjellig fra HDPE har LDPE en mindre krystallinsk struktur, dette gir derfor andre egenskaper for materialet. Den mindre krystallinske strukturen gjør materialet mykere og mer fleksibelt, også et lavere smeltepunkt er resultat av oppbygningen. Ved resirkulering er det viktig at HDPE og LDPE blir adskilt ettersom at de har forskjellige klassifiseringsgrader for resirkulering[21]. Dette er vanskeligere for LDPE ettersom materialet ofte er brukt

til produkter vanskelig å sortere som plastposer, emballasjer (skum) og generelt produkter med myk plastemballasje.

Low Density Polyethylene (LDPE)	
Tetthet	960 kg/m ³
Smeltepunkt	105 - 115 °C
MFR	1.11 g/10 min
Krystallinitet	45 - 55 %
Rate for krymping	2.0 - 4.0 %

Tabell 2: LDPE materialegenskaper

Fra figuren med oversikt over materialegenskaper for LDPE kan vi se av databladet at materialet faktisk har en høyere tetthet enn HDPE[18]. Denne gitte egenskapen for materialet er egentlig ikke korrekt ettersom vi vet at LDPE har en lavere tetthet enn HDPE, til vanlig ser vi at LDPE har en tetthet mellom 910 - 925 kg/m³ [17] [19].

2.2.3 PP - Polypropylene

Polypropylene, også kjent som polypropen er en semi-krystallinsk termoplast[20]. Polypropen har en rekke ulike bruksområder grunnet sin kjemiske og vannabsorpsjon resistans, vi finner platen til bruk i førstehjelpsprodukter, rengjøringsartikler og i tekstiler for å nevne noen. Materialet har god elastisitet og tøffhet, dette vil si sin egenskap til å deformeres uten å knekke. En slik egenskap kan derfor bli brukt til hva vi kaller levende hengsler, typisk for ikke-bærende konstruksjoner som lokket på en flaske. Dette viser også til at materialet har god resistans mot utmattelse, som at en kan åpne og lukke f.eks. en ketchup kork mange ganger før den blir ødelagt.

Polypropylene (PP)	
Tetthet	910 kg/m ³
Smeltepunkt	130 - 171 °C
MFR	22.86 g/10 min
Krystallinitet	40 - 60 %
Rate for krymping	1.5 - 2.0 %

Tabell 3: PP materialelegenskaper

Likt med HDPE og LDPE ser vi en høy prosent av krystallinitet i materialet[19][18].

2.2.4 PLA - Polylactic acid

PLA, polymelkesyre er anderledes enn flere andre termoplastiske polymerer, dette av at materialet stammer fra fornybare ressurser som maisstivelse eller sukkerrør[22]. Dette gjør plasten bedre for miljøet i forhold til annen plast laget av olje. PLA er en av de to største materialene brukt innenfor FFM ved siden av termoplasten ABS. Ettersom at materialet er av kategorien termoplast gir dette muligheten for god resirkulering, dette fordi strukturen ikke vil få en merkbar forandring, slik som de tre tidligere nevnte termoplastene.

Polylactic Acid (PLA)	
Tetthet	1240 kg/m ³
Smeltepunkt	145 - 160 °C
MFR	6.09 g/10 min
Krystallinitet	-
Rate for krymping	0.3 - 0.5 %

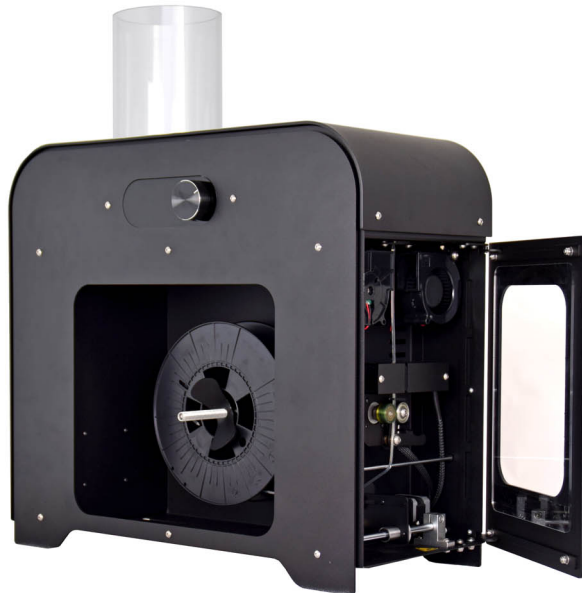
Tabell 4: PLA materialelegenskaper

Det finnes flere ulike typer av PLA, ofte rangert etter prosent krystallinitet[19]. Den transparente PLA fra Ultimaker er høyst sannsynlig å være av liten grad krystallinsk oppbygning, uansett vil nok PLA gi en liten rate for krymping uten at det skal gi større problemer innenfor FFM[18].

2.3 Filamentproduksjon og testing

2.3.1 Filamentekstrudering

Filamentekstrudering er prosessen å behandle rå plast til en homogen tråd mot-takelig for 3D-printer[23]. Filamentet er som regel laget av termoplast for sine egenskaper for modellering. Et bredt spekter av ulike typer plast er blitt produsert for å dekke ulike behov. Velkjente termoplast typer er ABS (acrylonitrile butadiene styrene), PLA (polylactic acid), PET (Polyethylene terephthalate), og PE (Polyethylene) for å nevne noen [24].



Figur 8: Maskinen Precision 350 fra 3Devo

Filamentekstruderingen blir utført ved hjelp av maskinen Precision 350 fra produsenten 3Devo[25]. Maskinen tar imot materiale i form av både pellets og granulert plast. For å omforme råmaterialet til en jevn homogen tråd er maskinen bygget opp av flere viktige komponenter som jobber i sammenheng. Brukerpanelet gir en rekke ulike innstillinger for å kunne produsere et filament innenfor de samme kravene som kommersiell produksjon. Et kommersielt produsert filament gir et slingringsmonn for en diameter på $2.85\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$ [26]. For 3D-printeren

brukt i denne oppgaven, Ultimaker S5, er en diameter for filamentet på 2.85mm den beste anvendelige størrelsen. For å møte disse kravene gir maskinen muligheter for innstillinger som følger[25];

- 4 individuelle varmeelementer fra 0 - 350 °C
- Skrue hastighet fra 2 - 15 RPM
- Filament diameter tykkelse 0.5 - 3 mm
- Utskiftbar dyse på 4 mm
- 2 luftkjølte vifter for kjøling fra 0 - 100 % effekt

For å starte prosessen stiller man inn de fire varmeelementene individuelt over plastens dokumenterte smeltepunkt. Innløpet for plasten kalles for ”hopperen”, her fylles det i ønsket mengde plast man vil behandle. Varmeelementene er montert rundt en skrue inne i maskinen som står for både å presse sammen og drive plasten gjennom de ulike temperaturene. Ved enden av skruen vil filamentet komme ut gjennom en dyse i flytende form ved en åpning på motsatt side av hopperen. Cirka ti centimeter under dysen er det montert to mindre hjul hvor man entrer den flytende plasten, hjulene sørger for å dra plasten ut i en jevn hastighet for å skape riktig diameter i forhold til de satte innstillingene.

To vifter til kjøling og en optisk sensor er til hjelp for å lage filamentet etter de satte parametrene. Den optiske sensoren står for kontinuerlig avlesning av diameter på filamentet, med mulighet for logging til datamaskin. Alle de ulike elementene opererer sammen ved hjelp av hjernen i maskinen. Når maskinen gir en tilbakemelding om at strømmen av filament er homogent kan spolingsprosessen startes. Her blir filamentet lagt på en spole for lagring og videre bruk til 3D-printer.

2.3.2 MFR - Melt Flow Rate

ISO standard 1133:2005 er prosedyren gitt for å måle strømningshastigheten av termoplast[27]. Standarden gir tilbake en indeks, ”Melt Flow Rate”, denne bestem-

mer viskositeten av termoplasten. Levert i databladene vedlagt fra IVAR er denne ISO testen gjennomført, de gitte ratene er vist i listen under:

- HDPE, MFR = 0.37 g/10 min
- LDPE, MFR = 1.11 g/10 min
- PP, MFR = 22.86 g/10 min
- PLA Transparent, MFR = 6.09 g/10 min

Ved kommunikasjon med leverandøren av filament-ekstruderen har databladene levert av IVAR blitt gjennomgått av materialspeialisten hos 3Devo. For å få en pekepinn for hvordan materialene kommer til å oppføre seg ved produksjon av filamenter har det blitt levert en oversikt over egenskaper ved de ulike indeksene. Denne listen gir idé for hva man kan forestille seg ved manipulering av termoplast. Å manipulere en termoplast vil være å behandle plasten til et filament, dra til ønsket diameter, kjøle og spole.

Egenskaper for termoplast i forhold til ”Melt Flow Rate”:

- **MFR under 5:**
Har en høy viskositet. Dette gjør materialet godt egnet for ekstrudering, plasten flyter med god stabilitet og er derfor lett å manipulere.
- **MFR over 5-10:**
Slike indekser er egnet for ekstrudering, vil også være gode materialer for 3D-printing.
- **MFR over 10:**
Her blir viskositeten lav og noen ganger utilstrekkelig for formålet. Materialet kan derfor ikke flyte gjennom løpet konsekvent, dette gjør materialet vanskelig å manipulere.
- **MFR over 20:**
Med en slik grad vil materialet være veldig vanskelig å manipulere. Å kontrollere flyten av materialet må gjøres med enorm presisjon for å kunne manipulere termoplasten som ønsket.

For de tre termoplastene levert av IVAR ser det ut fra MFR indeksene at det vil være vanskeligheter i ulike aktiviteter. Å finne de korrekte parameterne for å produsere et filament innenfor slingringsmonnet for diametere vil bli en tidkrevende prosess. Hvordan materialet reagerer i forhold til nedkjøling sammen med dragning til ønsket diameter blir en utfordring for å finne de korrekte parameterene.

2.3.3 Utfordringer ved HDPE, LDPE og PP i FFM

Ved ekstrudering av filamenter vil de resirkulerte termoplastene oppføre seg ulikt. For materialene HDPE og LDPE med en MFR innenfor 0 - 5 g/10min vil denne platen ha en høy viskositet og være egnet for ekstrudering. I motsetning vil PP platen med MFR over 20 være vanskelig å manipulere til ønsket diameter på filamentet grunnet den lave viskositeten i smeltet form.

Ved 3D print er alle de tre resirkulerte termoplastene av veldig høy krystallinitet. Dette vil være samkjørt med hvor stor rate av krymping som vil skje for materialet ved FFM prosessen. Her kan en allerede rangere materialene sett fra materialegenskaper ved start:

- HDPE - Lite egnet
- LDPE - Bedre egnet
- PP - Best egnet

Alle de tre materialene faller under kategorien ”semi-krystallinsk råvare termoplast”. Disse materialene ligger nederst i næringskjeden over plast med kategorier[16]:

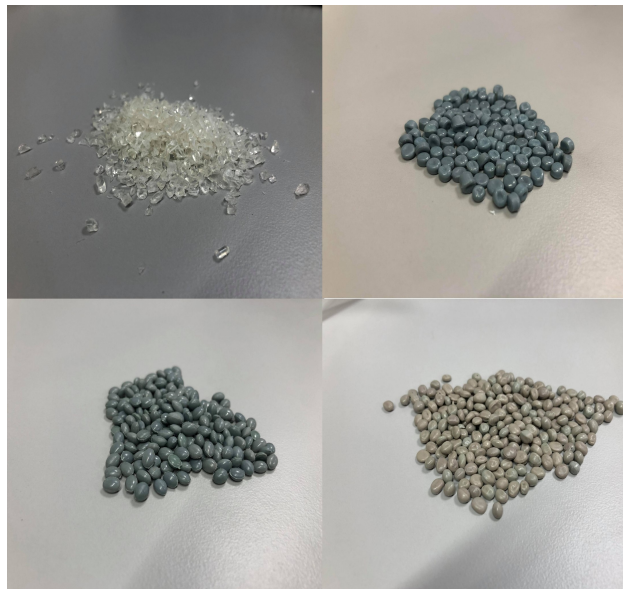
- 1. Semi-crystalline High Performance Thermoplastics.
- 2. Semi-crystalline Engineering Thermoplastics.
- 3. Semi-crystalline Commodity Thermoplastics.

Materialer i kategori 3 gir vanskelige karakteristiske trekk som et presist smeltepunkt, dårlige muligheter for å manipulere og vanskeligheter for å binde seg. Dette vil gi utfordringer både ved filament ekstrudering og 3D-print.

3 Metode og materialer

3.1 Materialer og eksperimentelt utstyr

3.1.1 Materialer



Figur 9: Granulert PLA (øverst venstre), HDPE (øverst høyre), LDPE (nederst venstre) og PP (nederst høyre)

De tre resirkulerte materialene HDPE , LDPE og PP ble levert av ettersorteringsanlegget IVAR. PLA materialet ble først levert i filament form, deretter granulert til mindre biter ved bruk av SHR3D IT maskinen fra 3Devo. Materialet fungerte som en referanse gjennom prosessen.

3.1.2 Eksperimentelt utstyr

Utstyr tilgjengelig ved UiS verksted og laboratorie brukt:

- Precision 350 filamentekstruder, laget av 3Devo.
- SHR3D IT granuleringsmaskin for plast, laget av 3Devo

- Zwick Roell strekk- og kompresjonstest maskin
- Olympus GX53 mikroskop
- Ultimaker S5 3D-printer
- Struers Citopress-30

3.2 Filamentproduksjon

3.2.1 Forberedelse av plast

De tre resirkulerte plasttypene HDPE, LDPE og PP ble levert IVAR ettersorteringsanlegg i pellets form klar for filamentekstrudering.

PLA ble levert i filament form og måtte granuleres først for å så bli ekstrudert til filament igjen. Denne prosessen ble utført med maskinen SHR3D IT levert av 3Devo. Plasten ble klippet opp i mindre biter for å passe innløpet av maskinen. Granuleringen av plasten ga PLA i biter med en størrelse på ca. 2 mm. Se bilde av maskinen i figuren under[28]:



Figur 10: SHR3D IT maskin levert av 3Devo.

Ingen av termoplastene brukt i studien har evne til å trekke til seg væske, derfor ble ingen materialer forhåndstørket før prosessen.

3.2.2 Filamentekstrudering - Precision 350

Materialet ble matet inn i hopperen på maskinen hvor det ble varmet til flytende form. Den smeltede platen presset gjennom av skruen ga ut filamentet gjennom en dyse i enden av maskinen. Ved oppstart ble logging opprettet ved å koble til datamaskin til maskinen, programmet sørget for en kontinuerlig oversikt til prosessen som ble utført.

En generell fremgangsmåte ble laget for å skape det beste resultatet med en filament diameter på $2.85\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$. Flere testkjøringer ble grunnlaget for den

helhetlige metoden.

Grunnleggende:

- Varmeelementene dyttet ut den forrige plasten lagt igjen i maskinen ved oppstart. Varmeelementene måtte derfor kunne smelte begge typer plast ved oppstart.
- Termoplast er vanligvis ekstrudert under temperaturen brukt for 3D-printing.

Ved oppstart av nytt filament:

- Varmeelementer ble alltid satt til 10% over det dokumenterte smeltepunktet ved start for ny type plast.
- Startet ved 5 RPM for skrue. 3.5 - 6 RPM ga de beste resultater.
- Satte fan speed til 50%. Best å begynne ved midten av effekt for å ha muligheter til å justere både opp og ned.

Justeringer da prosessen hadde startet:

- Økte/minsket temperatur for varmeelementer med 5°C av gangen for høyere kontroll.
- Ved saktere utflyt av filamentet ble ikke temperaturen sunket ytterligere.
- Varmeelementer ble satt med en "bell shaped" prosess; eks.
205°C → 215°C → 210°C → 205°C → Output

Endringer gjort ved observasjoner:

- Dersom filamentet ble for rennende ved utløpet var varmeelementer for høyt innstilt.
- Bobler på filamentet var grunnet for kald dyse. Viftene for kjøling ble justert ned.
- Oppbygninger ved dysen eller sakte utløpshastighet var grunnet for lav temperatur ved varmeelementer.

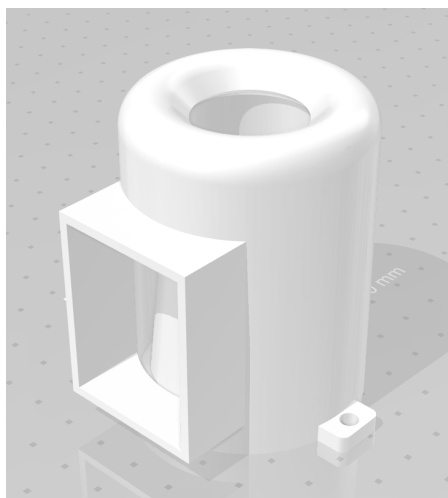
Spoling:

- Viste seg viktig å holde filamentet stramt før man knyttet filamentet til spolen.
- Spolen skulle ikke dra filamentet med kraft, men heller følge det inn.
- Justerte hastighet av spoling manuelt ved skrue på baksiden av maskinen. Testet kraften til spolen ved å sette en lett finger på spolen for å føle kraften.

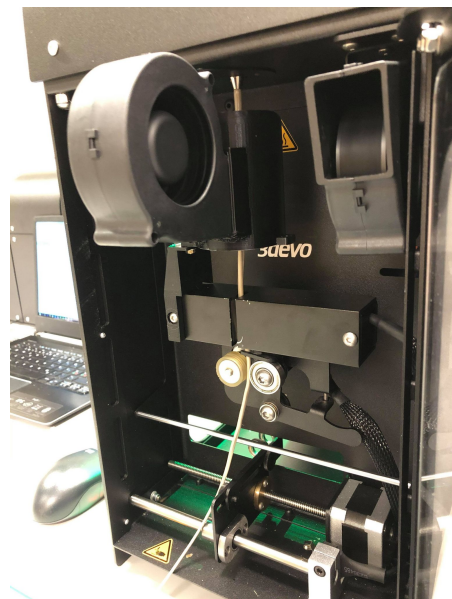
Avslutning - rengjøring:

- Bare 3 typer plast kunne være igjen i maskinen.
 - HDPE
 - PLE
 - Devo Clean Mid Temp
- Ved rengjøring kunne temperaturen settes til 285°C for størst rengjøringseffekt for å få ut den gamle plasten ekstrudert.

3.2.3 "Circular Cooling Flow" - Kjøling for filamentekstrudering



Figur 11: .STL fil illustrasjon av "Circular Cooling Flow" komponent



Figur 12: "Circular Cooling Flow" montert på maskin ved ekstrudering

Ved ekstrudering av filamenter ble det oppdaget at viftene for kjøling ikke ga en uniform kjøling på filamentet. Da det originale oppsettet på viftene ikke var effektivt nok, to motsatt rettet vifter med kjøling på hver sin side av filamentet, ble produsenten 3Devo kontaktet. En komponent kalt "Circular Cooling Flow" ble levert i .STL format for å 3D-printe selv. Denne metoden for kjøling ble testet ved ekstrudering av PP materiale ettersom det trengte best kjøling.

3.3 Testing

3.3.1 #3DBenchy - Modell for egenskapstest ved 3D-printer

Alle de produserte filamentene ble satt på prøve i Ultimaker S5. Mottakeligheten av filamentet i printeren ble dokumentert for å bekrefte resultater fra filament produksjonen.

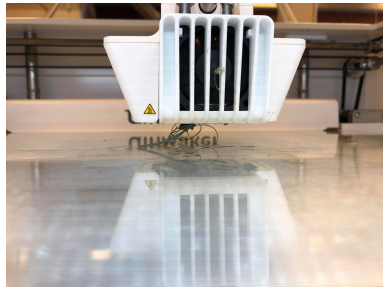
En modell levert av #3DBenchy, en velkjent egenskapstest for 3D-printere og termoplast ble produsert. Den mindre modellen ga resultater for 3D-printens kvaliteter vist i figuren under. Modellene produsert ble vurdert fra observasjoner av modellens utforming.



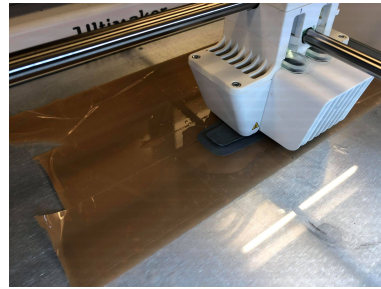
Figur 13: #3DBenchy egenskapstest

3.3.2 Ulike metoder for 3D-print

Ved kjøring av 3D-printer ble det testet ulike metoder for å få de beste resultatene. Et problem som oppstod var materialenes dårlige egenskap til å klebre seg til arbeidsflaten av 3D-printeren. Flere arbeidsflater ble testet for å finne riktig underlag, arbeidsflatene er presentert i figuren under. Begge typer lim presentert i figuren ble også testet oppå de andre flatene.



(a) Glassplate, original flate



(b) Grå pakketeip av polypropen



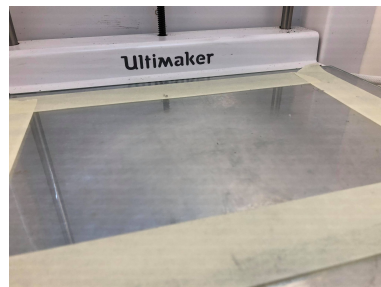
(c) Magigoo høytemperatur lim



(d) Pritt skolelim



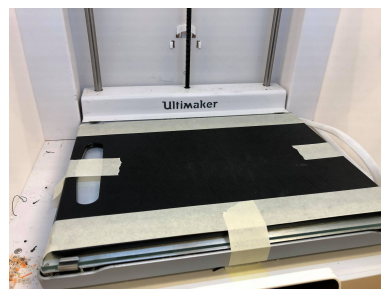
(e) Maskeringsteip



(f) Plastunderlag for 3D-print til ABS



(g) Scotch blå maskeringsteip



(h) Skjærefjøl i plast

Figur 14: De ulike arbeidsflater brukt til 3D-print

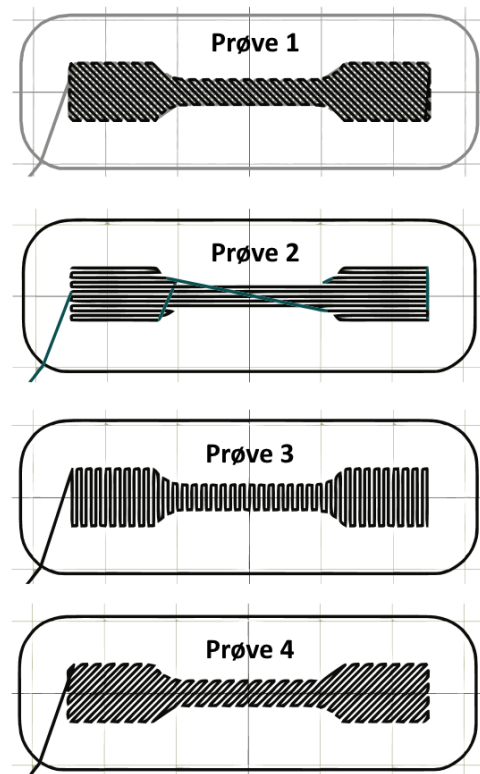
3.3.3 Strekktest for 3D-printede prøvestykker

Strekktest ved ISO 527-2: Tensile Testing for Plastics er en internasjonal standard for å bestemme strekkegenskaper ved plastmaterialer[29]. Utførelsen av strekktest ble gjort for å få tilbake resultater om materialet gitt i listen under:

- Styrke
- Strekkmodulus
- Forlengelse

Prøvene for strekktest ble printet med 100% tetthet ved 4 ulike innstillinger for mønster. Alle prøvene ble printet flatt i XY orientering av 3D-printer. Utformingen av prøvestykkene er i henhold til standarden, hvor retningsmønster er ulikt for å teste styrke for ulik oppbygning. Se figur under. Resultatene ble sjekket opp mot databladet tilhørlig hvert materiale testet.

- Prøve 1: 45° første lag, 45° andre lag
- Prøve 2: 90° alle lag
- Prøve 3: 0° alle lag
- Prøve 4: 45° alle lag



Figur 15: Retning av mønster for 3D-printede strekkprøver.

3.3.4 Forberedelse av materialer for mikroskop

For mikroskop ble bare de tre resirkulerte plasttypene, HDPE, LDPE og PP undersøkt i mikroskop. Hensikten med mikroskop var for å se etter urenheter og annet smuss som kanskje kunne være til stede i materialet.

Forberedelse av prøvene til mikroskop ble gjort med Citopress-30 maskinen brukt for å støpe prøver til både mikroskop og hardhetstesting. Pelletsene av materialet ble lagt oppi pressen hver for seg for støping ved ulike smeltetemperaturer. Et anti-stick pulver ble påført arbeidsflatene til maskinen for å lettere løsne prøven etter støping.

- HDPE = 135°C
- LDPE = 120°C
- PP = 165 °C



Figur 16: Citopress-30 maskin for støping av mikroskop prøver.



Figur 17: Antistick til Citopress-30.

Under smelting av prøvene ble en tynn plastfilm konstruert rundt prøven. Dette er helt normalt ved støping av termoplast. For undersøkelsen ble den ene siden

av prøven slipt med P-1000 papir for å fjerne filmen for å gi bilder direkte på materialet i mikroskopet. Se figurer under for prøvenes utforming.

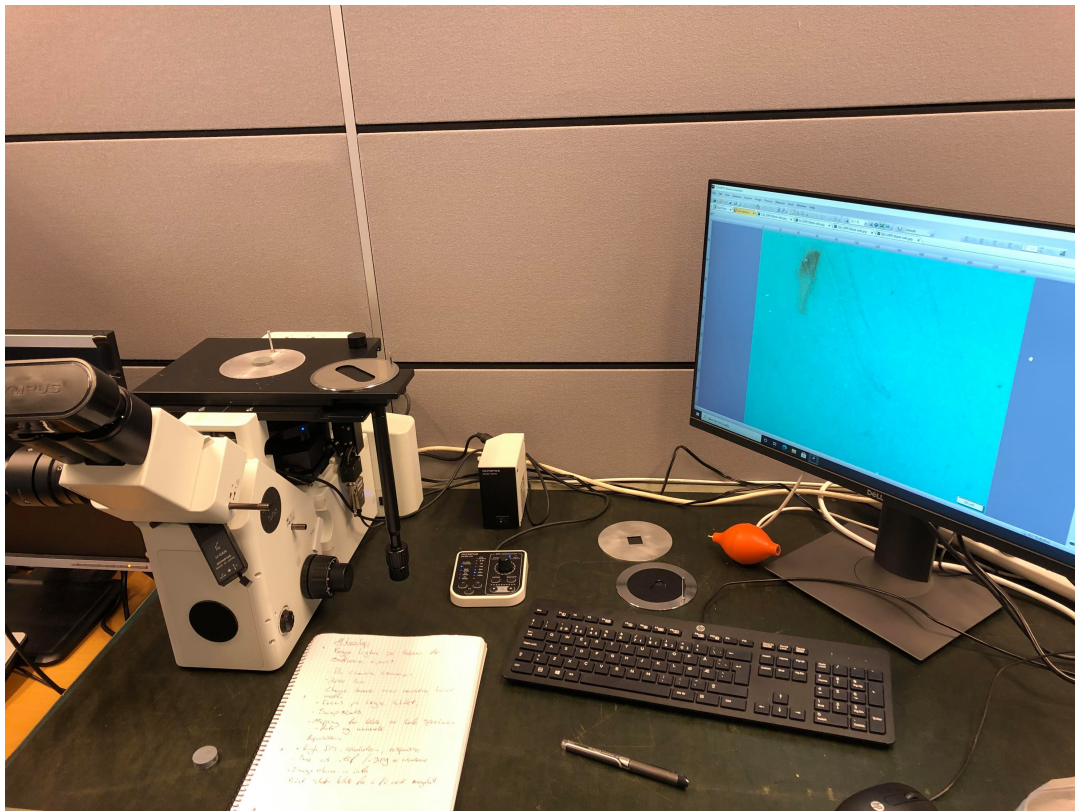


Figur 18: Prøver for mikroskop med blank side opp.



Figur 19: Prøver for mikroskop med slipt side opp.

Det ble tatt bilder av prøvene på begge sider, blank side og slipt side. Med Olympus GX53 mikroskopet koblet til datamaskin ble undersøkelsen utført lettere. Prøven ble lagt oppå arbeidsflaten av mikroskopet for at linsen ville få et direktesendt bilde på materialet. Bilder ble tatt med zoom ved 2.5x, 5x, 10x, 20x, 50x og 100x. Se oppsett av mikroskop i figuren under.

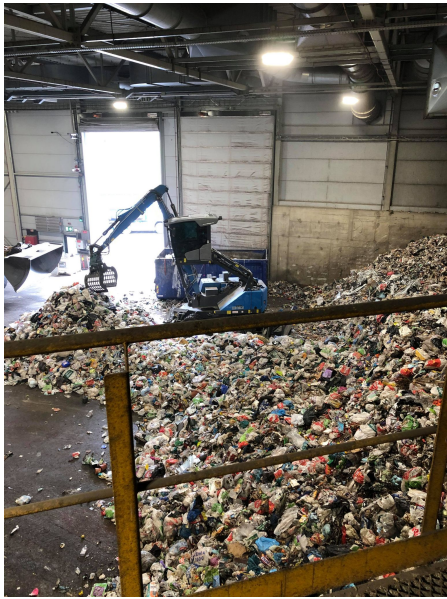


Figur 20: Olympus GX53 mikroskop koblet til datamaskin

3.4 Besøk til IVAR ettersorteringsanlegg

Som en del av studien ble det gjennomført et besøk til ettersorteringsanlegget IVAR. Besøket var også i sammenheng med presentasjon av resultater utarbeidet i oppgaven, samtidig med andre oppgaver med relasjon til IVAR. Alle involverte i studien var til stede under omvisning og presentasjoner.

Som start fikk vi se hvordan anlegget fungerte fra ende til annen. Sjøppel kommer inn som helt vanlig restavfall, gjennom sortering i mange avdelinger ville til slutt termoplast av pellets brukt i denne studien bli sluttresultatet. Anlegget sorterer all restavfall avhengig av bruksområde. Mye av avfallet går til forbrenning brukt til fjernvarme, mens annet kan resirkuleres som papir og plast.



Figur 21: Ankomsthall for restavfall



Figur 22: Sortering av restavfall

Da vi var på anlegget var siste del av anleggets plastsortering ikke i drift. Dette fordi anlegget er i overtakelse av nye eiere, hvor partene ikke er blitt enige om kvaliteten på den resirkulerte plasten.

Det var en lærerik opplevelse å se hvordan anlegget fungerte. Å ha sett toppmoderne maskiner sortere skittent restavfall med enorm presisjon ga en god drivkraft til videre ingeniørarbeid.

4 Resultat og diskusjon

4.1 Filament produksjon

Resultater fra filament produksjonen er delt opp etter de ulike typene plast i delkapitlene som følger. Merk at plasten vil først gå gjennom varmeelement 4, deretter til 1 før utløpet i dysen.

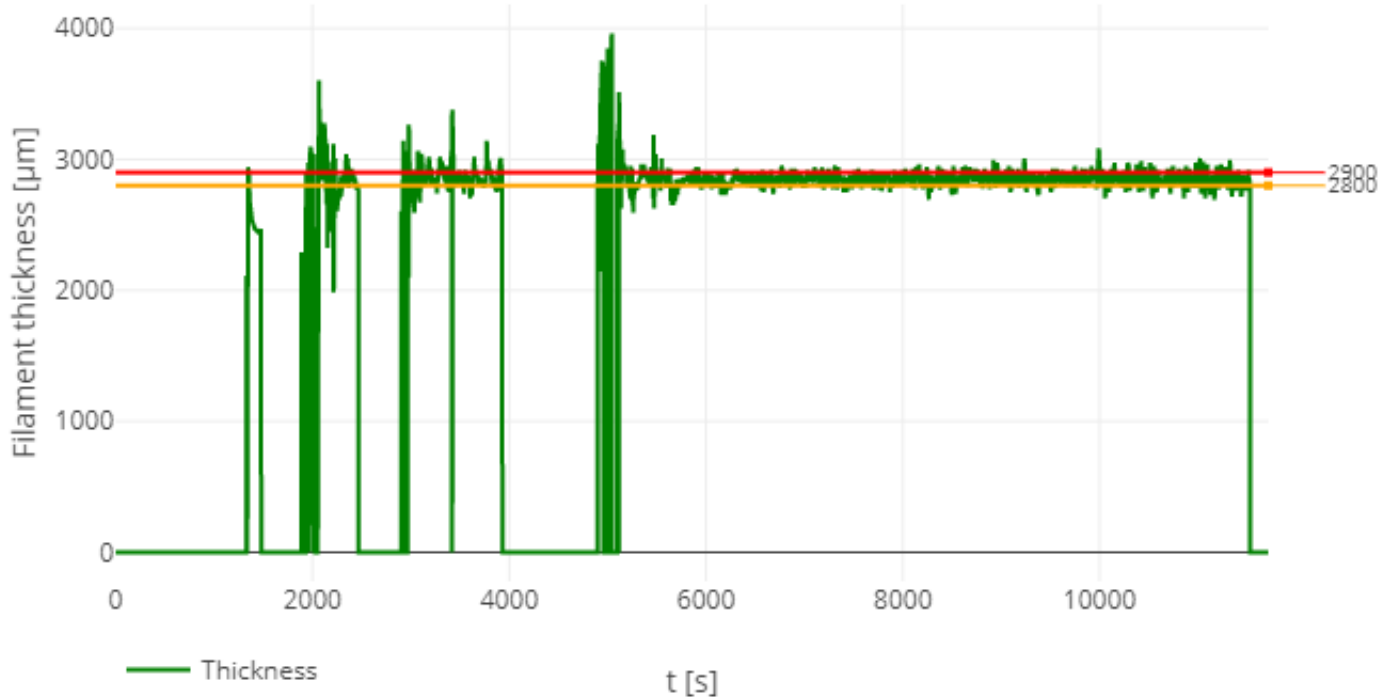
4.1.1 HDPE - High Density Polyethylene

Tabell 5 viser endringer gjort underveis for filamentekstrudering av HDPE fra start til slutt.

Parameter	Varmeelement				Skrue	Vifte hastighet	Tid	
	4	3	2	1				
Innstilt verdi	180 °C	180 °C	180 °C	180 °C	5.0 RPM	50 %	t=0s	
Innstilt verdi	170 °C	170 °C	170 °C	170 °C	5.0 RPM	50 %	t=2700s	
Innstilt verdi	170 °C	175 °C	175 °C	165 °C	5.0 RPM	50 %	t=3150s	
Innstilt verdi	170 °C	175 °C	175 °C	160 °C	5.0 RPM	50 %	t=3700s	
Innstilt verdi	170 °C	175 °C	170 °C	155 °C	5.0 RPM	60 %	t=3800s	
Innstilt verdi	170 °C	175 °C	165 °C	155 °C	5.0 RPM	70 %	t=4500s	
Innstilt verdi	170 °C	175 °C	165 °C	160 °C	5.0 RPM	75 %	t=5000s	
Innstilt verdi	170 °C	175 °C	165 °C	160 °C	5.0 RPM	75 %	t=5700s	Spooling startet

Tabell 5: HDPE - Innstillinger ved maskin gitt i forhold til tid anløpt

Figur 23 viser logg av HDPE filament diameter i forhold til tid anløpt.



Figur 23: HDPE - Filament diameter i forhold til tid anløpt

HDPE ble suksessfullt produsert til et filament. Avlesningen vist i figur 23 viser at filamentdiameteren er trygt innenfor rammebetingelsene ved start av spoling, men med noen avvik underveis.

Det viste seg lettere enn først antatt å manipulere materialet ved ulike innstillinger på ekstruderingsmaskinen. Under prosessen responderte materialet godt på endringer gjort ved temperatur og kjøling, dette gjorde at materialet var lett å dra til ønsket diameter. Lest fra figur 23 ser vi at diameteren avlest ved den optiske sensoren ligger som regel innenfor det gitte slingringsmonnet på $2.85\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$ med få mindre avvik.

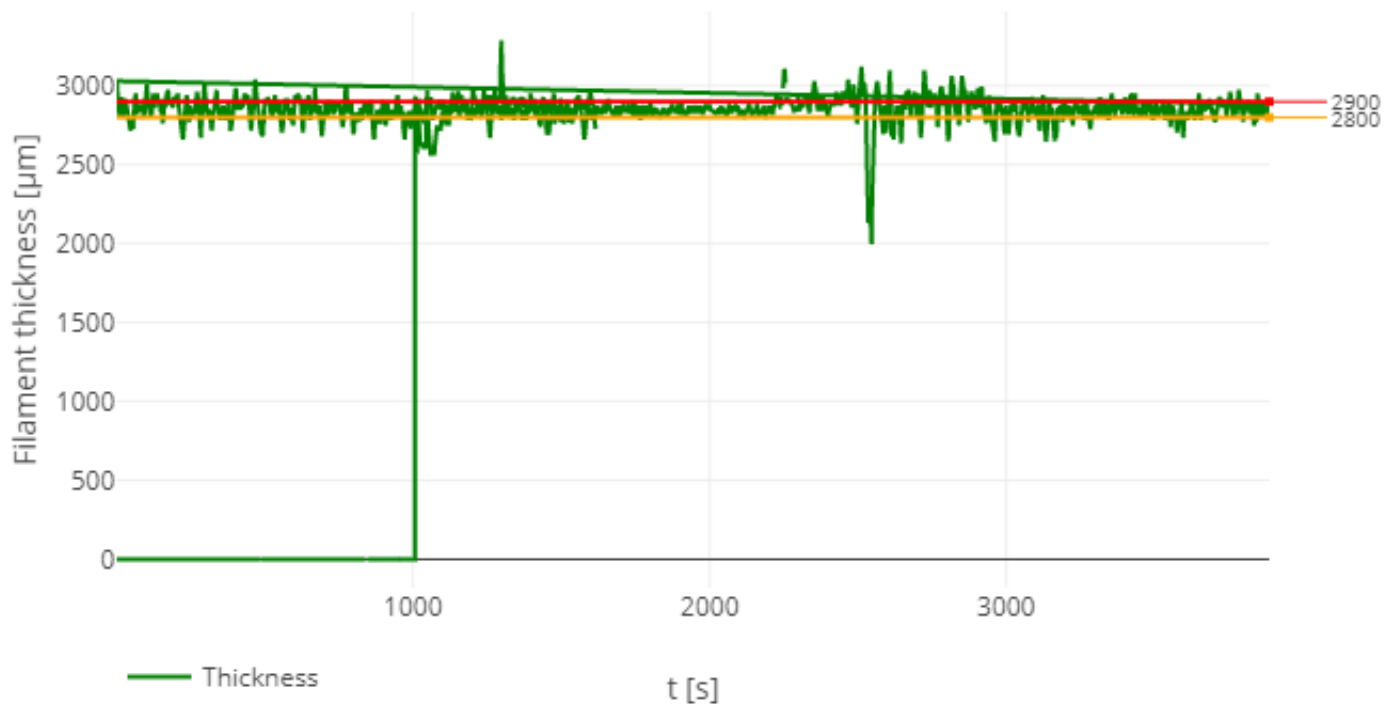
4.1.2 LDPE - Low Density Polyethylene

Tabell 6 viser endringer gjort underveis for filamentekstrudering av LDPE fra start til slutt.

Parameter	Varmeelement				Skrue	Vifte hastighet	Tid	
	4	3	2	1				
Innstilt verdi	170 °C	170 °C	170 °C	170 °C	5.0 RPM	50 %	t=0s	
Innstilt verdi	140 °C	150 °C	150 °C	150 °C	5.0 RPM	40 %	t=1400s	
Innstilt verdi	140 °C	150 °C	150 °C	150 °C	5.0 RPM	40 %	t=2600s	Spooling startet
Innstilt verdi	140 °C	150 °C	150 °C	150 °C	5.0 RPM	20 %	t=2950s	
Innstilt verdi	140 °C	150 °C	150 °C	150 °C	5.0 RPM	10 %	t=3150s	

Tabell 6: LDPE - Innstillinger ved maskin gitt i forhold til tid anløpt

Figur 24 viser logg av LDPE filament diameter i forhold til tid anløpt.



Figur 24: LDPE - Filament diameter i forhold til tid anløpt

LDPE ble suksessfullt produsert til et filament. Avlesningen i figur 24 viser at filamentdiameteren etter spoling startet ved $t = 2600$ har en del avvik utenfor betingelsene, men ble i sin helhet et godt filament.

Likt som med HDPE var LDPE filamentet enkelt å manipulere ved ulike innstillinger som temperatur og kjøling på maskinen. Materialet var mykere og mer fleksibelt enn HDPE som skapte en del avvik i diameter underveis på filamentet sett i figur 24.

Ved start av spoling ser vi et større avvik i diameter i figur 24. Dette er resultatet

av vanskeligheter med å knytte filamentet til spolen ved start. Denne feilmarginen vil ha liten betydning ved bruk av filamentet ettersom denne delen er det siste som vil bli matet inn i 3D-printeren.

4.1.3 PP - Polypropylene - Med original kjøling

Tabell 7 viser endringer gjort underveis for filamentekstrudering av PP med den originale kjølingen fra start til slutt.

Parameter	Varmeelement				Skrue	Vifte hastighet	Tid
	4	3	2	1			
Innstilt verdi	165 °C	165 °C	165 °C	165 °C	5.0 RPM	50 %	t=0s
Innstilt verdi	155 °C	155 °C	155 °C	155 °C	5.0 RPM	20 %	t=800s
Innstilt verdi	160 °C	160 °C	160 °C	160 °C	5.0 RPM	5 %	t=1500s
Innstilt verdi	165 °C	165 °C	165 °C	165 °C	5.0 RPM	5 %	t=1750s
Innstilt verdi	170 °C	170 °C	170 °C	170 °C	5.0 RPM	5 %	t=1800s
Innstilt verdi	180 °C	180 °C	180 °C	180 °C	5.0 RPM	5 %	t=2000s
Innstilt verdi	200 °C	200 °C	200 °C	200 °C	7.0 RPM	5 %	t=2350s
Innstilt verdi	215 °C	215 °C	215 °C	215 °C	5.0 RPM	50 %	t=3850s

Tabell 7: PP med original kjøling - Innstillinger ved maskin gitt i forhold til tid anløpt

Figur 25 viser logg av PP filament diameter i forhold til tid anløpt.



Figur 25: PP med vanlig kjøling - Filament diameter i forhold til tid anløpt

Ved ulike innstillinger var PP uhåndterlig å holde innenfor betingelsene for filamentdiameter. PP filament kunne derfor ikke spoles grunnet de store avvikene ved diameter under prosessen.

PP var antatt vanskelig å produsere til et filament før prosessen startet. Med en MFR over 20 visste man at plasten kom til å oppføre seg særdeles flytende over smeltepunktet. Ved første gjennomkjøring av PP med original kjøling kunne man allerede se at materialet holdt på varmen i mye større grad enn de andre filamentene produsert.

Den originale kjølingen har to motstående vifter rettet mot hver sin side av filamentet, dette skapte i utgangspunktet en ujevn kjøling som resulterte i et mer flatt enn rundt filament. Da materialet holdt på varmen over lengre tid, skapte dette problemer ved styrehjulene sett i figur 12. Hjulene som står for å dra filamentet til ønsket diameter hadde for stor spenning slik at det presset filamentet flatt gjennom styringen. Dette førte videre til feil avlesning ved den optiske sensoren for filamentdiameter ettersom denne gir avlesning før styrehjulene.

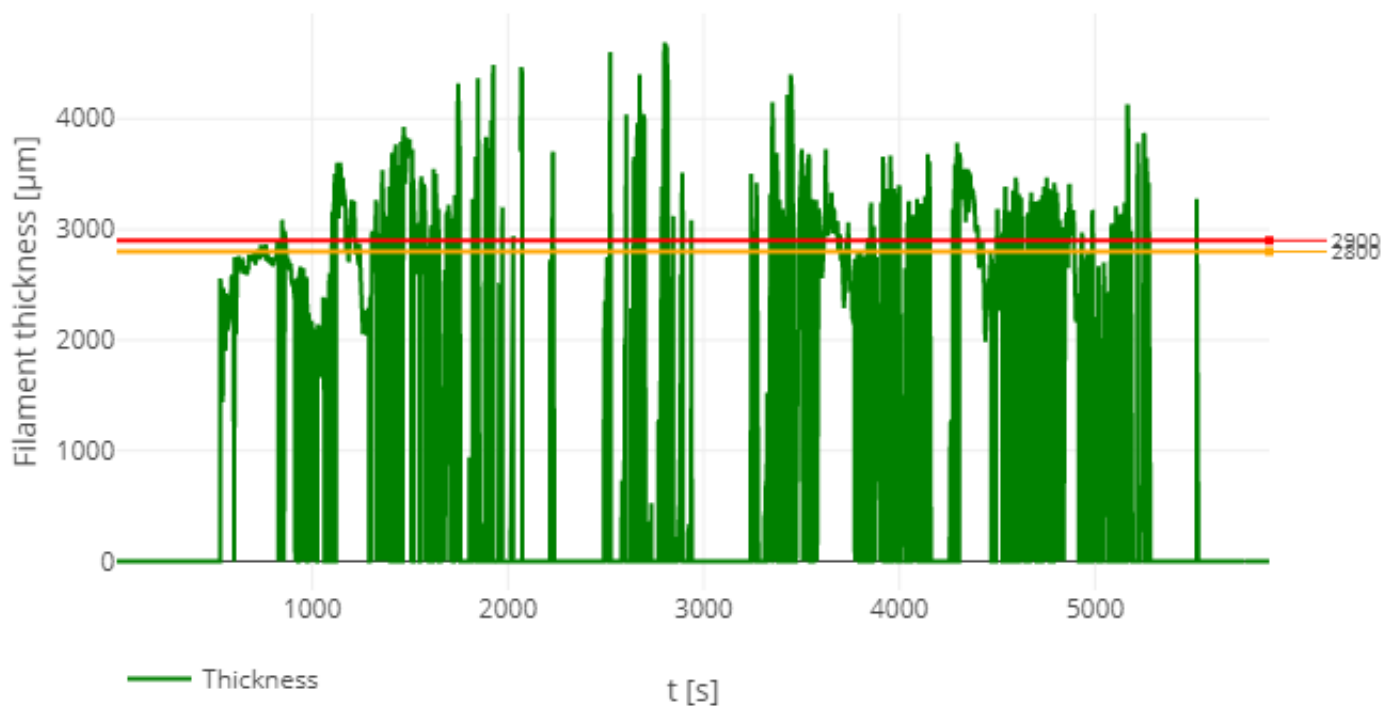
4.1.4 PP - Polypropylene - Med "Circular Cooling Flow" kjøling

Tabell 8 viser endringer gjort underveis for filamentekstrudering av PP med "Circular Cooling Flow" kjøling fra start til slutt.

Parameter	Varmeelement				Skrue	Vifte hastighet	Tid
	4	3	2	1			
Innstilt verdi	190 °C	190 °C	190 °C	190 °C	5.0 RPM	50 %	t=0s
Innstilt verdi	190 °C	190 °C	190 °C	190 °C	3.5 RPM	20 %	t=1500s
Innstilt verdi	190 °C	190 °C	190 °C	190 °C	6.0 RPM	20 %	t=1700s
Innstilt verdi	175 °C	175 °C	175 °C	175 °C	5.0 RPM	75 %	t=2000s
Innstilt verdi	165 °C	165 °C	165 °C	165 °C	5.0 RPM	75 %	t=2800s
Innstilt verdi	165 °C	165 °C	165 °C	165 °C	3.5 RPM	100 %	t=3500s
Innstilt verdi	160 °C	165 °C	175 °C	170 °C	3.5 RPM	100 %	t=4500s
Innstilt verdi	160 °C	165 °C	175 °C	170 °C	4.0 RPM	100 %	t=5000s

Tabell 8: PP med "Circular Flow" kjøling - Innstillinger ved maskin gitt i forhold til tid anløpt

Figur 26 viser logg av PP filament diameter i forhold til tid anløpt.



Figur 26: PP med "Circular Flow" kjøling - Filament diameter i forhold til tid anløpt

Med "Circular Cooling Flow" var kjølingen for PP filamentet fortsatt ikke effektiv nok. En jevn diameter på filamentet ble ikke oppnådd, derfor ble filamentet ikke spolet.

Etter kontakt med 3Devo ble problemet diskutert og en komponent kalt "Circular Cooling Flow" ble levert som en løsning. Denne komponenten skulle ta i bruk bare én vifte, men deretter gi kjøling rundt hele filamentet sett i figur 11 og 12. Det viste seg at komponenten ikke var effektiv nok til å gi nok kjøling over den korte distansen. De samme problemene sett med den originale kjølingen at filamentet ble flatt av styrehjulene var likt i denne prosessen.

Temperaturen ble forsøkt senket ved varmeelementene, men dette resulterte i at materialet sluttet å komme ut av dysen pga. ikke fullstendig smelting. Uansett måtte det være fullt tilsyn til maskinen underveis, fordi inngangen på kjølekomponenten var begrenset ville materialet ofte legge seg oppå istedenfor å gå igjennom komponenten. Dette skapte oppbygninger som igjen kunne tette dysen på maskinen og skape større problemer.

Det er nok mulig å produsere et PP filament med Precision 350 maskinen. Med større fokus på å konstruere en bedre mekanisme for kjøling kan filamentet være lettere å manipulere. En metode kunne være kjøling med vannsprut, men ble lagt vekk ettersom dette kom til å ta opp for mye tid. En annen løsning vil være å bytte ut dysen på filamentekstruderen fra den standard 4.0 mm dysen til en 2.85 mm dyse for å gi riktig diameter ved utløpet. Dette vil gjøre at styrehjulene ikke trenger å dra med like stor kraft, og fokuset kan bli lagt på korrekt nedkjøling.

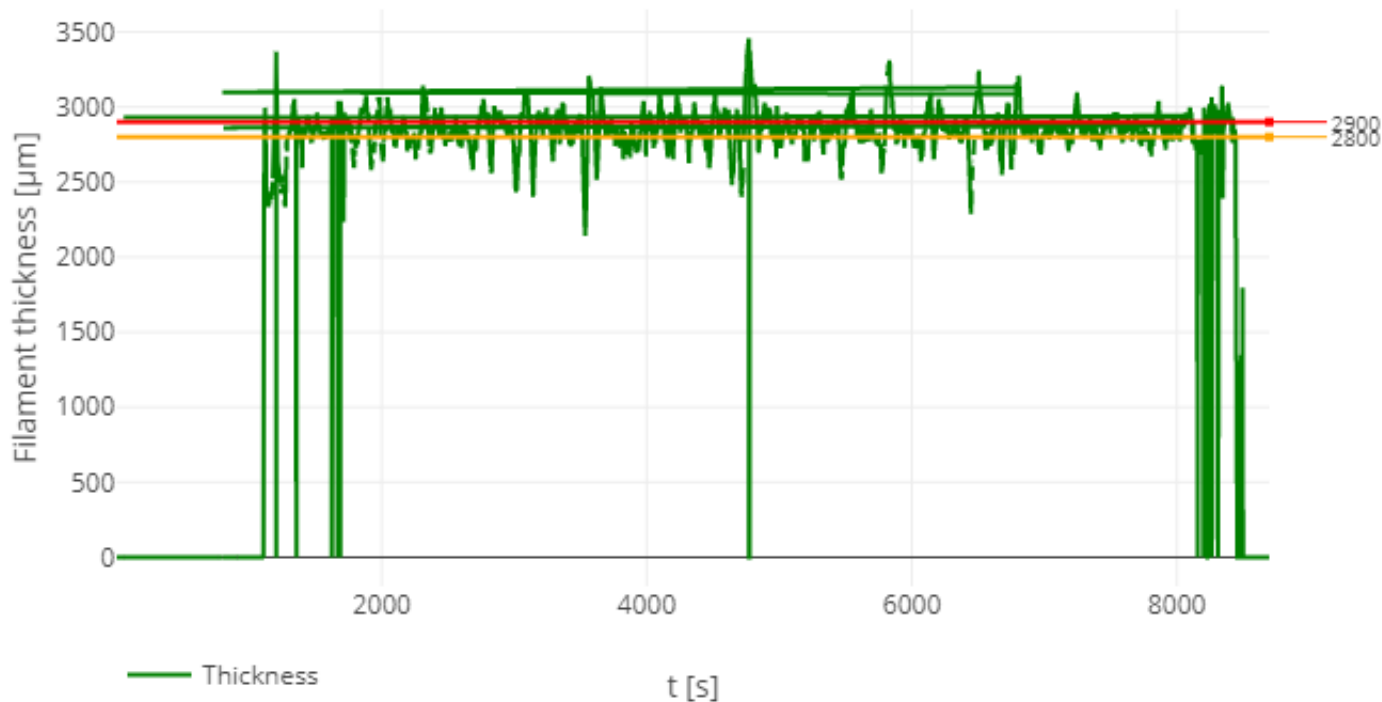
4.1.5 PLA - Polylactic acid

Tabell 9 viser endringer gjort underveis for filamentekstrudering av PLA fra start til slutt.

	Varmeelement							
Parameter	4	3	2	1	Skrue	Vifte hastighet	Tid	
Innstilt verdi	170 °C	185 °C	190 °C	180 °C	5.0 RPM	70 %	t=0s	
Innstilt verdi	170 °C	185 °C	190 °C	180 °C	5.0 RPM	70 %	t=1600s	Spooling startet

Tabell 9: PLA - Innstillinger ved maskin gitt i forhold til tid anløpt

Figur 27 viser logg av PLA filament diameter i forhold til tid anløpt.



Figur 27: PLA - Filament diameter i forhold til tid anløpt

Ettersom PLA er et av de mest utbredte materialene ved FFM ble innstillingene for filamentekstrudering hentet direkte fra brukerpanelet. Her ble det suksessfullt produsert et filament innenfor rammebetingelsene, men med flere avvik i diameter enn ønskelig, se figur 27.

Et problem som kan oppstå ved ekstrudering av filamenter av granulert plast er bindingen platen vil gjøre til hopperen under produksjon. Statisk elektrisitet vil oppstå som gjør at platen ikke går ned i innløpet ved skruen like effektivt som de tyngre pelletsene. Dette kan gi en mindre kontinuerlig flyt inni maskinen som igjen kan resultere i ujevn diameter. Løsningen for dette kan være en vibrator

plassert i hopperen for å riste ned materialet til innløpet. Dette ble ikke testet ut i denne studien grunnet for sen levering av vibrator.

4.2 #3DBenchy - Modell for egenskapstest ved 3D-printer

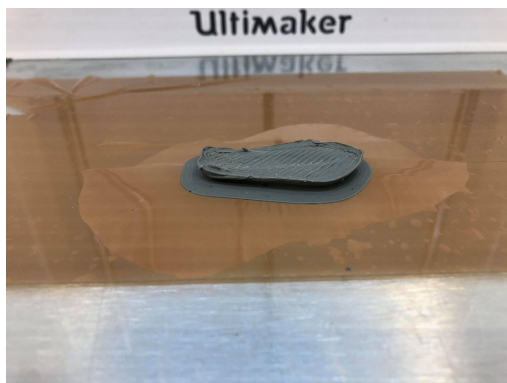
I de følgende delkaptiler ble utfordringen å finne riktig arbeidsflate for å produsere #3DBenchy modellen med riktige innstillinger.

PP er ikke tatt med i følgende prosjektaktiviteter ettersom et filament ikke ble suksessfullt produsert. Sett på forhånd var PP materialet best egnet for 3D-printing, men med sine vanskelige og tidkrevende materialegenskaper ved filamentekstrudering ble arbeidet avsluttet.

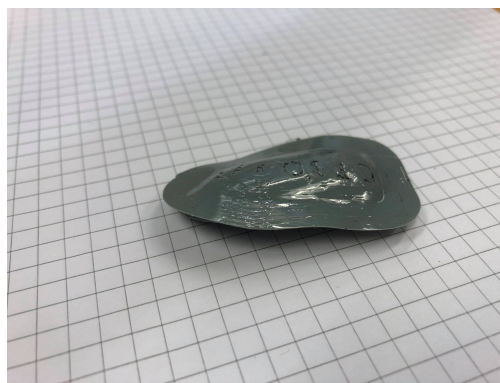
4.2.1 HDPE - High Density Polyethylene

Parameter	Ekstruder størrelse	Ekstruder temp.	Laghøyde	Arbeidsflate	Arbeidsflate temp.	Tetthet	Kjøling vifte	Printe hastighet	Resultat
Innstilt verdi	0.4 mm Dyse	240 °C	0.20 mm	Glass	60 °C	100 %	100 %	50 mm/s	Ingen klebrighet
Innstilt verdi	0.4 mm Dyse	240 °C	0.20 mm	Glass m/ Pritt lim	60 °C	100 %	75 %	75 mm/s	Ingen klebrighet
Innstilt verdi	0.4 mm Dyse	240 °C	0.30 mm	Glass m/ Magigoo lim	60 °C	100 %	75 %	50 mm/s	Ingen klebrighet
Innstilt verdi	0.4 mm Dyse	240 °C	0.30 mm	Maskeringsteip	60 °C	100 %	75 %	50 mm/s	Ingen klebrighet
Innstilt verdi	0.8 mm Dyse	220 °C	0.30 mm	Maskeringsteip	60 °C	100 %	75 %	50 mm/s	Ingen klebrighet
Innstilt verdi	0.8 mm Dyse	220 °C	0.30 mm	Maskeringsteip m/ Magigoo lim	60 °C	100 %	75 %	50 mm/s	Ingen klebrighet
Innstilt verdi	0.8 mm Dyse	220 °C	0.30 mm	Scotch blå maskeringsteip	60 °C	100 %	50 %	50 mm/s	Ingen klebrighet
Innstilt verdi	0.8 mm Dyse	220 °C	0.30 mm	Scotch maskeringsteip m/ Magigoo lim	60 °C	100 %	50 %	50 mm/s	Ingen klebrighet
Innstilt verdi	0.8 mm Dyse	220 °C	0.30 mm	Grå pakketip	60 °C	100 %	50 %	50 mm/s	Klebrighet, men ufullstendig

Tabell 10: Tabell over resultater ved ulike innstillinger av 3D-printer for #3DBenchy modell av HDPE



(a)



(b)

Figur 28: (a) #3DBenchy modell av HDPE på pakketeip. (b) Underside av #3DBenchy modell av HDPE.

Etter flere forsøk på ulike arbeidsflater ble resultatet til at grå pakketeip laget av polypropen var det beste å bruke. Den store krympingen ved nedkjøling av materialet gjorde at den krympet også teipen med seg og hevet seg fra bordet under. Teipen i seg selv sørget ikke for krympingene, men bindingene mellom plasten og teipen var såpass store at dette skjedde. Teipen hevet seg fra den underliggende glassplaten som førte til at modellen kom nærmere ekstruder dysen på 3D-printeren, dette gjorde til at lagene ikke ble lagt med riktig høyde som skapte problemer. Modellen kunne derfor ikke printes ferdig og måtte avsluttes.

Som beskrevet i teoridelen har termoplasttypene brukt i denne studien dårlig klebrighet til annet materiale. Pakketeipen av polypropen gir derfor et tynt lag av termoplast som underlag, dette viste seg å være effektivt for klebrigheten. En tykkere plate av polypropen ville kanskje ha vært mer effektivt ettersom den ikke ville ha gitt etter til kreftene av krymping.

Filamentet produsert av HDPE ble mottatt av Ultimaker 3D-printeren uten problemer, dette viste til at filamentet produsert var vellykket.

4.2.2 LDPE - Low Density Polyethylene

Parameter	Ekstruder størrelse	Ekstruder temp.	Laghøyde	Arbeidsflate	Arbeidsflate temp.	Tetthet	Kjøling vifte	Printe hastighet	Resultat
Innstilt verdi	0.4 mm Dyse	200 °C	0.30 mm	Glass	60 °C	100 %	100 %	50 mm/s	Ingen klebrighet
Innstilt verdi	0.4 mm Dyse	200 °C	0.30 mm	Maskeringsteip	60 °C	100 %	100 %	50 mm/s	Ingen klebrighet
Innstilt verdi	0.4 mm Dyse	200 °C	0.30 mm	Maskeringsteip m/ Magigoo lim	60 °C	100 %	100 %	50 mm/s	Ingen klebrighet
Innstilt verdi	0.4 mm Dyse	200 °C	0.30 mm	Maskeringsteip m/ Pritt lim	60 °C	100 %	100 %	50 mm/s	Ingen klebrighet
Innstilt verdi	0.8 mm Dyse	200 °C	0.30 mm	Scotch blå maskeringsteip	60 °C	100 %	75 %	50 mm/s	Ingen klebrighet
Innstilt verdi	0.8 mm Dyse	200 °C	0.30 mm	Grå pakketeip	60 °C	100 %	75 %	50 mm/s	Klebrighet, men ufullstendig

Tabell 11: Tabell over resultater ved ulike innstillinger av 3D-printer for #3DBenchy modell av LDPE



Figur 29: #3DBenchy modell av LDPE på pakketeip

Etter mye testing av underlag for HDPE viste det seg at den grå pakketeipen også var det beste valget for LDPE. Under prosessen hadde LDPE en mye mindre grad av krymping, dette gjorde at teipen ble liggende fint på glassplaten under hele prosessen.

Årsaken til ufullstendig modell var den mindre krympingen som ble til i kanten av modellen under print, dette skapte oppbygning under dysen og til slutt løsnet den delvis printede modellen. Den mindre krympingen ga problemer for hvert nytt lag plast som ble lagt av modellen, kombinasjonen av krymping og det fleksible

materialet førte til ugunstige lag av platen.

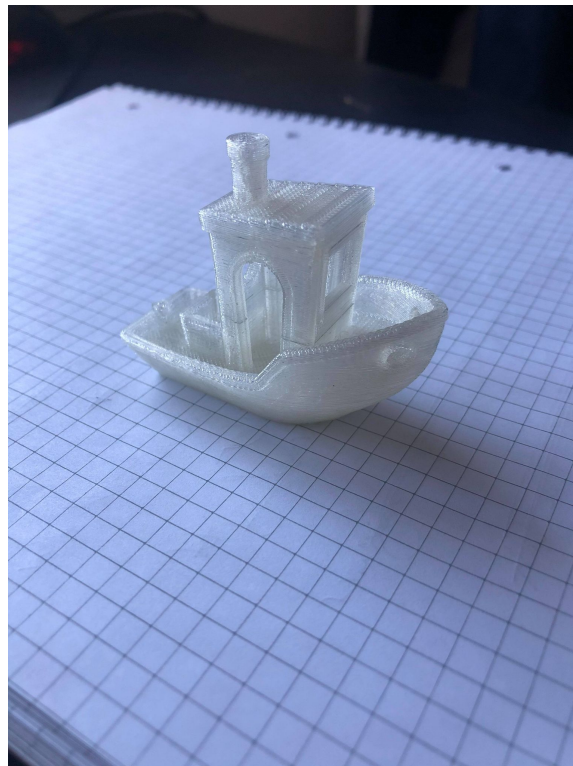
Utformingen av #3DBenchy modellen kan ha vært for komplisert å modellere ved bruk av LDPE. Det gir at materialet ikke er egnet for modellering av ekstraordinære utforminger.

4.2.3 PLA - Polylactic acid

Parameter	Ekstruder størrelse	Ekstruder temp.	Laghøyde	Arbeidsflate	Arbeidsflate temp.	Tetthet	Kjøling vifte	Printe hastighet	Resultat
Innstilt verdi	0.4 mm Dyse	215 °C	0.30 mm	Glass	60 °C	100 %	100 %	60 mm/s	Positivt

Tabell 12: Tabell over resultater ved ulike innstillinger av 3D-printer for #3DBenchy modell av PLA

PLA modellen ble printet uten problemer på den originale glassplaten.



Figur 30: #3DBenchy modell i PLA

#3DBenchy modellen i PLA ble produsert direkte på den originale glassplaten som arbeidsflate. Dette ga riktig symmetri og utforminger som forventet, resultatet er at materialet bestod prøven.

4.3 Prøvestykker for strekktest - 3D-print

4.3.1 HDPE - High Density Polyethylene

HDPE materialet hadde for stor krymping under 3D-printen til å kunne suksessfullt modellere prøvestykker for strekktest. Det er derfor ingen resultater å vise til strekktest av HDPE.

Med en større anleggsflate ned mot pakketeipen ble effekten av heving ved teip mot den underliggende glassplaten større. Dette førte til at selv mindre kompliserte utforminger av modeller var vanskelig å 3D-printe. Ved å gi mer tid til undersøkelse av forskjellige underlag og innstillinger i slicing programmet kan det være mulig å 3D-printe enkle modeller.

4.3.2 LDPE - Low Density Polyethylene

Parameter	Ekstruder størrelse	Ekstruder temp.	Laghøyde	Arbeidsflate	Arbeidsflate temp.	Tetthet	Kjøling vifte	Printe hastighet	Resultat
Innstilt verdi	0.8 mm Dyse	200 °C	0.30 mm	Grå pakketeip	30 °C	100 %	75 %	30 mm/s	Positivt

Tabell 13: Tabell over innstillinger ved 3D-print av strekktester for LDPE



Figur 31: LDPE strekktest prøver

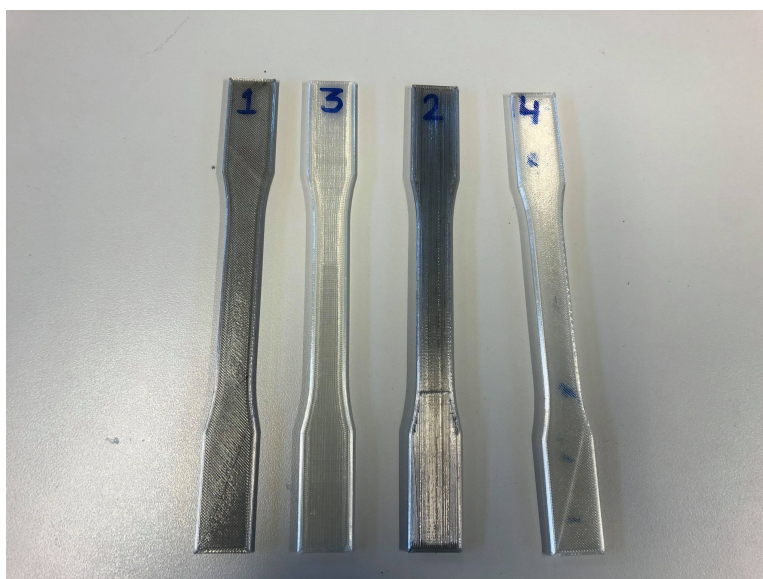
Prøvestykker for strekktest ble produsert i LDPE. Den lettere utformingen av modellen er trolig svaret for hvorfor dette var mulig. Materialet viste fortsatt tendens til en mindre prosent krymping, men var fortsatt modellerbart. Vist i figur 31 kan vi se strekkprøvene produsert ved 3D-printeren. Alle prøvene hadde mindre deformasjoner grunnet krymping på undersiden, sammen med små avvik ved lagene med tanke på kontinuerlig flyt av materiale og binding til underliggende lag.

Ved alle modellenes siste lag begynte modellen å løsne fra pakketeipen i den ene enden. Dette var grunnet et stort spenn bygget opp over tid i lagene, grunnet den mindre krympingen i materialet. 3D-printen kunne fortsatt fullføre, men utformingen av prøven ble ikke helt som den skulle. Ved å bruke avanserte innstillinger ved slicing programmet er det mulig at denne effekten kunne ha vært nedgradert.

4.3.3 PLA - Polylactic acid

Parameter	Ekstruder størrelse	Ekstruder temp.	Laghøyde	Arbeidsflate	Arbeidsflate temp.	Tetthet	Kjøling vifte	Printe hastighet	Resultat
Innstilt verdi	0.4 mm Dyse	215 °C	0.30 mm	Glass	60 °C	100 %	100 %	60 mm/s	Positivt

Tabell 14: Tabell over innstillinger ved 3D-print av strekktester for PLA



Figur 32: PLA strekktest prøver

De samme innstillingen vist i tabell 14 ble brukt for alle prøvene. Forskjell ved prøvene er retning og mønster av platen lagt beskrevet i metodikk.

Produksjon av prøvestykker i PLA ble vellykket. Et problem som oppstod under 3D-print ved én av prøvene var filamentets diameter ved inntaket i 3D-printeren. Filamentet hadde ved et punkt for stor diameter til å passe i inntaket som resulterte i en ufullstendig modell vist i figur 33. Uten større problemer ble denne prosessen rettet på ved å ta ut filamentet igjen og klippe av den større forhøyningen, deretter restarte prosessen.



Figur 33: Ufullstendig print av PLA strekktest prøve

Figur 32 viser at prøve 1 og 2 er av mørkere farge enn de andre prøvene. Dette kommer fra rester av annen plast gjenværende i dysen av 3D-printeren, det skal ikke ha en annen funksjon enn at prøvene har fått en lettere gråfarge enn de andre. Sett bort fra de mindre avvikene ble prøvestykker i PLA produsert uten problemer.

4.4 Strekktest av materialer

4.4.1 PLA - Polylactic acid

Prøve	Elastisitesmodul	Flytespenning	Forlengelse ved flytespenning	Strekkfasthet	Forlengesle ved strekkfasthet	Spenning ved brudd	Forlengelse ved brudd	Nominell forlengelse ved brudd	Bredde	Høyde	Hastighet
PLA	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	%	mm	mm	mm/s
1	1740	45	3,20	45,00	3,20	43,40	-	4,00	13,27	3,20	50,00
2	1900	-	-	42,00	2,20	42,00	2,20	-	13,27	3,20	50,00
3	1630	-	-	40,00	2,50	40,00	2,50	-	13,26	3,17	50,00
4	1250	-	-	21,20	1,70	21,20	1,70	-	13,22	3,20	50,00
Test fra datablad	2346,5	49,5	3,30			45,60	5,20	-			50,00

Tabell 15: Tabell over PLA strekktest rapport



Figur 34: PLA strekktest prøver etter test

Tabell 15 viser oversikten av testresultatene for PLA. Testen utført fra databladet er også 3D-printet på en Ultimaker, men med få ulikheter. Fra databladet er prøvene testet med 90% innfyll og med gjennomsnittet av fem hvite og svarte PLA tester. I databladet er det opplyst at den "normale kvaliteten" er satt som innstilling i slicing programmet, som vil gi likt mønster vi finner i prøve 1.

Fra tabellen er det tydelig at vi oppnår nesten samme spenning ved brudd for prøve 1 som for den utførte testen i databladet, 43,40 MPa for prøve 1 og 45,60 MPa for test i datablad. Vi leser av de høyeste verdier for prøve 1 og test fra datablad for samtlige verdier, dette gir at 45° første lag og 45° motsatt rettet andre lag gir størst styrke.

Det er viktig å påpeke at testen gjort i databladet ved å utføre et gjennomsnitt vil gi et jevnere resultat enn utførelsen gjort i studien. Prøve 1 viser til at verdien er

tilnærmet lik de oppgitte egenskapene for materialet, men det kan fortsatt være avvik innenfor de ulike PLA fargene Ultimaker leverer med tanke på materialegenskaper. PLA transparent er ikke testet i databladet og kan ha andre verdier enn den hvite og svarte PLA testet. Dette kunne ha vært undersøkt videre ved å utføre testen for prøve 1 gjentatte ganger likt som i databladet.

Bruddene for de ulike prøvene ble som forventet. Prøve 1 gir et 45° ganger 45° brudd ved testområdet. Prøve 2 gir brudd ved start av radius inn mot test området, Dette kan ha skjedd grunnet skjev utført strekktest eller svakhet oppstått ved 3D-printing av modellen. Både prøve 3 og 4 viser brudd mellom lagene, dette var som forventet.

4.4.2 LDPE - Low Density Polyethylene

Prøve	Elastisitesmodul	Flytespenning	Forlengelse ved flytespenning	Strekfasthet	Forlengesle ved strekkfasthet	Spenning ved brudd	Forlengelse ved brudd	Nominell forlengelse ved brudd	Bredde	Høyde	Hastighet
LDPE	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	%	mm	mm	mm/s
1	113	-	-	8,11	100,00	2,59	340,00	-	11,46	3,17	50,00
2	84,3	-	-	9,27	70,00	1,85	280,00	-	12,70	3,25	50,00
3	94,6	6,11	18	6,11	18,00	1,87	-	280,00	21,10	3,45	50,00
4	77,3	-	-	5,98	32,00	1,87	160,00	-	12,88	3,47	50,00
Formstøpt test fra datablad	1210	24,8	6,40	24,80	6,40	-	24,00	-	-	-	50,00

Tabell 16: Tabell over LDPE strekktest rapport



Figur 35: LDPE strekktest prøver etter test

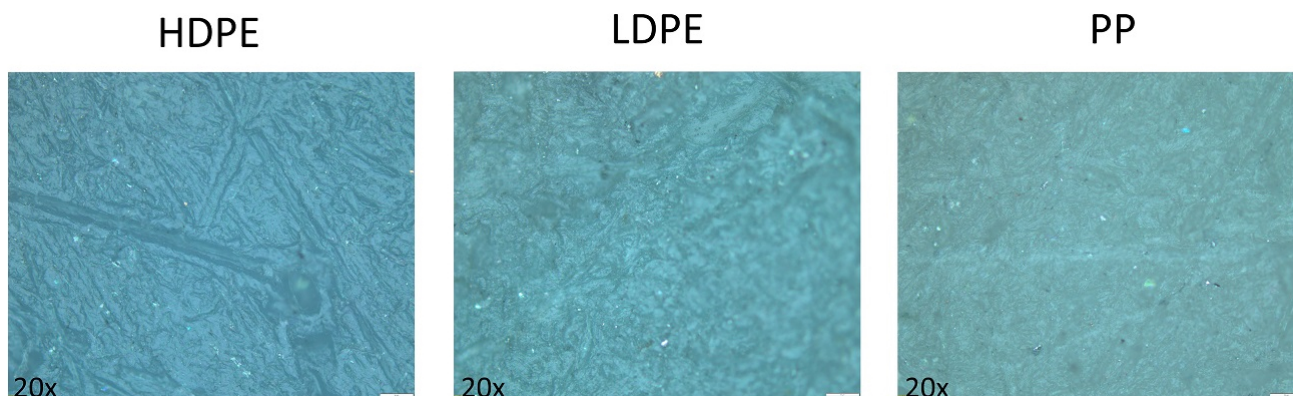
Vist i tabell 16 har vi oversikten av testresultatene ved strekktest av LDPE. Fra databladet levert med materialet er allerede strekktest utført med en formstøpt prøve. I sammenligning med de 3D-printede prøvestykkene vil derfor resultatene være mye forskjellig grunnet oppbygningen av de ulike modellene. Selvom de 3D-printede prøvene er produsert med 100 % innfyll vil det likevel være avvik i oppbygningen, ulikt den formstøpte prøven som garantert vil være 100 % solid.

Det første vi ser fra resultatene er den mye lavere strekkfastheten ved de 3D-printede prøvestykkene i forhold til den formstøpte. Prøve 2 leser av en strekkfasthet på 9.27 MPa, dette er nok grunnet oppbygningen av modellen med materiale lagt i samme retning som strekkretning. Forlengelse av prøvene 1 - 4 er også mye større enn den formstøpte prøven, dette er også grunnet oppbygning av modellene som gir en større mulighet for forlengelse.

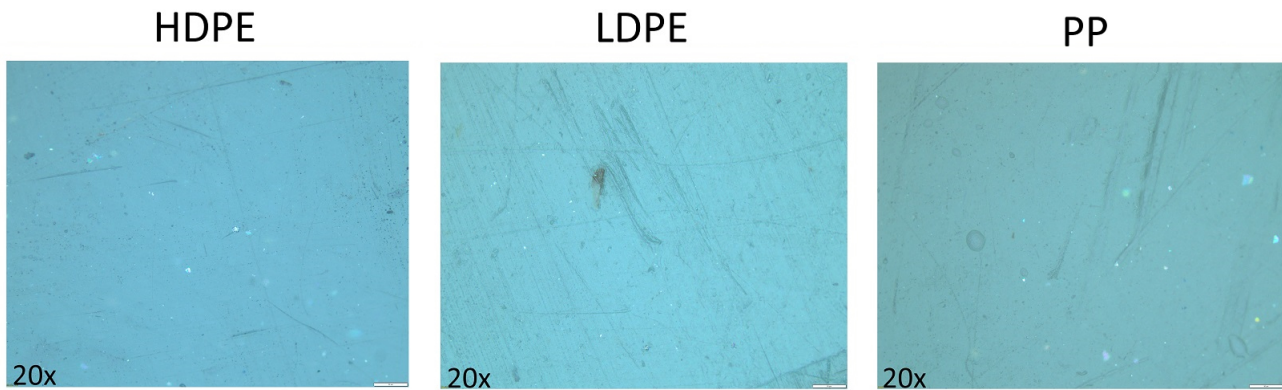
I figur 31 ser vi prøvene av LDPE etter gjennomført strekktest. Det gjennomgående karakteristiske trekket for alle prøvene er at veggene for de 3D-printede modellene er sterkere enn innfyllet av modellen. Dette kommer av slicing programmet som alltid ligger materialet i veggene rundt innfyllet. Et brudd har først skjedd ved en av veggene etterfulgt av innfyllet, til slutt har prøven bare hatt feste ved én av veggene. Maskinen avsluttet for prøve 2, 3 og 4 før fullstendig brudd, dette har skjedd etter at en del av prøven har røket og dermed lettet på motstanden slik at maskinen har oppfattet det som et brudd.

4.5 Mikroskop undersøkelse av materialer

Bilder ved 20x zoom er framhevet som eksempel ettersom disse ga best inntrykk av struktur, likheter og ulikheter. Bilder ved annen zoom er lagt til som vedlegg.



Figur 36: Mikroskop bilder av slipt side av prøver ved 20x zoom



Figur 37: Mikroskop bilder av blank side av prøver ved 20x zoom

Alle de tre resirkulerte termoplastene ble undersøkt i mikroskopet med lik metode. Utenom bildene tatt ble det sett etter smuss og urenheter over hele flaten av de produserte prøvene. For alle materialene var det overraskende likhet av overflatene ved de samme innstillingene for zoom.

Figur 36 viser mikroskop bilder av materialene ved 20x zoom på den slipte siden. Her er kommer strukturen i materialet tydeligere frem enn i figur 35 som gir bilder av den blanke siden av prøvene.

I figur 37 ser vi ved LDPE 20x bildet at det er en liten mørk flekk ca. midt på prøven. Den lille flekken måles til 0.05 mm og vil derfor ha veldig liten betydning dersom den ville være av en annen type plast. Videre ble det ikke funnet feil eller større biter av andre uønskede materialer ved prøvene. Det er tydelig at sorteringen av plast ved IVAR sitt anlegg er veldig god i forhold til det som kan tydes av mikroskop bildene.

Det som kan være skjult er tilstedeværelse av annen type plast i en av de gitte plasttypene som mikroskopet ikke klarer å skille mellom. Fargen på de ulike plasttypene var veldig lik under lyset av mikroskopet, bildene var bedre til å vise struktur og ulike høyder i materialenes overflate. Dette kan ha hatt en påvirkning i prosjektaktivitetene gjennomgått ved at smeltepunktet kan alternere i forhold til en eventuell blanding av plasttyper.

5 Konklusjon

Gjennom prosjektaktivitetene ble det gjort erfaringer som ligger til grunn for konklusjonene. I denne konklusjonen er det satt fokus på de resirkulerte termoplastene og ikke PLA, dette er fordi det var kjent at PLA ville fungere i alle prosjektaktiviteter.

Ved filamentproduksjon kan det konkluderes med at HDPE og LDPE er lette å arbeide med. Den lave MFR indeksen gir at materialet har en høy viskositet i smeltet form, dette gjorde materialet lett å manipulere. PP på MFR indeks ga et mye høyere tall, ved filamentfremstilling ble materialet veldig flytende med lav viskositet. Dette resulterte i at PP ikke kunne bli produsert til et filament, og heller ikke kunne være med i de følgende prosjektaktiviteter. HDPE og LDPE ble i motsetning laget til filament på en enkel måte uten problemer.

Ved 3D-print kom de grunnleggende utfordringene ved HDPE og LDPE til syne. Krystalliniteten og krympingen når materialet synker under smeltepunktet igjen ble en stor utfordring ved 3D-printing. #3DBenchy modellen kunne ikke bli fremstilt ved verken HDPE eller LDPE grunnet dette. LDPE viste en lavere rate for krymping og indre krefter ved 3D-printing, dette er fra materialets lavere densitet som gir et mykere og mer fleksibelt materiale. Derfor kunne det bli produsert prøvestykker for strekktest av LDPE, med forbehold at utformingen ikke ble optimal.

Strekktest ble gjennomført for LDPE og PLA. Den formstøpte prøven i databladet for LDPE ble referansen til de 3D-printede prøvene. Det ble oppdaget for de 3D-printede strekktestene at de ga en mye større mulighet for forlengelse, men ikke like stor strekkfasthet. For PLA var konstruksjonen av strekktesten utført i databladet lik som 3D-printet prøve 1, her ble resultatet tilnærmet likt referansen.

I mikroskopet var det ønskelig å se etter smuss og urenheter i de resirkulerte mate-

rialene. Ved undersøkelse av prøvenes begge sider ble det ikke funnet større avvik, utenom for LDPE hvor det kan ha vært tilstand av et annet materiale i veldig liten form. Det er trygt å si at ingen av de resirkulerte plasttypene har inneholdt urenheter som kan ha påvirket noen av prosjektaktivitetene i denne eksperimentelle studien.

Den helhetlige konklusjonen er at HDPE og LDPE ikke er egnet til fremstilling av modeller med ekstraordinære utforminger ved bruk av 3D-printer. PP platen kan ha et bruksområde for 3D-printing dersom det blir lagt ned større arbeid for fremstilling av filament.

Til videre arbeid ville det ha vært interessant å undersøke hvordan platen kan bli brukt til støping av modeller, istedenfor 3D-printing.

Referanser


- [1] *Om IVAR - IVAR*. URL: <https://www.ivar.no/Omivar/> (visited on 05/12/2021).
- [2] *16 Types of 3D Printer Filaments*. 3D Insider. Mar. 9, 2017. URL: <https://3dinsider.com/3d-printing-materials/> (visited on 04/08/2021).
- [3] Andreas Tjernshaugen et al. *koronavirus-pandemien 2020-2021*. In: *Store medisinske leksikon*. Apr. 15, 2021. URL: http://sml.sn1.no/koronavirus-pandemien_2020-2021 (visited on 05/12/2021).
- [4] Ian Gibson, David Rosen, and Brent Sucker. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2nd ed. Springer-Verlag New York, 2015. ISBN: 978-1-4419-1119-3.
- [5] *maxresdefault.jpg (1280×720)*. URL: <https://i.ytimg.com/vi/nGz-wH36wRQ/maxresdefault.jpg> (visited on 04/16/2021).
- [6] *Top 10 Best CAD Software For All Levels*. 3Dnatives. Mar. 18, 2019. URL: <https://www.3dnatives.com/en/top10-cad-software-180320194/> (visited on 03/25/2021).
- [7] *Ultimaker Cura: Powerful, easy-to-use 3D printing software*. ultimaker.com. URL: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura> (visited on 03/25/2021).
- [8] L. Jyothish Kumar, Pulak M. Pandey, and David Ian Wimpenny. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*. 1st ed. Springer Singapore, 2019. ISBN: 978-981-13-0305-0.
- [9] *polymers-12-02115-g001.png (3671×1710)*. URL: https://www.mdpi.com/polymers/polymers-12-02115/article_deploy/html/images/polymers-12-02115-g001.png (visited on 04/16/2021).
- [10] *TOP 15 Best Cheap 3D Printers 2020*. 3Dnatives. Mar. 31, 2020. URL: <https://www.3dnatives.com/en/low-cost-3d-printer290320174/> (visited on 05/12/2021).
- [11] Sven Ore and Aage Stori. *polymerer*. In: *Store norske leksikon*. Jan. 27, 2021. URL: <http://sn1.no/polymerer> (visited on 04/07/2021).

- [12] Sven Ore and Aage Stori. *plast*. In: *Store norske leksikon*. Feb. 11, 2019. URL: <http://snl.no/plast> (visited on 05/12/2021).
- [13] Helmer Fjellvåg. *amorfe materialer*. In: *Store norske leksikon*. Feb. 13, 2020. URL: http://snl.no/amorfe_materialer (visited on 05/12/2021).
- [14] Bjørn Pedersen. *krystallinsk*. In: *Store norske leksikon*. Dec. 29, 2020. URL: <http://snl.no/krystallinsk> (visited on 05/12/2021).
- [15] *Amorphous_vs_Crystalline.jpg (710×350)*. URL: https://mechanicalbase.com/wp-content/uploads/2020/09/Amorphous_vs_Crystalline.jpg (visited on 04/08/2021).
- [16] *iapd_thermoplastics_rectangle.png (1650×1275)*. URL: https://allaboutplastics.files.wordpress.com/2015/08/iapd_thermoplastics_rectangle.png (visited on 04/19/2021).
- [17] Sven Ore and Aage Stori. *polyetylen*. In: *Store norske leksikon*. July 29, 2019. URL: <http://snl.no/polyetylen> (visited on 05/13/2021).
- [18] *Crystallinity / Degree of Crystallinity*. NETZSCH Analyzing & Testing. URL: <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/contract-testing/glossary/crystallinity-degree-of-crystallinity/> (visited on 04/19/2021).
- [19] *Shrinkage Value of Plastics Material & Injection Molding - Chart*. URL: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/shrinkage> (visited on 04/19/2021).
- [20] Creative Mechanisms Staff. *Everything You Need To Know About Polypropylene (PP) Plastic*. URL: <https://www.creativemechanisms.com/blog/all-about-polypropylene-pp-plastic> (visited on 04/19/2021).
- [21] Chuanchom Aumnate, Raphael Kiesel, and Natalie Rudolph. *Understanding plastics recycling: economic, ecological and technical aspects of plastic waste handling*. Munich: Hanser Publications, 2017. 150 / 139. ISBN: 978-1-56990-677-4.

- [22] Tony Rogers. *Everything You Need To Know About Polylactic Acid (PLA)*. URL: <https://www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-polylactic-acid-pla-prototypes> (visited on 04/19/2021).
- [23] *How Is 3D Printer Filament Made?* | All3DP. URL: <https://all3dp.com/2/how-3d-printer-filament-made/> (visited on 05/13/2021).
- [24] *16 Types of 3D Printer Filaments*. 3D Insider. Mar. 9, 2017. URL: <https://3dinsider.com/3d-printing-materials/> (visited on 05/12/2021).
- [25] *Precision 350* | 3devo. URL: <https://3devo.com/product/precision-350/> (visited on 04/08/2021).
- [26] Ravi Toor. *Is Recycled 3D Printer Filament Bad Quality?* | Filamentive. Oct. 30, 2017. URL: <https://www.filamentive.com/is-recycled-3d-printer-filament-bad-quality/> (visited on 05/13/2021).
- [27] 14:00-17:00. *ISO 1133:2005*. ISO. URL: <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/03/12/31267.html> (visited on 05/13/2021).
- [28] *SHR3D IT - Compact Plastic Shredder and Recycler*. 3devo. URL: <https://3devo.com/shred-it/> (visited on 04/22/2021).
- [29] *ISO 527-2: Tensile Testing for Plastics*; URL: <http://www.instron.us/en-us/testing-solutions/by-standard/iso/iso-527-2> (visited on 03/11/2021).



DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET
FORSTUDIERAPPORT TIL BACHELOROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: <i>Bachelor Maskiningeniør</i>	Vår semesteret, 2021 Åpen / Konfidensiell
Forfatter: <i>Tiedemann Bratten</i>	 (signatur forfatter)
Fagansvarlig: <i>Hirpa G. Lemu</i> , UIS Veileder(e): <i>Hirpa G. Lemu</i> , UIS	
Tittel på bacheloroppgaven: <i>Ekspérimentell studie av ekstruderte filamenter av plastmaterialer for 3D printing</i> Engelsk tittel: <i>Experimental study of extruded filaments of plastic materials for 3D printing</i>	
Studiepoeng: 20 poeng. Essay i vitenskapsteori/etikk er inkludert.	
Emneord: - Eksperimentelt - Plast - Ekstrudering - 3D printing	Sidetall: 8 + vedlegg/annet: Stavanger, 06.0.2.2021

I Forord

Dette er en forstudierapport for bacheloroppgaven “Eksperimentell studie av ekstruderte filamenter av plastmaterialer for 3D printing” ved utdanningen ingeniørfaglig - maskin. Oppgaven vil bli fullført i mai 2021 og skrevet av Tiedemann Bratten ved Universitetet i Stavanger (UiS).

Forstudierapporten vil definere de ulike oppgavene, samt begrense målene for oppgaven. Rapporten vil fungere som en pekepinn for oppgaven til tiden som kommer. Videre vil prosessen bli forklart i bredden, fra start materiale til ferdige resultater.

Ved UiS er det en oppdatert 3D-LAB med forskjellige maskiner relatert til “additive manufacturing”. Dette gir muligheten for å skrive en unik oppgave for et arbeidsområde i stor vekst ved hjelp av UiS. Å få muligheten til å jobbe med nye maskiner og metoder gir et godt grunnlag før steget ut i arbeidslivet.

Innhold

I	Forord	i
1	Innledning	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Mål	2
2	Oppgave Oversikt	3
2.1	Plast	3
2.2	Ekstrudering	3
2.3	3D-Print	4
2.4	Testing	5
3	Ressurser og metodikk	6
3.1	Ressurser	6
3.2	Metodikk	6
4	Tidsplan og gantt-skjema	7
4.1	Aktiviteter	7
4.2	Arbeidsstruktur	7
4.3	Gantt-skjema	8

Figurer

1	Arbeidsstruktur	7
2	Gantt-skjema	8

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

I 2020 kjøpte UiS inn en 3Devo Precision 350 filament-ekstruder til sin 3D-LAB. UiS gjør en god jobb ved å ekspandere 3D-LAB'en jevnlig for å holde seg relevant til dagens marked. Filamenter for 3D-printere er termoplast med egenskaper for å smelte og forme frem modeller. Tilgjengeligheten til å produsere egne filamenter for 3D-printing kan gi muligheter for konstruksjoner som ikke har blitt laget før.

3D-printing er blitt en viktig del i industrien for skaping av nye konstruksjoner. Med hjelp av hurtig modellfremstilling kan man vise til en forenklet modell for å gjøre fortgang i utviklingsprosessen. Denne prosessen har fått navnet "Rapid prototyping". Ved hjelp av CAD (Dataassistert design) har man muligheten til å designe komponenter på data uten bruk av materialer. 3D-printere fremstiller modeller ved bruk av ALM (Additive Layer Manufacturing), også kjent som flerlagsmetode. Kombinasjonen av CAD og ALM gir altså hurtig modellfremstilling.

Min motivasjon ved feltet 3D-printing økte under semesteroppgaven jeg hadde i faget MSK210, maskinkonstruksjoner. Hovedmålet var å lage en motormodell ved CAD, deretter fremstille den ved 3D-printing. Designoppgaven resulterte i to ulike modeller både i størrelse og material. Det og nå få muligheten til å eksperimentere ved dette feltet gir ny drivkraft for ingeniøryrket.

1.2 Mål

Hovedmålet med denne oppgaven er å bruke gjenvinningsplast som filament i 3D-printere. Plasten er resirkulert og sortert ved gjenvinningsanlegget IVAR i Stavanger. Denne plasten blir levert i form av pellets, små korn med en lengde på ca. 2 millimeter. Pelletsene er derfor akkurat ønsket størrelse for ekstruderingsmaskinen. Prøvestykker vil bli fremstilt ved 3D-print for videre testing. For å finne resultater vil termoplasten gjennomgå ulike tester som mikroskopi, strekktest og egenskapstest ved 3D-printer.

Ekstruderen fra 3Devo, Precision 350 omtales som den beste filament-ekstruderen for eget bruk. Maskinen er fortsatt relativt ny på markedet og har ikke vært i bruk ved UiS tidligere. Uten stor tilgang til sekundærdata blir termoplastens egenskaper pekepinnen for innstilling av maskinen. Derfor blir det å oppnå et optimalt resultat avhengig av smeltepunkt, varmekapasitet og tetthet.

Gjenbruksplasten fra IVAR sitt gjenvinningsanlegg har per dags dato et lite bruksområde. IVAR har derfor vist sin store interesse for resultatene ved oppgaven. Dersom resultatene er positive vil IVAR vurdere et kjøp av en industriell ekstruder/3D-printer for egen utnyttelse av termoplasten.

2 Oppgave Oversikt

Oppgaven kan bli delt inn i ulike kategorier. Gjenvinningsplasten er fundamentet i oppgaven og har derfor hovedfokuset gjennom kategoriene. For et positivt resultat er fire kategorier utarbeidet for å analysere bruksområdet. De fire kategoriene er satt til rekkefølge og avhenger av hverandre som en dominoeffekt.

2.1 Plast

Oppgaven gir at det skal bli laget filamenter med tre ulike plasttyper. Dette er HDPE (High Density Polyethylene), LDPE (Low Density Polyethylene) og PP (Polypropylene). Dette er de tre typer plast IVAR har mulighet til å sortere fra annen plast med høy nok nøyaktighet.

Til tross for levert datablad etter ISO for alle de tre typer plast kan man ikke rent tolke oppførselen ved ekstrudering. Urenheter i resirkulering kan være en av faktorene for endring i egenskaper. Annet smuss og rusk kan lage forskjeller i tetthet og smeltepunkt, de to viktigste faktorene ved ekstrudering. Hvis termoplasten ikke er av høy nok renhet kan fremstillingen av et homogent filament bli vanskelig eller kanskje umulig.

2.2 Ekstrudering

Filament-ekstruderingen vil bli utført ved hjelp av maskinen Precision 350 fra 3Devo. Maskinen tar imot enten pellets eller makulert plast. Maskineriet består av fire varmelementer og en skrue. De fire varmelementene gir mulighet for individuelle innstillinger til best mulig smelting av plasten. Varmeelementene er montert rundt skruen som skyver plasten framover. Filamentet vil komme ut gjennom en dyse i enden av maskinen i flytende form. For å lage et homogent filament blir plasten ført mellom to hjul for å dra den ut i jevn hastighet og skape riktig diameter.

To vifter til kjøling og en optisk sensor er til hjelp for å lage filamentet etter

de satte parametrene. Den optiske sensoren står for kontinuerlig avlesning av diameter på filamentet, med mulighet for logging til datamaskin. Alle de ulike elementene opererer sammen ved hjelp av hjernen i maskinen. Når maskinen gir en tilbakemelding om at strømmen av filament er homogent kan spolingsprosessen startes. Her blir filamentet lagt på en spole for lagring og videre bruk til 3D-printer.

Utfordringen blir å finne riktige innstillinger for varmeelementer og hastighet på skruen. Her kan det oppstå problemer i forhold til elastisitet og varmekapasitet i plasten. Den flytende strømmen av plast skal strekkes og avkjøles samtidig før den går på spolen for lagring. Hvis plasten holder for godt på varmen kan filamentet endre seg etter det er kommet på spolen og skape en falsk avlesning ved den optiske sensoren.

2.3 3D-Print

Det ferdigproduserte filamentet vil bli testet på en Ultimaker S5 3D-printer. Å produsere gode modeller på 3D-printeren vil bli en viktig milepæl. At det produserte filamentet er kompatibelt med Ultimakeren gir at gjenvinningsplasten har et bruksområde.

Her kan det oppstå problemer med matingen av det produserte filamentet. At ikke plasten vil bli “tatt imot” av maskinen kan være et problem hvis ikke filamentet holder seg innenfor korrekte dimensjoner. Urenheter kan skape oppbygninger ved dysen når modeller skal lages. Dette er fordi dysen på 3D-printeren er av mindre dimensjon enn ved ekstruderingsmaskinen.

2.4 Testing

Tester vil bli repetert med hensikt for å gi et jevnere resultat. Endringer i fremstilling av prøvestykker vil bli gjort for å finne forskjelligheter mellom utforming og egenskaper.

For selve plasten vil den bli sett nærmere på i mikroskopi. Her vil det undersøkes etter urenheter og annet smuss som kan være tilstede. Forskjeller mellom de tre ulike plasttypene vil bli dokumentert og undersøkt om det kommer av varierende resirkulering. Et besøk til gjenvinningsstasjonen er planlagt for å se hvordan sortering og resirkulering foregår.

Ekstrudering gir resultater for hvilke temperaturer plasten bør smeltes for å gi det beste filamentet. Slike data er viktig for videre produksjon av filamenter både ved UiS og eventuelt ved IVAR.

Materialtesting vil gi en indikasjon for hvilket materiale man bør velge for spesifikke 3D modeller. Testmodeller laget på 3D-printer vil vise presisjon og muligheter til å produsere ulike modeller. At plasten er mulig å forme etter ønsket formål er viktig for arbeid i framtiden når modeller skal produseres.

3 Ressurser og metodikk

3.1 Ressurser

Materialkostnadene til denne studien er ikke store. Gjenvinningsplasten blir levert i samarbeid med IVAR og har ikke høy innkjøpspris. Maskiner investert i ved UiS er av større grad, men bidrar for en bedret utdanning til studenter.

Ved UiS er Hirpa G. Lemu veileder til oppgaven. Sammen med ingeniør Jørgen Grønsund er de to gode støttespillere til arbeidet. 3Devo ser også ut til å ha gode tilbakemeldinger ved brukeroppfølgning for sine kunder.

3.2 Metodikk

Innledningsvis til oppgaven vil tid bli satt av for å undersøke tidligere arbeid hos produsenten. Deres retningslinjer vil gi en god indikasjon for hvilke parametere man bør sette for et godt utgangspunkt. En dialog med 3Devo er blitt opprettet for å holde en jevn og åpen samtale til å dele informasjon mellom begge parter.

Relevante videoer er å finne på YouTube både fra 3Devo og andre “hobby-ingeniører”. 3Devo har lagt stor vekt på markedsføring og har med flere hjelpevideoer vist at de ønsker å være tilstede for brukerne. Slike kanaler som forum og internettsamfunn vil være med å skape et godt grunnlag for eget arbeid videre.

4 Tidsplan og gantt-skjema

4.1 Aktiviteter

Det er tre hovedaktiviteter som skal bli gjennomført i tiden som kommer. Aktivitetene er å produsere filamenter, printe prøvestykker og utføre testing. Etter hvert som arbeidet skrider frem blir det viktig å avslutte hver definerte aktivitet før man går videre til neste. Dette skaper en trygghet i arbeidet og minimaliserer muligheten for menneskelige feil.

For de tre hovedaktivitetene skal alle de tre ulike plasttypene gjennom samme prosess. Med sine ulike karakteristiske trekk og lite sekundærdata er det vanskelig å beregne tidsbruken innenfor hver aktivitet. En generell fremgangsmåte blir viktig å ha klart for hver gang en aktivitet skifter plastmateriale.

4.2 Arbeidsstruktur

Arbeidsstrukturen er definert etter de gitte aktiviteter i struktur i figur 1.

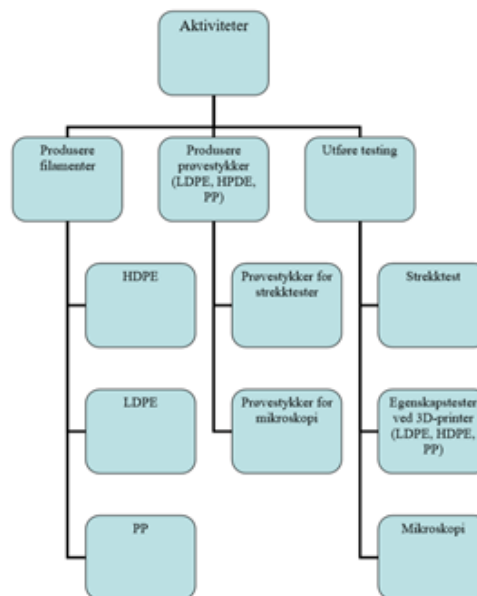


Figure 1: Arbeidsstruktur

4.3 Gantt-skjema

Prosjektplanen definert i diagram er gitt ved gantt-skjema i figur 2.

Måned	Januar					Februar			Mars				April				Mai		
Ukenummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Forstudierapport	■	■	■	■	■														
Samle bakgrunnsinformasjon		■	■	■	■	■													
Skrive oppgave				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
LAB opplæring				■	■														
Produsere filamenter				■	■	■	■	■											
Produsere prøvestykker									■	■	■	■							
Utføre testing										■	■	■	■	■					
Evaluering av resultater														■	■	■			
Ferdigstille Bachelor																		■	■

Figure 2: Gantt-skjema

A HDPE Datablad

Date updated: 22.09.2020



Receiver:
Receiver Address:

Supplier: IVAR Ettersorteringsanlegg Forus
Supplier Address: Forusbeen 198, 4313 Sandnes

Basic information				
Material ID/reference	Material type	Production date	Collection date	Comment
Generalized HDPE Gran. 125µm	HDPE 125µm	2020-02-14		See commentary field

Description/Comment: HDPE Granulate plastics recycled from waste material, average of previous material results

Moisture and Bulk density results were acquired through testing of raw HDPE Granula in its storage condition.

Note: All test-pieces from the materials that are molded are set to cure/harden for 48-72 hours before mechanical tests are performed where curing time will have an influence on the material properties. Mechanical tests on materials are performed on test-pieces at an approximate of 23 °C / 73,4 °F

All material results provided by: IVAR Ettersorteringsanlegg Forus - Forusbeen 198, 4313 Sandnes

Typical values				
Properties	Unit (Si)	Values	Deviation	Test methods
Moisture and Density				
Density of test specimen	g/cm ³	0,95	± 0	Mass/Volume by Archimedes principle
105 °C Moisture analysis	g	0,07 %	± 0	
160 °C Moisture analysis	g	0,08 %	± 0	Drying
Bulk Density	g/L or Kg/m ³	564	± 0	Mass/Volume
Polymer properties				
Melt flow rate (MFR) at 190 °C and 2.16 kg	Average value of the melt mass-flow rate	g / 10 min	0,37	ISO 1133,09/2005
Melt Volume Flow Rate (MVR) at 190 °C and 2.16 kg	Average Value of the melt volume flow-rate	cm ³ /10min	0,48	
Mechanical properties				
Tensile test				
Tensile Modulus	(1)	Mpa	723	DIN EN ISO 527 – 1, 06/2012
Yield strength	(2)	MPa	20,3	
Yield strain	(3)	%	11,5	
Tensile strength	(4)	MPa	20,3	
Strain at tensile strength	(5)	%	11,5	
Elongation	(6)	%	195	
Charpy test				
Charpy Impact Notched	at 23 °C	ak kJ / m ²	24,82	ISO 179-1, 2010
Charpy Impact Unnotched	at 23 °C	ak kJ / m ²	±	
Type of failure (Majority)	Complete/Partial/Hinge/None	Complete/Partial/Hinge/None	Partial break	

Melting point			
General		Injection molding	
Celsius °C	Fahrenheit °F	Celsius °C	Fahrenheit °F
120 - 180 °C	248 - 356 °F	180 - 280 °C	355 - 535 °F

B LDPE Datablad

Date updated: 17.09.2020



Receiver:
Receiver Address:

Supplier: IVAR Ettersorteringsanlegg Forus
Supplier Address: Forusbeen 198, 4313 Sandnes

Basic information				
Material ID/reference	Material type	Production date	Collection date	Comment
Generalized LDPE Gran. 100µm	LDPE 100µm	2019-08-21 - 2020-08-13		See commentary field

<p>Description/Comment: LDPE granulate 100 µm plastics recycled from waste material, average of previous material qresults</p> <p>Moisture and Bulk density results were acquired through testing of raw LDPE granulates in its storage condition.</p> <p>Note: All test-pieces from the materials that are molded are set to cure/harden for 48-72 hours before mechanical tests are performed where curing time will have an influence on the material properties. Mechanical tests on materials are performed on test-pieces at an approximate of 23 °C / 73,4 °F</p> <p>All material results provided by: IVAR Ettersorteringsanlegg Forus - Forusbeen 198, 4313 Sandnes</p>
--

Typical values				
Properties	Unit (Si)	Values	Deviation	Test methods
Moisture and Density				
Density of test specimen	g/cm ³	0,96	± 0,01	Mass/Volume by Archimedes principle
105 °C Moisture analysis	g	0,18 %	± 0,06	Drying
160 °C Moisture analysis	g	0,34 %	± 0,12	
Bulk Density	g/L or Kg/m ³	452,35	± 91,65	Mass/Volume
Polymer properties				
Melt flow rate (MFR) at 190 °C and 2.16 kg <i>Average value of the melt mass-flow rate</i>	g / 10 min	1,11	± 0,11	ISO 1133,09/2005
Melt Volume Flow Rate (MVR) at 190 °C and 2.16 kg <i>Average Value of the melt volume flow-rate</i>	cm ³ /10min	1,47	± 0,2	
Mechanical properties				
Tensile test				
Tensile Modulus (1)	Mpa	213,64	± 29,64	DIN EN ISO 527 – 1, 06/2012
Yield strength (2)	MPa	14,34	± 0,54	
Yield strain (3)	%	349,29	± 19,29	
Tensile strength (4)	MPa	14,34	± 0,54	
Strain at tensile strength (5)	%	349,29	± 19,29	
Elongation (6)	%	357,14	± 17,14	
Charpy test				
Charpy Impact Notched at 23 °C	ak kJ / m ²	59,49	± 6,12	ISO 179-1, 2010
Charpy Impact Unnotched at 23 °C	ak kJ / m ²			
Type of failure (Majority)	Complete/Partial/Hinge/None	Complete/Partial/Hinge/None	None break	

Melting point			
General		Injection molding	
Celsius °C	Fahrenheit °F	Celsius °C	Fahrenheit °F
105 - 115 °C	221 - 239 °F	180 - 280 °C	355 - 535 °F

C PP Datablad

Date updated: 18.09.2020



Receiver:
Receiver Address:

Supplier: IVAR Etersorteringsanlegg Forus
Supplier Address: Forusbeen 198, 4313 Sandnes

Basic information				
Material ID/reference	Material type	Production date	Collection date	Comment
Generalized PP Gran. 125µm	PP Granulate 125µm	2020-02-14		See commentary field

<p>Description/Comment: PP Granulate plastics recycled from waste material, average of previous material results</p> <p>Moisture and Bulk density results were acquired through testing of raw PP Granulate in its storage condition.</p> <p>Note: All test-pieces from the materials that are molded are set to cure/harden for 48-72 hours before mechanical tests are performed where curing time will have an influence on the material properties. Mechanical tests on materials are performed on test-pieces at an approximate of 23 °C / 73,4 °F</p> <p>All material results provided by: IVAR Etersorteringsanlegg Forus - Forusbeen 198, 4313 Sandnes</p>
--

Typical values					
Properties		Unit (Si)	Values	Deviation	Test methods
Moisture and Density					
Density of test specimen		g/cm3	0,91	± 0	Mass/Volume by Archimedes principle
105 °C Moisture analysis		g	0,09 %	± 0	Drying
160 °C Moisture analysis		g	0,12 %	± 0	
Bulk Density		g/L or Kg/m3	536	± 0	Mass/Volume
Polymer properties					
Melt flow rate (MFR) at 230 °C and 2.16 kg	Average value of the melt mass-flow rate	g / 10 min	22,86	± 1,06	ISO 1133,09/2005
Melt Volume Flow Rate (MVR) at 230 °C and 2.16 kg	Average Value of the melt volume flow-rate	Cm3/10 min	30,44	± 1,39	
Mechanical properties					
Tensile test					
Tensile Modulus	(1)	Mpa	1210	± 5,32	DIN EN ISO 527 – 1, 06/2012
Yield strength	(2)	MPa	24,8	± 0,093	
Yield strain	(3)	%	6,4	± 0,039	
Tensile strength	(4)	MPa	24,8	± 0,093	
Strain at tensile strength	(5)	%	6,4	± 0,039	
Elongation	(6)	%	24	± 6,9	
Charpy test					
Charpy Impact Notched	at 23 °C	ak kJ / m2		±	ISO 179-1, 2010
Charpy Impact Unnotched	at 23 °C	ak kJ / m2	74,66	± 18,16	
Type of failure (Majority)	Complete/Partial/Hinge/None	majority of failures	Complete break		

Melting point			
General		Injection molding	
Celsius °C	Fahrenheit °F	Celsius °C	Fahrenheit °F
130 - 171 °C	266 - 340 °F	240 - 320 °C	464 - 608 °F

D PLA Datablad

Technical data sheet PLA

Ultimaker

Chemical composition	See PLA safety data sheet, section 3
Description	Ultimaker PLA filament provides a no-hassle 3D printing experience thanks to its reliability and good surface quality. Our PLA is made from organic and renewable sources. It's safe, easy to print with, and it serves a wide range of applications for both novice and advanced users
Key features	Good tensile strength and surface quality, easy to work with at high print speeds, user-friendly for both home and office environments, PLA allows the creation of high-resolution parts. There is a wide range of color options available
Applications	Household tools, toys, educational projects, show objects, prototyping, architectural models, as well as lost casting methods to create metal parts
Non-suitable for	Food contact and <i>in vivo</i> applications. Long term outdoor usage or applications where the printed part is exposed to temperatures higher than 50 °C

Filament specifications

	Value	Method
Diameter	2.85 ± 0.10 mm	-
Max roundness deviation	0.10 mm	-
Net filament weight	350 g / 750 g	-
Filament length	~ 44 m / ~ 95 m	-

Color information

Color	Color code
PLA Green	RAL 6018
PLA Black	RAL 9005
PLA Silver Metallic	RAL 9006
PLA White	RAL 9010
PLA Transparant	N/A
PLA Orange	RAL 2008
PLA Blue	RAL 5002
PLA Magenta	RAL 4010
PLA Red	RAL 3020
PLA Yellow	RAL 1003
PLA Pearl White	RAL 1013

Mechanical properties*

	Injection molding		3D printing	
	Typical value	Test method	Typical value	Test method
Tensile modulus	-	-	2,346.5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Tensile stress at yield	-	-	49.5 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Tensile stress at break	-	-	45.6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at yield	-	-	3.3%	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at break	-	-	5.2%	ISO 527 (50 mm/min)
Flexural strength	-	-	103 MPa	ISO 178
Flexural modulus	-	-	3,150 MPa	ISO 178
Izod impact strength, notched (at 23 °C)	-	-	5.1 kJ/m ²	ISO 180
Charpy impact strength (at 23 °C)	-	-	-	
Hardness	-	-	83 (Shore D)	Durometer

Electrical properties*

	Typical value	Test method	Typical value	Test method
Dissipation factor (at 1 MHz)	-	-	0.008	ASTM D150-11
Dielectric constant (at 1 MHz)	-	-	2.70	ASTM D150-11

Thermal properties

	Typical value	Test method
Melt mass-flow rate (MFR)	6.09 g/10 min	ISO 1133 (210 °C, 2.16 kg)
Heat detection (at 0.455 MPa)	-	-
Heat deflection (at 1.82 MPa)	-	-
Vicat softening temperature	-	-
Glass transition	~ 60 °C	ISO 11357
Coefficient of thermal expansion	-	-
Melting temperature	145 - 160 °C	ISO 11357
Thermal shrinkage	-	-

*See notes

Other properties

	Value	Test method
Specific gravity	1.24	ASTM D1505
Flame classification	-	-

Notes

Properties reported here are average of a typical batch. The 3D printed test specimens were printed in the XY plane, using the normal quality profile in Ultimaker Cura 2.1, an Ultimaker 2+, a 0.4 mm nozzle, 90% infill, 210 °C nozzle temperature, and 60 °C. The values are the average of five white and five black specimens for the tensile, flexural, and impact tests. The Shore hardness D was measured in a 7-mm-thick square printed using the normal quality profile in Ultimaker Cura 2.5, an Ultimaker 3, a 0.4 mm print core, and 100% infill. The electrical properties were measured on a 54-mm-diameter disk with 3 mm thickness printed in the XY plane, using the fine quality profile (0.1 mm layer height) in Ultimaker Cura 3.2.1, an Ultimaker 3, a 0.4 mm print core, and 100% infill. Ultimaker is constantly working on extending the TDS data.

Disclaimer

Any technical information or assistance provided herein is given and accepted at your risk, and neither Ultimaker nor its affiliates make any warranty relating to it or because of it. Neither Ultimaker nor its affiliates shall be responsible for the use of this information, or of any product, method or apparatus mentioned, and you must make your own determination of its suitability and completeness for your own use, for the protection of the environment, and for the health and safety of your employees and purchasers of your products. No warranty is made of the merchantability or fitness of any product; and nothing herein waives any of Ultimaker's conditions of sale. Specifications are subject to change without notice.





Version	Version 4.002
Date	November 19, 2018

E PLA strekktest rapport

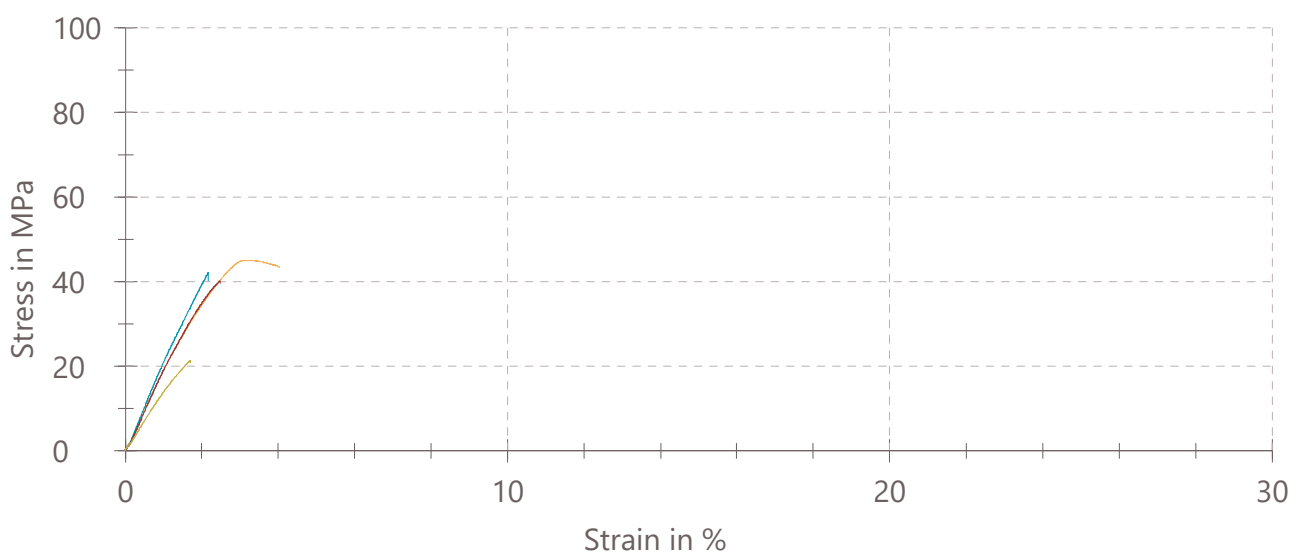
Test report

Customer	:		Specimen type	:	
Job no.	:		Pre-treatment	:	
Test standard	:	DIN EN ISO 527-1	Tester	:	
Type and designation	:		Notes	:	
Material	:		Machine data	:	
Specimen removal	:				
Pre-load	:	0.1	MPa		
Speed, tensile modulus	:	1	mm/min		
Test speed	:	50	mm/min		
Grip to grip separation at the start position	:	115.00	mm		
Nominal strain	:		Method B		

Test results:

Legend	No.	Curve	E_t MPa	σ_x MPa	σ_y MPa	ϵ_y %	σ_m MPa	ϵ_m %	σ_b MPa	ϵ_b %	ϵ_{tb} %	b mm	h mm
	2	Type c	1740	-	45.0	3.2	45.0	3.2	43.4	-	4.0	13.27	3.2
	3	Type a	1900	-	-	-	42.0	2.2	42.0	2.2	-	13.27	3.2
	4	Type a	1630	-	-	-	40.0	2.5	40.0	2.5	-	13.26	3.17
	5	Type a	1250	-	-	-	21.2	1.7	21.2	1.7	-	13.22	3.2

Series graph:



Statistics:





Series	E_t	σ_x	σ_y	ϵ_y	σ_m	ϵ_m	σ_b	ϵ_b	ϵ_{tb}	b	h
n = 4	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	%	mm	mm
\bar{x}	1630	-	45.0	3.2	37.1	2.4	36.7	2.1	4.0	13.26	3.193
s	275	-	-	-	10.7	0.62	10.4	0.39	-	0.0238	0.015
V [%]	16.92	-	-	-	28.97	26.24	28.28	18.66	-	0.18	0.47





F LDPE strekktest rapport

Test report

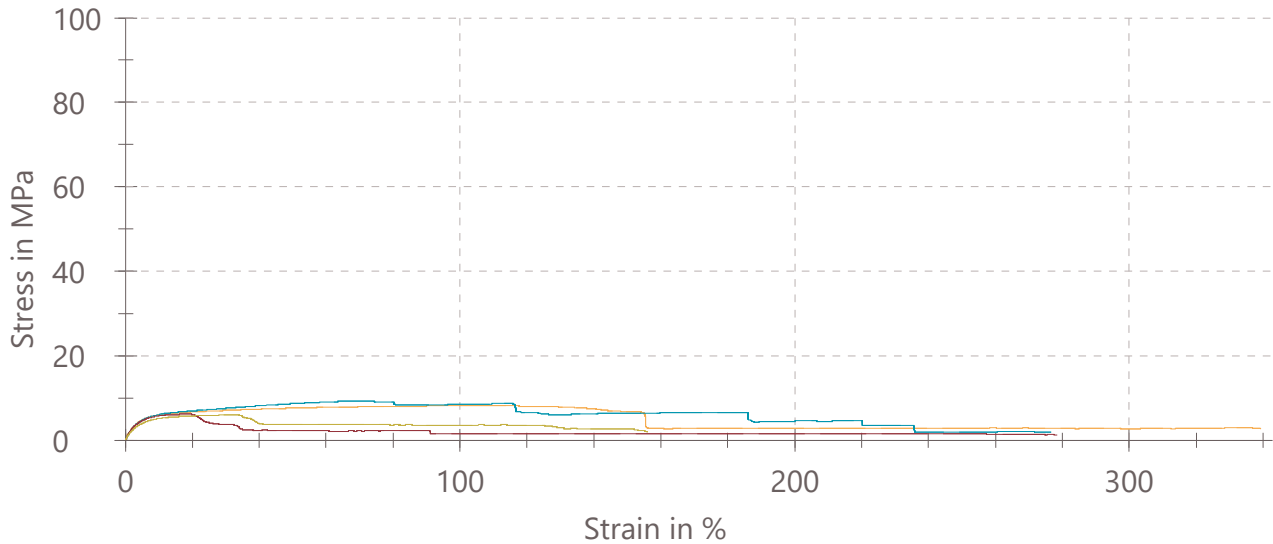
Customer	:		Specimen type	:	
Job no.	:		Pre-treatment	:	
Test standard	:	DIN EN ISO 527-1	Tester	:	
Type and designation	:		Notes	:	
Material	:		Machine data	:	
Specimen removal	:				
Pre-load	:	0.1	MPa		
Speed, tensile modulus	:	1	mm/min		
Test speed	:	50	mm/min		
Grip to grip separation at the start position	:	115.00	mm		
Nominal strain	:		Method B		

Test results:

Legend	No.	Curve	E_t MPa	σ_x MPa	σ_y MPa	ϵ_y %	σ_m MPa	ϵ_m %	σ_b MPa
	1	Type c (σ_y : Please check the result presets)	113	5.95	-	-	8.11	100	2.59
	2	Type c (σ_y : Please check the result presets)	84.3	6.02	-	-	9.27	70	1.85
	3	Type c	94.6	5.72	6.11	18	6.11	18	1.22
	4	Type c (σ_y : Please check the result presets)	77.3	5.08	-	-	5.98	32	1.87

Legend	No.	ϵ_b %	ϵ_{tb} %	b mm	h mm
	1	340	-	11.46	3.17
	2	280	-	12.7	3.25
	3	-	280	12.1	3.45
	4	160	-	12.88	3.47

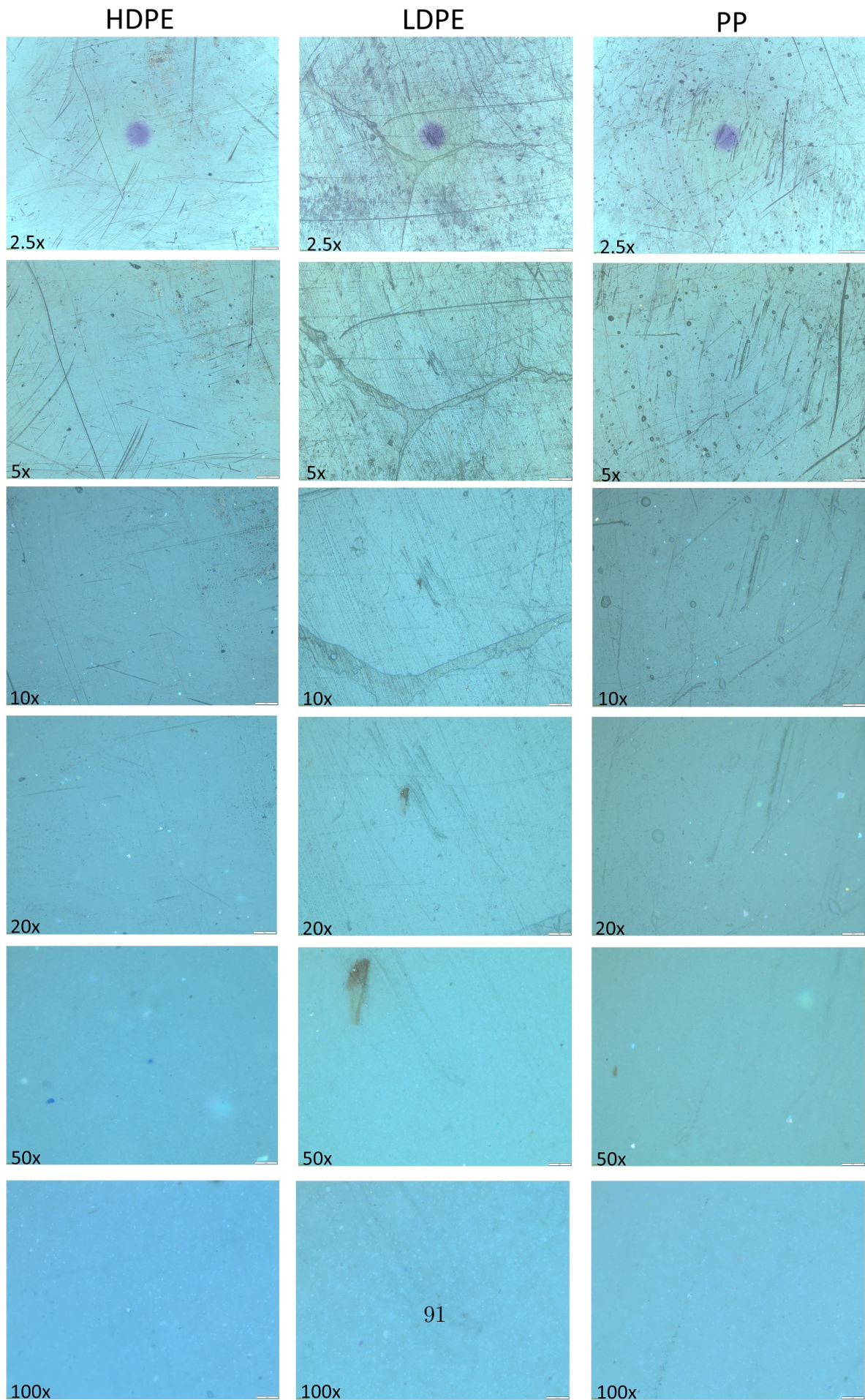
Series graph:



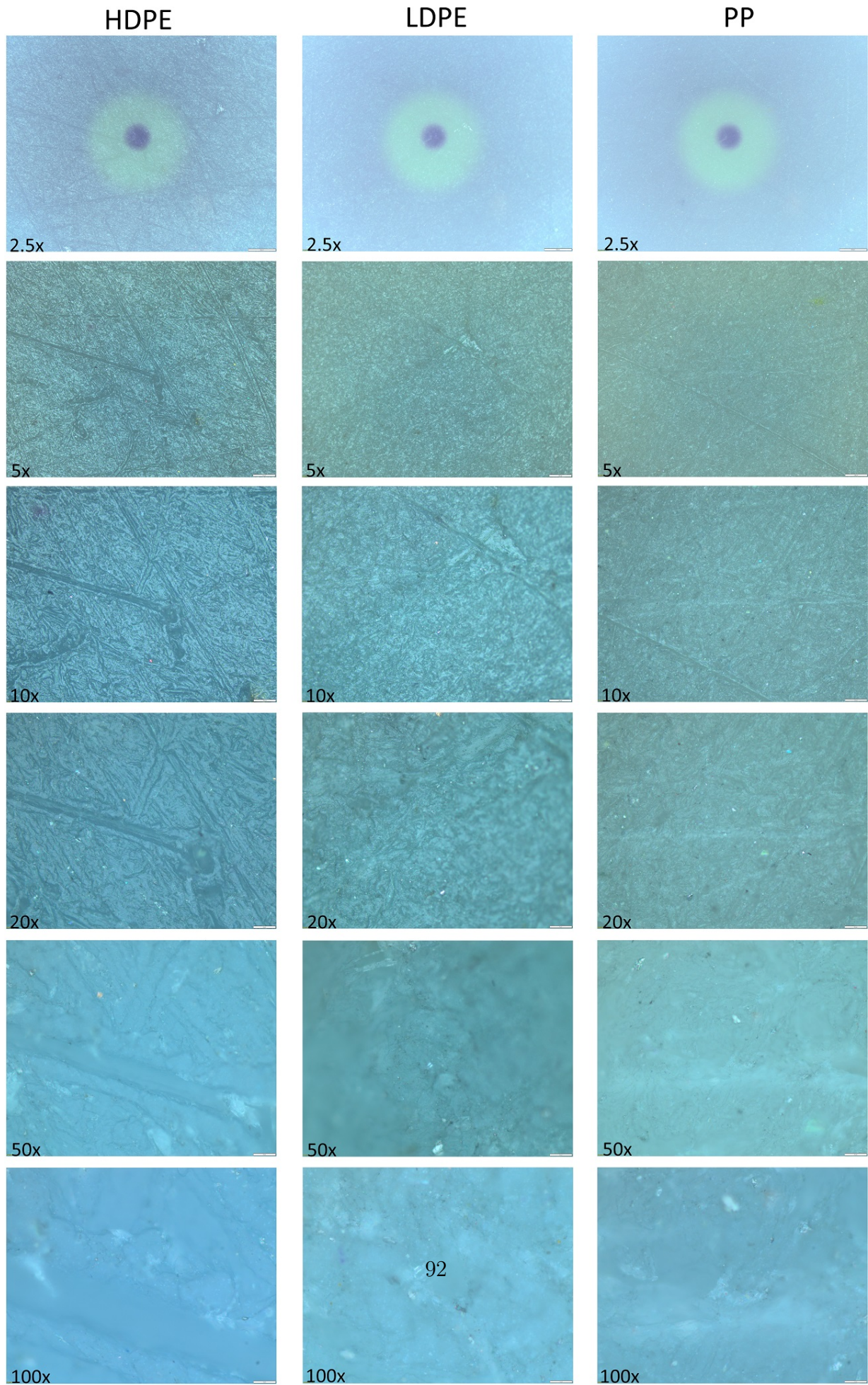
Statistics:

Series	E_t	σ_x	σ_y	ϵ_y	σ_m	ϵ_m	σ_b	ϵ_b	ϵ_{tb}	b	h
n = 4	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	%	mm	mm
\bar{x}	92.2	5.70	6.11	18	7.37	56	1.88	260	280	12.29	3.335
s	15.4	0.430	-	-	1.60	38	0.560	93	-	0.6432	0.1482
v [%]	16.69	7.55	-	-	21.71	68.62	29.76	36.21	-	5.24	4.44

G Mikroskop bilder av materialer



Figur 38: Mikroskop bilder av blank side av prøver



Figur 39: Mikroskop bilder av slipt side av prøver