Bacheloroppgave

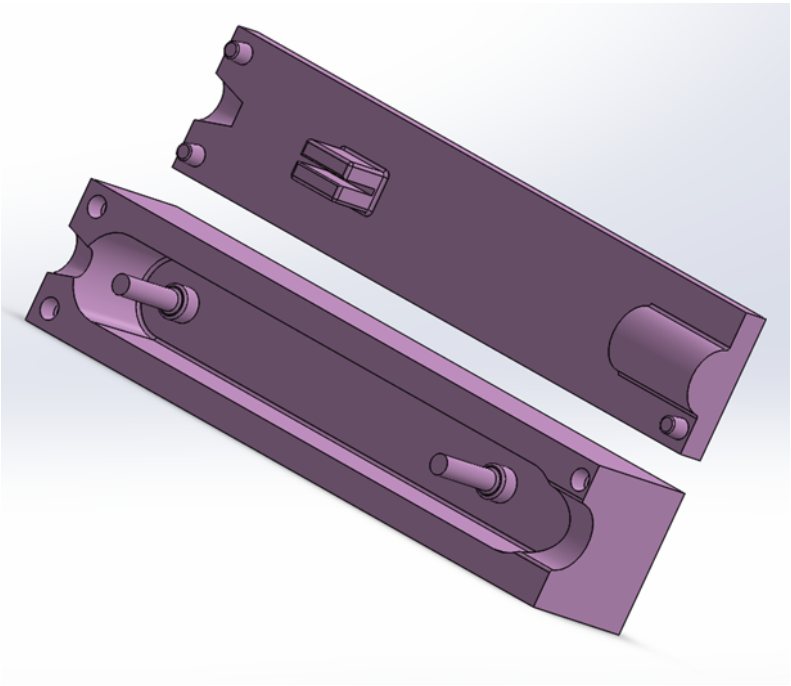
NTNU
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for maskinteknikk og produksjon

Cato Engebakken
Marius Gårdsrud Hole

AddForm 2.0

Additiv produksjon av støpeformer som skal brukes til Reaction Injection Molding

Bacheloroppgave i Bachelor i ingeniørfag - Maskin
Veileder: Harald Bertin Jøsendal
Mai 2019



NTNU
Kunnskap for en bedre verden

Cato Engebakken
Marius Gårdsrud Hole

AddForm 2.0

Additiv produksjon av støpeformer som skal brukes til Reaction Injection Molding

Bacheloroppgave i Bachelor i ingeniørfag - Maskin
Veileder: Harald Bertin Jøsendal
Mai 2019

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for maskinteknikk og produksjon

NTNU
Kunnskap for en bedre verden

NTNU
Institutt for vareproduksjon
og byggteknikk

Oppgavens tittel: AddForm 2.0 - *Additiv produksjon av støpeformer som skal brukes til Reaction Injection Molding.*	**Dato:** 20.05.2019 **Antall sider:** 63		
	Masteroppgave:		**Bacheloroppgave** X
Navn: Cato Engebakken og Marius Gårdsrud Hole			
Veileder: Harald Bertin Jøsendal			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/ veiledere: Henning Haugum og Trond Stenersen ved Strukturplast AS			

Sammendrag:
Denne oppgaven omhandler additiv produksjon av støpeformer for prototyper og mindre serier i plast, og tar utgangspunkt i SINTEF's tidligere AddForm prosjekt. Denne oppgaven ser nærmere på mulighetene og begrensninger ved produksjonsmetoden, med særlig hensyn på lite etterarbeid og lav kostnad.

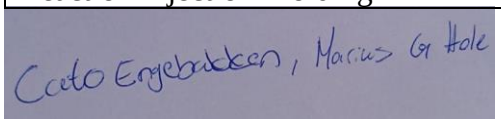
Gruppen designet testformer i SolidWorks med formål om å undersøke støpbarheten til materialene som ble benyttet. Disse ble utformet som et åpent støpebeger for å redusere forstyrrende faktorer under støp. To forskjellige additive metoder ble benyttet til produksjon, FDM og SLA. Disse er blant de rimeligste og mest kjente metodene innenfor 3D-printing. I tillegg ble en kontrollform laget i SLS for sammenlikningsgrunnlag.

FDM former ble printet i ABS og etterbehandlet kjemisk med aceton, SLA ble kun vasket og herdet. Støpingen ble gjort med NORSelast® Polyuretan ved Strukturplast AS sine lokaler på Gjøvik, med svært varierende resultater.

ABS formene klarte seg relativt dårlig, mens SLA formene klarte seg meget bra. Videre la Strukturplast inn et ønske om at gruppen skulle gjøre ytterligere forsøk på å lage en produksjonsform i SLA, til et av deres prosjekter. Dette ble gjennomført og nye vellykkede støperesultater ble fremlagt. SLA formene leverte helt klart de beste resultatene. ABS har også potensielle bruksområder, men leverer ikke resultater på linje med SLA i forhold til nøyaktighet og overflate finish. Begge anbefales til videre arbeid.

Stikkord:

Form produksjon
Additive Manufacturing
3D-print
Reaction Injection Molding



(sign.)

Abstract

This task concerns additive production of molds for prototypes and smaller series in plastic and is based on SINTEF's former AddForm project. This paper takes a deeper look at the possibilities and limitations of the production method, with special consideration to little finishing and low cost.

The group designed test molds in SolidWorks for the purpose of examining the cast ability of the materials used. These were designed as an open mold to reduce disturbing factors during casting. Two different additive methods were used for production, FDM and SLA. These are among the most affordable and best-known methods in 3D printing. In addition, a control mold was made with SLS for comparison only.

FDM molds were printed in ABS and post-treated chemically with acetone, SLA was washed and cured only. The molding was done with NORSelast® Polyurethane at Strukturplast AS's premises located in Gjøvik, with varying results.

The ABS molds did relatively poor, while the SLA molds did very well. Furthermore, Strukturplast wanted the group to make further efforts to create a mold with SLA for production purposes. This was done, and new successful casting results were presented. The SLA molds clearly delivered the best results. ABS also have potential uses, but did not deliver results in line with the SLA in terms of accuracy and surface finish. Both are still recommended for further pursuit.

Forord

Denne Bacheloroppgaven er et avsluttende kapittel på en spennende og lærerik reise inn i Ingeniørgrenen. Det er viktig for oss å presisere hvor mye maskiningeniør studiet ved NTNU Gjøvik har gitt oss. Oppgaven omhandler et tema som for noen år siden var totalt ukjent for oss. Nå når oppgaven er ferdig er det ufattelig å tenke på hvor mye vi har lært i løpet av de siste årene takket være NTNU Gjøvik.

Additiv tilvirkning av støpeformer har vært hoved agendaen ved oppgaven og har vist oss en liten del av hvilke muligheter denne teknologien åpner for. Vårt ønske utover dette er at våre funn og konklusjoner videreføres til et marked som ser verdien av arbeidet som er nedlagt.

Arbeidet har til tider vært krevende, både faglig og personlig, men har samtidig vært svært spennende og interessant. Det har vært nødvendig å finne kreative løsninger på nye og ukjente utfordringer. Noe som vi mener har styrket vår faglige kompetanse.

Til slutt vil vi takke våre samboere for all tålmodighet og støtte de har vist under arbeidet med denne oppgaven. Videre vil vi takke Harald B. Jøsendal for alle råd, veiledning og ikke minst for å ha presentert oss for denne oppgaven. Henning Haugum og Trond Stenersen ved Strukturplast AS for fremdragende engasjement, veiledning og hjelp ved støping. Vi vil også takke plast og kompositt gutta i kjellern på B-bygget som har vært behjelpelig med råd, tips og bistand. Espen Moldal ved Topro AS for prisoverslag og NTNU Gjøvik med deres tilhørende 3D-lab for muligheten og utstyret til å gjennomføre denne oppgaven.

Definisjoner av begreper, forkortelser, symboler og enheter

Tabell 1: Definisjoner av begreper, forkortelser, symboler og enheter.

Begrep	Definisjon
Additiv	«Å legge til noe»
Subtraktiv	«Å ta bort/trekke fra noe»
AddForm	Prosjekt – «Additiv Formproduksjon»
Innsatsform	Form for innlegg i hoved støpeform
Prototype	Første eksemplar av et produkt som skal testes
Infill	Modellens grad av fyll / tetthet
Extrude / ekstrudere	Oppvarmet materiale som tvinges igjennom en mindre åpnning
Brim	Rand / kant
Raft	Plattform / flåte

Flash	Støpeskjegg i delelinjen til formen
Additiv metode	
FDM	Fused Deposition Model
SLA	Stereolithography Apparatus
SLS	Selective Laser Sintering
Materialer	
Filament	Materialtråd til FDM
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene (filament)
PLA	Polylactic Acid (filament)
PET	Polyethylene Terephthalate (filament)
PUR	Polyuretan (støpe materiale)
PIR	Polyisocyanurate (støpe materiale)
Resin	Flytende SLA print materiale bestående av methacrylate photopolymers

TP	Termoplast
PA12	Nylon pulver
Kjemiske midler	
Aceton	Flytende og fargeløst løsemiddel
Isopropanol	Rengjørings sprit
Programvare og filtyper	
CAD	Computer-Aided Design (modellerings programvare)
SW	SolidWorks (CAD programvare)
STL	Stereolithography / Standard Triangular Language (Filtype for slicere)
G-koder	Printerspråk som inneholder maskin koordinater
Slicer	Printer programvare som konverterer STL modeler til printerspråk
Slic3r	Prusa slicer programvare

PreForm	Formlabs slicer programvare
Symboler og enheter	
Ø	Symbol for diameter
mm	Millimeter
cm	Centimeter
cm^3	Kubikk centimeter
°	Vinkel
°C	Grader Celsius
MPa	Mega Pascal (Newton/kvadrat millimeter)
GPa	Giga Pascal
Psi	Pund per kvadrattomme
NOK	Norske kroner

Andre forkortelser	
NTNU	Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet
SD-kort	Secure Digital-kort (lagringsenhet)
PC	Personal Computer
UV	Ultraviolet
RIM	Reaction Injection Molding
AT/AM	Additiv Tilvirkning/Additive Manufacturing
PE	Prusa Edition
CNC	Computer Numerical Control (Datastyrt maskinering)

Innholdsfortegnelse

Abstract ii
Forord iii
Definisjoner av begreper, forkortelser, symboler og enheter iv
Innholdsfortegnelse ix
Figurliste xii
Tabeller xiv
1 Introduksjon 1
1.1 AddForm-prosjektet 1
1.2 Problemstilling 2
1.3 Omfang 3
1.4 Målgruppe 3
1.4.1 Interessenter 3
1.5 Avgrensning av oppgaven 4
1.5.1 Begrunnelse for valg av avgrensning 5
1.5.2 Avgrensningens mulige utfall for oppgaven 6
2 Metode 8
2.1 Datainnsamling 8
2.2 Reliabilitet og validitet 9
2.3 Modellering og simulering 9
2.4 Maskiner og materialer 10
2.5 Etterbehandling 10
2.6 Støpeforløp 11
2.7 Øvrig arbeid 11
3 Teoretisk grunnlag 12
3.1 Hva skjer før print 12
3.1.1 Generell utforming av støpeform 12
3.1.2 Fra CAD modell til printerspråk 14
Stereolithography (STL) 14
G-koder 15
3.2 Additiv tilvirkning 15

3.3 FDM maskin: Original Prusa i3 MK2 16
3.3.1 Forberedelse av printeren 17
3.3.2 Klart for printing av modell 18
3.3.3 Materialer 18
3.3.4 Etterbehandling 19
3.4 SLA maskin: Formlabs, Form 2 21
3.4.1 Hoved komponenter og bruk 22
3.4.2 Materialer 23
3.4.3 Etterbehandling 24
3.5 Støpe prosessen 25
3.5.1 Støpemetode 25
3.5.2 Støpemateriale 26
4 Egne undersøkelser 28
4.1 Design og analyse av former 28
4.2 Produksjonsprosessen 30
4.2.1 FDM 30
4.2.2 SLA 32
4.3 Etterbehandling av støpeformer 35
4.3.1 FDM 35
4.3.2 SLA 35
4.4 Kostnader 36
4.5 Støping hos Strukturplast AS (Gjøvik) 37
5 Resultater 40
5.1 Formproduksjon 40
5.1.1 Etterbehandling 44
Testform 1 45
Testform 2 47
Testform 3 48
Testform 4 49
Testform 1 og 2 i SLA 49
Øvrig 50
5.2 Første støpeforsøk 51
5.3 Andre støpeforsøk 55

6 Diskusjon 58
7 Konklusjon 62
8 Videre Arbeid 63
Referanser 64
Vedlegg 69
Vedlegg 1 – Guide til AddForm 69
Vedlegg 2 – Tillatelser 95
Gjengivelse av «Figur 2: Prusa i3 MK2s komponentforklaring» 95
Gjengivelse av «Figur 3: Form 2 – Hoved komponenter» 96
Bruk av «Guide til AddForm» som vedlegg 98
Vedlegg 3 – Prisoverslag Topro AS 99
Vedlegg 4 – Prosjektplan 101
Vedlegg 5 - Logg 115

Figurliste

Figur 1: Prinsippskisse RIM mold (Covestro LLC, 2015). 14
Figur 2: Prusa i3 MK2S komponentforklaring (Prusa, 2018). 16
Figur 3: Form 2 - Hoved komponenter (Formlabs, 2018a). 22
Figur 4: Prinsippskisse RIM maskin (Covestro LLC, 2015). 25
Figur 5: Ferdig designet testform i SolidWorks. 28
Figur 6: Testform i SolidWorks – Under slippvinkel-analyse. 29
Figur 7: Testform i SolidWorks - etter slippvinkel-analyse. 29
Figur 8: Testform i Slic3r PE. 30
Figur 9: Testform i Slic3r PE – besiktiges lag for lag. 31
Figur 10: Testform i PreForm - rett etter innlasting av STL- fil 32
Figur 11: Testform i PreForm - med raft og støttestrukturer (viser rotasjons hjul) 33
Figur 12: Testform i PreForm - tilfredsstillende PreForm innstillinger – klar for utprint 34
Figur 13: Strukturplast AS sin RIM maskin sett i profil. 38
Figur 14: Strukturplast AS sitt herdebord. 38
Figur 15: Trond Stenersen ved Strukturplast AS foran kontrollpanelet til RIM maskinen. 39
Figur 16 Testform 1 under produksjon på Prusa i3 MK2. 41
Figur 17 Testform 2 med nytt design. 42
Figur 18: Testform 2 - SLA. 43
Figur 19: Testform 1 i acetonkammeret under etterbehandling. 45
Figur 20: Testform 2 etter acetonbehandling. 47
Figur 21: Testform 3 etter acetonbehandling. 48
Figur 22: Testform 4 etter acetonbehandling. 49
Figur 23 Testform 1 (øverst) og testform 2 (nederst) etter støping. 51
Figur 24 Testform 3 etter støping. 52
Figur 25 Kontrollform i PA12 etter støp. 52
Figur 26 Testform i Standard Resin Grey fra Formlabs etter støp. 53
Figur 27 Testform i Rigid Resin etter støp. 53
Figur 28: Lukket form - Strukturplast AS 55
Figur 29: Ferdig produsert lukket form ved SLA. 56
Figur 30: Støpte komponenter i lukket form, produsert i NORSelast PUR 65 shore A. 56
Figur 31: Testform i ABS med 100% infill før støp. 57

Figur 32: Testform i ABS med 100% infill etter støp. 57

Tabeller

Tabell 1: Definisjoner av begreper, forkortelser, symboler og enheter. iv
Tabell 2: Generelle egenskaper for ABS (Campo, 2006). 19
Tabell 3: Grey materialegenskaper (Formlabs, 2017). 24
Tabell 4: Rigid materialegenskaper (Formlabs, 2018c). 24
Tabell 5: Generelle egenskaper for PUR herdeplast (Campo, 2006). 27
Tabell 6: Produksjonstidene. 44
Tabell 7: Etterbehandlingstidene. 50

1 Introduksjon

Med ny teknologi kommer nye muligheter og løsninger. Marked som en gang var begrenset til mindre geografiske områder, er i dag åpent for hele verden. Dette skaper en markedskonkurranse verden aldri har sett maken til. Å finne nye smarte, enkle, billige løsninger og muligheter er viktigere enn noen gang. Tradisjonelt for sprøytestøping er det vanlig med støpeformer laget i metall. Prosessen med å lage disse er relativt omfattende og inkluderer gjerne maskineringssentere, andre maskiner for bearbeiding, slipeverktøy etc. Prislappen på disse formene kan forsvares ved produksjon av større serier, eller eksklusive produkter. For prototyping og mindre serier blir det mer utfordrende å forsvare prisen for maskinerte støpeformer i metall. Allikevel er behovet for støpte produkter stort i markedet uansett størrelsesordenen. «Med ny teknologi kommer nye muligheter og løsninger» - AddForm 2.0 avdekker mulighetene ved å additivt produsere støpeformer på en rask og rimelig måte.

1.1 AddForm-prosjektet

De senere årene har additiv tilvirkning (AT), ofte kalt 3D-printing, blitt en vanligere produksjonsmetode blant bedrifter, men også privatpersoner fatter interesse for hva denne teknologien tilbyr. Både kommersielle og industrielle 3D-printere har derfor vært under omfattende utvikling og forbedring den senere tid, noe som gir bedre og mer nøyaktige 3D-printere på markedet, til en bedre pris enn før.

AddForm prosjektet ble i sin tid startet for å redusere tid og kostnad for bedrifter, ved prototyper og mindre serier. Prosjektet gikk ut på å produsere støpeformer via additiv tilvirkning, for sprøytestøping. Dersom bedriften har tilgang på eller eier en 3D-printer, vil støpeformen kunne produseres i løpet av få dager. I motsetning til flere uker som ofte er normalen for metallformer. Kostnadene begrenses også til arbeidstid, samt pris på benyttet materiale. Hensikten med å først produsere en 3D-printet støpeform, fremfor å bare 3D-printe delen i seg selv, ligger i større utvalg av materialer til produktet. Det er selvfølgelig fordelaktig å benytte ønsket materiale med tilhørende materialegenskaper for produktet. Selv om det kun er for prototyper eller begrensede serier. Spørsmålet er om additivt produserte støpeformer er gode nok til sine formål (SINTEF, 2016).

Denne oppgaven, som er blitt kalt AddForm 2.0, har som hensikt å ta AddForm prosjektet et steg videre. Da med hensyn på rimelig og effektiv formproduksjon. AddForm 2.0 fokuserer på relativt rimelige maskiner av god kvalitet, som er tilgjengelig for alle. Dette grunner i at ikke alle bedrifter har økonomisk kapasitet til å investere store summer i en maskin, spesielt tilegnet prototyper eller mindre serier. Samtidig må maskinen kunne produsere et relativt nøyaktig resultat med minst mulig etterarbeid. Effektiv arbeidstid er derfor også et viktig punkt. Med den effektive arbeidstiden menes tiden som i praksis må benyttes for formproduksjonen og strekker seg fra og med design og materialvalg for formene, til og med etterbehandling og klargjøring for støp. Dette arbeidet holdes så enkelt å kortfattet som mulig.

1.2 Problemstilling

Hovedmålet med oppgaven er å avdekke muligheter og bruksområder ved additivt produserte støpeformer i plast, med bakgrunn i «Guide til AddForm» prosjektet (vedlegg 1). Dette med særlig hensyn på lav kostnad, hvor liten grad av etterarbeid er en viktig faktor.

«Hvordan kan man på en tilfredsstillende måte additivt produsere rimelige støpeformer for støp av prototyper og mindre serier?»

I problemstillingen defineres «tilfredsstillende» opp mot hovedmålet som beskrevet over. Videre vil rimeligheten vurderes opp mot tradisjonell maskinering av støpeformen i aluminium. Priseksempel på dette er innhentet fra ekstern underleverandør av CNC-maskinerte tjenester.

1.3 Omfang

- Beskrivelse av additiv tilvirkning prosess, tilvirkningsutstyr og materialer.
- Beskrivelse av RIM metode og materiale.
- Utforming og analyser av støpeformer.
- Fremstilling og etterbehandling av støpeformer i plast.
- Støpforsøkenes resultater med vurderinger.

1.4 Målgruppe

Målgruppen for AddForm-prosjektet er industribedrifter som ønsker alternative metoder for hurtig og billig formproduksjon til sprøytestøping av prototyper i sine respektive materialer. I utgangspunktet er det aller enkleste og billigste for disse bedriftene å printe ut sine produkter direkte. Dette derimot vil skape begrensinger som material valg, og andre material egenskaper. Addform kan derfor være det beste alternativet for disse bedriftene som ønsker å redusere kostnader ved prototyping (SINTEF, 2016).

1.4.1 Interessenter

En interessent kan defineres som «personer, grupper eller organisasjoner som kan påvirke, bli påvirket av, eller oppfatter at de vil bli påvirket av prosjektets gjennomføring eller resultat» (Difi, 2018). Det er slik at interessentene kan deles inn i direkte interessenter og indirekte interessenter, samtidig som det også er underkategorier under disse (Difi, 2018). De direkte interessentene vil være de som enten har en direkte påvirkning av prosjektet, eller en direkte påvirkning på prosjektet (Difi, 2018). De direkte interessentene deles inn i virksomhetsledelse, brukerne og leverandørene (Difi, 2018). Virksomhetsledelsen er den interessenten som setter mål, bestiller og finansierer prosjektet (Difi, 2018). Brukerne er de interessentene som har et behov og beskriver ønsket produkt, samtidig som det er de som mottar resultatet gjennom testing og dermed realiserer gevinstene (Difi, 2018). Leverandørene vil være de som leverer nødvendig kompetanse og ressurser for å skape det avtalte produktet (Difi, 2018).

De indirekte interessentene derimot er de som vi kunne påvirke prosjektet på andre måter. Disse interessentene kan også deles inni to undergrupper, premissgivere og andre interessenter. Vi vil ikke gå noe nærmere inn på disse, da det ikke er relevant for interessentene i AddForm-prosjektet.

I AddForm-prosjektet referert på SINTEF (2016) sine hjemmesider, er det kun interessenter man kan definere som direkte interessenter. Norsk forskning vil kunne kategoriseres som «virksomhetsledelsen», da det er disse som har finansiert prosjektet og dermed er ansvarlige for prosjektet. Leverandørene i dette prosjektet vil være OM BE Plast og SINTEF Materialer og kjemi, da prosjektet er initiert av dem. Samtidig som de også gjennom sin initiering har hatt kompetansen og ressursene nødvendig for AddForm-prosjektet. Brukerne derimot er de andre prosjektdeltagerne (SINTEF, 2016). Under prosjektdeltagere i AddForm-prosjektet er: «Eker Design, Laerdal Medical, Mascot Electronics, Nordic 3D, ProNor, Rottefella, Sleipner Motor, Ulefos Esco, Scandinavian Business Seating and Stokke, samt FoU-partnerne SINTEF Raufoss Manufacturing og NTNU i Gjøvik» (SINTEF, 2016). Disse prosjektdeltagerne går under kategorien brukere fordi det er disse bedriftene som har behov for støpeformene som er i fokus i AddForm-prosjektet, og som gjennom tesing av formene vil motta resultater og gevinster.

1.5 Avgrensning av oppgaven

1. Valg av additive metoder og printere begrenses til to metoder og en maskin per metode. Disse er FDM i Prusa i3 MK2 og SLA i Form 2. For sammenlikningsgrunnlag er det blitt benyttet en SLS printer i materialet PA12, men oppgaven ser ikke nærmere på metoden og materialet.

2. Valg av materialer som ble brukt til støpeformene begrenses til ABS filament for FDM og Formlabs' Grey (standard resin) samt Rigid (Engineering resin) for SLA

3. Etterarbeidet av støpeformene begrenses til acetonbehandling av støpeformene produsert i ABS, og nødvendig vask og herding av støpeformene produsert i resin.

4. Oppgavens omfang begrenses til mulighetene ved additiv produksjon av støpeformer, og vil ikke gå i dybden av hva som skjer med materialet etter utprint og etterbehandling. Oppgaven vil heller ikke sammenlikne materialegenskapene ved forskjellige typer og mengde infill.

5. Støpmetoden som ble brukt i denne oppgaven begrenses til RIM.

1.5.1 Begrunnelse for valg av avgrensning

1. Det dukker stadig opp nye additive metoder, hvor flere av disse kan være godt egnet til denne oppgavens formål. Det er ikke mulig for oss å kunne se på alle disse. Dette grunnes tidsbegrensninger, tilgjengelighet av forskjellige metoder NTNU Gjøvik besitter, og oppgavens formål. FDM i Prusa i3 ble derfor valgt med tanke på billig og god maskin i den vanligste additive metoden som er i dag. SLA i Form 2 ble valgt med tanke på best mulig overflate og høyest oppløsning på detaljer etter utprint.

2. Til hver av de to additive metodene som blir brukt finnes det en rekke materialer tilgjengelig. Forsøkene med FDM printer begrenses til et av de vanligste materialene som vi vet er godt egnet til enkel etterarbeid med acetonbehandling, ABS. For SLA forsøkene begrenses materialet til Formlabs' standard SLA resin som er velegnet for funksjonelle prototyper. Formlabs' Rigid resin ble valgt på grunn av tilgjengelighet, som et alternativ til standard resin.

3. En særdeles viktig faktor for oppgavens formål er å kunne avdekke metoder som gir minst mulig etterarbeid. Dette er for at vinningen av additiv forproduksjon, ikke skal gå opp i spinningen. Oppgaven begrenses derfor til kun acetonbehandling av formene printet i ABS, som krever lite bemannet tid. For SLA forsøkene begrenses etterarbeidet til nødvendig vask og herding av utprintet modell. Disse valgene basers på innhenting av sekundærdata.

4. Målet med vår oppgave er å tette hull i «Guide til AddForm» og samtidige ta denne et steg videre. Grunnet vår studieretning (industriell design) er det fordelaktig for oss å se på muligheter, mot for å gå i dybden i materialstrukturer, egenskaper og oppbygning. Samtidig er «guide til AddForm» interessert i disse mulighetene med hensyn på lite etterarbeid.

5. Hovedprosjektet, «Guide til AddForm», ser på mulighetene for additiv formproduksjon til sprøytestøping som utsetter formene for høyt trykk. Derimot skal vår oppgave finne metoder og materialer som er gode nok for støping uten omfattende, eller tidkrevende etterarbeid. Denne oppgaven begrenses derfor til RIM som har mindre krav til utforming og design av støpeformene sammenliknet med sprøytestøping utsatt for høyere trykk. Til tross for dette mener vi at RIM vil kunne avdekke om metodene og materialene som blir brukt i denne oppgaven er gode nok med tanke på videre arbeid. Denne støpemetoden er også tilgjengelig hos Strukturplast AS sin utviklingsavdeling som befinner seg lokalt i Gjøvik.

1.5.2 Avgrensningens mulige utfall for oppgaven

1. Ved å begrense denne oppgaven til kun SLA og FDM kan gjøre at man går glipp av den optimale metoden for problemstillingen. Til tross for dette anses ikke dette som en begrenset faktor for resultater. Dette er metoder og maskiner industrien har råd til å kjøpe inn og samtidig krever ikke disse spesialkompetanse for å brukes. Maskinene som ble brukt til disse metodene er av høy kvalitet til en fornuftig pris og vil kunne gi valide resultater sammenliknet med andre maskiner i andre prisklasser i samme additive metode.

2. Markedet florer av forskjellige materialer og hybrider/kompositter av disse. Og kunne se på alle disse materialene blir for omfattende for denne oppgaven, men gruppen mener at valgene av materialer er svært passende for problemstillingen, ettersom det først og fremst sees på muligheter. Mer egnet materiale, og eventuelt i andre metoder kan vise seg å være mer fordelaktig for bedrifter som ønsker å oppnå visse materialegenskaper i støpeformene sine.

3. Å kun se på to etterbehandlingsmetoder kan gjøre at man «mister» andre aktuelle metoder, og gir lite sammenlikningsgrunnlag. Basert på innhentet sekundærdata om etterbehandling av 3d-printede produkter og problemstillingen for oppgaven som søker minst mulig etterbehandling vurderes disse metodene som tilfredsstillende for oppgaven.

4. Det vil kunne finnes muligheter og begrensinger i forhold til problemstillingen, men kan si lite om hva som skjer i materialene på molekylnivå. Disse dataene, og ikke bare mulighetene alene, vil være interessante for bedrifter som velger å bruke «Guide til AddForm» (vedlegg 1).

5. Mulig utfall for denne begrensningen er at vi avdekker muligheter som kanskje ikke er holdbare i sprøytestøp-prosesser utsatt for høyere trykk.

2 Metode

Hele bachelorprosjektet startet med at gruppen fikk en oppgavebeskrivelse å jobbe ut ifra, og umiddelbart dukket det opp mange ideer når det kom til materialvalg og metoder. Det er dessverre slik at gode ideer ikke er det samme som løsninger (Westhagen, et al., 2008). Disse ideene ble brukt som et foreløpig bilde på hvilke alternative muligheter som kunne benyttes, og gruppen bearbeide disse ideene. Deretter ble den ønskede fremgangsmåten for å løse problemstillingen planlagt. Fremgangsmåten leggers frem i det videre.

2.1 Datainnsamling

Datainnsamling deles ofte inn i primærdata og sekundærdata. Primærdata defineres som data man selv innhenter gjennom eksempelvis forsøk og observasjoner (Halvorsen, 2014). Sekundærdata på sin side er informasjon og litteratur fra andre, som ligger tilgjengelig. Det er vanlig at en gjerne kombinerer disse datatypene (Halvorsen, 2014). For denne oppgaven begynte det først med innhenting av sekundærdata, i form av tidligere forskning og ideer, gjennom tilsendte dokumenter og søkemotoren Google. Senere ble disse dataene verifisert med litteratur om temaet. På denne måten bygde gruppen opp et teoretisk grunnlag for oppgaven. Siden problemstillingen for denne oppgaven går ut på å finne muligheter for additiv produksjon av støpeformer for plaststøping, var det behov for å samle inn ny informasjon. Dette kom da i form av primærdata. Primærdataene ble innhentet fra egne undersøkelser og forsøk basert på grunnlaget av sekundærdata, samt kunnskap og erfaringer som studieforløpet ved NTNU Gjøvik har tilført oss.

Samtidig må det nevnes at ettersom temaet for oppgaven er relativt nytt og eksperimentelt, finnes det svært begrenset med fagfellevurdert litteratur om temaet. Dette resulterte i at en del kilder som er innhentet, ikke har høy validitet. Gruppen har forsøkt å kompensere for dette ved å finne egne resultater og bekrefte teorier med egen forskning.

I oppgaven har standard for additiv produksjon blitt benyttet: NS-EN ISO/ASTM 52901:2018 (Standard Norge, 2018). Denne beskriver generelle prinsipper ved bruk av additiv produksjon.

2.2 Reliabilitet og validitet

Et spørsmål som gjerne tas opp i forskning er, hvor pålitelige dataene en samler inn er, dette omtales som dataens reliabilitet (Christoffersen, et al., 2011). Under gjennomføringen av denne oppgaven baseres undersøkelser og teorier i stor grad på sekundærdata. Deretter ble disse forsøkt gjenskapt i praksis. De oppnådde resultatene samsvarer i stor grad med resultatene som ble forespeilet. Dette verifiserer dermed dataenes reliabilitet.

Et annet spørsmål det også er verdt å stille seg ved forskning er dataens validitet. Begrepet validitet betyr gyldighet, og går ut på å beregne hvor godt dataene representerer fenomenet som undersøkes (Christoffersen, et al., 2011). Med dette prosjektet har det blitt undersøkt flere ulike additive metoder og materialer som alternativer til tradisjonell produksjon av støpeformer. Med dette kan man med høy sikkerhet konkludere, hva som fungerer og hva som har begrensninger for disse alternativene. På denne måten har validiteten blitt bekreftet.

2.3 Modellering og simulering

CAD programvaren SW ble brukt til modellering av støpeformene. Med dette programmet kunne vi enkelt designe våre egne 3D-modeller. Samtidig kan programmet la oss analysere støpbarheten ved hjelp av verktøyet «mold tools» og tilhørende «draft analysis» for å blant annet sørge for tilfredsstillende slippvinkler i modellen. Før formene ble modellert ble det benyttet litteratur og undersøkt hvilke krav og spesifikasjoner en støpeform må ha. Modellforslag ble presentert for Strukturplast, som er ledende på polyuretan i Norge (Strukturplast AS, 2019), for drøfting av mulige forbedringsområder av formdesign.

2.4 Maskiner og materialer

Materialene valgt i denne oppgaven, på bakgrunn av tilgjengelighet, pris og egenskaper, er ABS for FDM og Grey (standard resin) samt Rigid (engineering resin) fra Formlabs for SLA. ABS er et rimelig materiale som kan etterbehandles kjemisk med aceton. Materialene fra Formlabs på sin side trenger lite til ingen etterbehandling utenom vask og herding. Dette er materialer som gir glatte overflater med høy oppløsning. Begge materialene er til en viss grad temperaturbestandige.

2.5 Etterbehandling

I oppgaven anses etterbehandling som all overflatebehandling som utføres etter fullført print. Som rammebetingelser for etterbehandling stilles det krav om lav kostnad og lav grad av bemannet tid.

For støpeformer er overflateruhet en viktig faktor. Derfor er det hensiktsmessig å oppnå jevne og glatte overflater. Dette er for å hindre at det støpte produktet blir sittende fast i formen, samt for å oppnå ønsket overflatestruktur. Strukturer i overflaten gjenskapes tydelig i sluttproduktet, som ofte ikke er tilfredsstillende.

Det finnes flere essensielt forskjellige etterbehandlingsmetoder. Blant annet sliping, sandblåsing, kjemisk behandling og påføring av overflatebelegg. Spesielt i FDM produserte støpeformer er dette et problem da hvert lag vil lage en grov struktur i overflaten.

Herfra fantes det flere alternativer. Basert på rammebetingelsene, som nevnt over, var det hensiktsmessig å finne en metode som krever lite bemannet tid. Acetonbehandling, basert på sekundærdata, kan angivelig løse dette problemet. Dette ved å kjemisk jevne overflaten, uten behov for særlig bemannet tid. Behandlingen ble utført for støpeformene produsert ved FDM metoden.

2.6 Støpeforløp

Teststøpene ble gjort for å kontrollere støpbarhet og varmebestandighet til formmaterialene. Samtidig kunne det gjøres forsøk med acetonbehandling av formene laget i ABS. Støpe materialet ble valgt på bakgrunn av høy herdetemperatur og tilgjengelighet. Alle støp ble utført i Strukturplast AS sine lokaler på Gjøvik.

2.7 Øvrig arbeid

Under dette prosjektet har gruppens rolle vært (i tillegg til det overnevnte) å utforme, produsere og etterbehandle additivt produserte støpeformer. Her har gruppens deltakere vært nødt til å sette seg inn i produksjonsmetoder, materialegenskaper og krav som stilles til støpeformer. Videre måtte også hendelsesforløpet under støping observeres og resultatene etter disse dokumenteres. På denne måten har gruppen styrket sin kjennskap til prosessen og økt kvaliteten på undersøkelsene. En svakhet er at gruppen ikke fysisk har undersøkt tradisjonelle støpeformer for sammenlikning, grunnet tidspress og kostnad. Et godt sammenlikningsgrunnlag ville vært hensiktsmessig for dette prosjektet og styrket kvaliteten på forskningen. Gruppen står dermed ikke i en posisjon til å kunne bekrefte eller avkrefte at støpekvaliteten ville vært lik med en form i aluminium/stål.

3 Teoretisk grunnlag

Her presenteres all litteratur som danner grunnlaget for oppgaven og som setter gruppen i stand til å utføre undersøkelser med additivt produserte støpeformer.

3.1 Hva skjer før print

For å kunne 3D-printe kreves det en digital modell av produktet som 3D-printeres programvare (slicer) kan konvertere til maskin koordinater, funksjoner og annen informasjon 3D-printeren trenger for å kunne printe ut produktet. Slik modellering kan utføres i dataassisterte design (CAD) programvarer. I denne oppgaven ble SolidWorks (SW) benyttet. SW er altså et av mange modelleringsprogramvarer som er tilgjengelig på markedet. NTNU tilbyr sine studenter en gratis studentlisens til SW, og det var derfor hensiktsmessig å benytte dette. SW anses som et multiverktøy med mange funksjoner og bruksområder. Deriblant verktøyet «mold tools» som lar en analysere og tilpasse modellen etter visse krav og funksjoner som tilhører formdesign. Disse verktøyene viste seg å være en annen fordel ved å bruke SW i forhold til utførelse av denne oppgaven.

3.1.1 Generell utforming av støpeform

Ved støping skal man forsøke å gjenskape innsiden av formen. Det vil altså si at formen er en negativ av produktet som skal støpes. Et viktig moment å merke seg er at for å skape et godt PUR produkt, kreves en god form. Det finnes en rekke kritiske faktorer som spiller en rolle for resultatet av støpet. Det anses lite hensiktsmessig å utdype alle, men de viktigste nevnes her:

Slippvinkler forenkler utstøtning av produktet fra formen og reduserer risikoen for å skade produktet ved utstøtning. Slippvinklene bør være på minst 0,5°.

Radius. Alle indre hjørner og kanter bør ha radius på minimum 1,6 mm. Dette for å unngå spenningsbrudd og andre spenningskonsentrasjoner som kan oppstå grunnet skarpe hjørner.

Delelinjen har to formål ved utforming. Først og fremst skal den sørge for at støpematerialet holder seg inne i formen. Dette kan gjøres ved å lage en opphevet «krage» som gjør det vanskeligere for støpematerialet å sive ut på uønskede plasser. (se figur 1). For det andre kan delelinjen ha luftehull eller en annen form for luft rom. Dette sørger for å redusere bobler og luft som igjen kan sørge for at formen ikke fylles tilstrekkelig. Overskytende materiale som etterhvert renner ut gjennom luftehullene samles opp i renner.

Innløp. Tradisjonelle former kan ha et enkelt innløp ved en viss vinkel. Andre mer avanserte former, som den vist i figuren under, har en etter-blander for ytterligere blanding av komponentene. Disse kan være utformet på forskjellige måter, men har samme hensikt. I figur 1 ser vi en «peanøtt etter-blander».

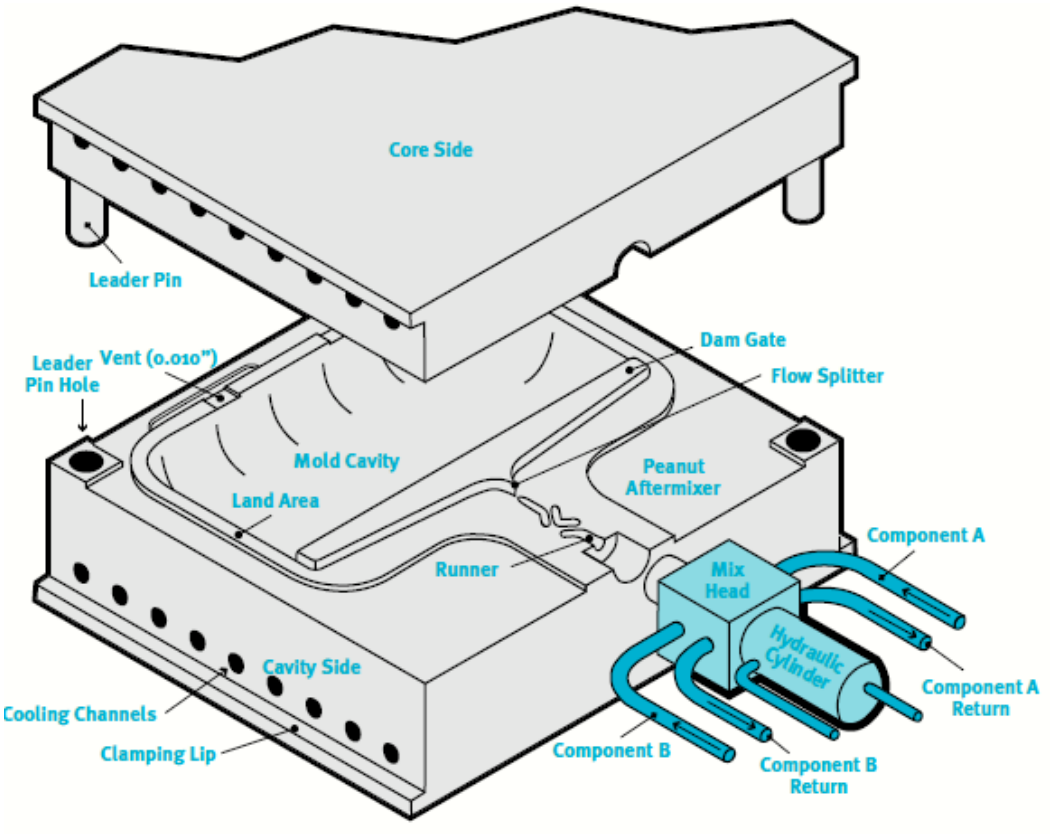
Blandehodets oppgave er å blande de forskjellige komponentene tilstrekkelig godt, for og sørge for en konsistent blanding som herder skikkelig. Dette gjøres ved å blande komponentene under høytrykk (10 – 20 MPa) og sender deretter blandingen inn i etter-blander. Ublandet overskytende materiale returneres i systemet.

Krymp. Alle PUR og PIR materialer har en tendens til å krympe noe etter støp og herding (se tabell 4). Det er derfor ofte nødvendig å modellere formen noe overdimensjonert for å kompensere for dette.

Overflate glatthet. RIM polyuretan kan gjenskape selv de fineste detaljer i formen, er det essensielt viktig å sørge for glatte og jevne overflater i formen. Dette innebærer ofte etterbehandling av formen etter produksjon.

Materiale. Ettersom RIM innebærer utvikling av en del varme når materialene blandes og reagerer med hverandre, bør et varmeledende materiale velges som formmateriale.

Mer om RIM prosessen kommer i kapittel 3.5.



Figur 1: Prinsippskisse RIM mold (Covestro LLC, 2015).

3.1.2 Fra CAD modell til printerspråk

Stereolithography (STL)

Etter fullført CAD-modellering i SW må filen konverteres til en filtype som kan leses i slicerprogrammet. STL filer benyttes vanligvis til dette formålet. STL filformatet beskriver kun overflategeometrien, uten fyll, farge eller tekstur. Filen kan genereres ved å lagre SW filen som STL, og ofte kan det velges oppløsning og kvalitet. Dette kan ha betydning for sluttresultatet ved printing. Grunnen for dette er at ved generering av overflategeometrien vil modellen bygges opp av flere små flater, og jo høyere oppløsning STL filen har jo flere flater med mindre dimensjon vil genereres. Ved avrundede overflater vil det være ønskelig at overflaten ser så rund ut som mulig, men ved lav oppløsning vil overflaten se kantete ut. Kan også sees på som et nett av flater hvor rutene blir mindre ved økning av oppløsningen (Chakravorty , 2019).

G-koder

Når STL filen er generert med ønsket oppløsning importeres filen inn i slicerprogrammet. Her velges alle variabler som påvirker og har betydning for printingen. Først og fremst må type printer og byggevolum defineres (første gang). Deretter må materialet og lagtykkelse velges. I de fleste slicere vil dette være tilstrekkelig, siden de inneholder forhåndsprogrammerte parametere for de forskjellige materialene og lagtykkelsene. Men det vil også være mulig å justere temperatur på dyse og bygge plattform. Bevegelses -og matehastigheter på x,y og z aksene og ekstruderingsmotor, samt vifteinnstillinger for kjølingen av det ekstruderte filamentet. All denne informasjonen oversettes til et printerspråk som inneholder maskin koordinater og parametere for tilleggsfunksjoner, g-koder (Pechter , 2019).

3.2 Additiv tilvirkning

Additiv tilvirkning (AT), opprinnelig kalt additive manufacturing (AM), er en relativt ny produksjonsmetode i rask vekst. Stadig flere, både i industrien og privat, får øynene opp for denne teknologien og dens bruksområder. Dette sørger for at utvikling og forbedring av produksjonsprinsippet er et etterspurt tema.

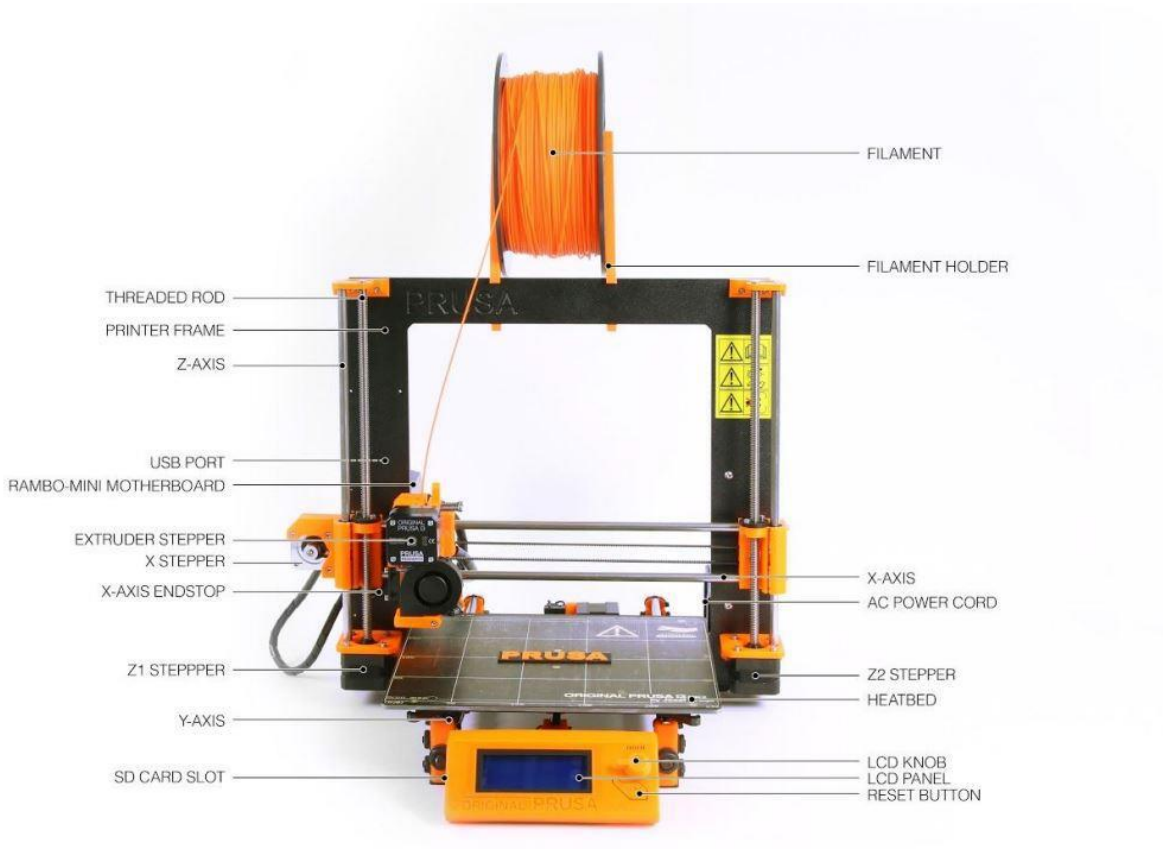
AM er kjent ved flere navn, men mest vanlig i dagligtale er tredimensjonal printing (3D-printing). Dette navnet reflekterer produksjonsmetoden på en god måte siden AM lagvis bygger opp tredimensjonale objekter i forskjellige materialer ut fra en CAD-modell. Lagvis oppbygning av objekter betyr dessuten at svært lite materiale går til spille, sammenliknet med subtraktive tilvirkningsmetoder som fresing og dreiing.

Kombinasjonen av AM og CAD design gjør at mulighetene og bruksområdene, teoretisk sett, nærmest er ubegrensede, men noen faktorer trekker allikevel ned.

Metoden er tidkrevende i forhold til mer anvendte produksjonsmetoder i en produksjonslinje som eksempelvis sprøytestøping. Materialvalg er også en begrensende faktor, siden ikke alle materialer kan benyttes til AM. Grunnet disse begrensningene benyttes AM hovedsakelig til prototyper og enkeltproduksjon av mer komplekse deler (Bandyopadhyay & Bose, 2016).

3.3 FDM maskin: Original Prusa i3 MK2

Prusa i3 MK2 (figur 2) er en fused deposition model (FDM) maskin. maskinen benytter termoplast filament som drives (ekstruderes) gjennom en oppvarmet dyse og legger dette lagvis på byggeplattformen. Når plasten presses mot den varme dysen, mykner plasten for lettere å ekstruderes gjennom den mindre åpningen av dysen. Siden plasten ekstruderes i semismeltet tilstand, for deretter å kjøles ned når det er korrekt plassert, sørger dette for at lagene «limes» sammen og skaper solide bånd. Modellene som printes må ha vedheft til byggeplattformen og sitte godt under hele printeprosessen. Dette gjøres ofte ved oppvarming av byggeplattformen slik at materiale som skal festes holder seg litt myk og klissete mens maskinen jobber. Maskinen fungerer slik at hvert lag legges todimensjonalt i x-y planet, men ved å legge flere lag oppå hverandre i z planet får man til slutt en tredimensjonal modell (Hötter & Gebhardt, 2016).



Figur 2: Prusa i3 MK2S komponentforklaring (Prusa, 2018).

Prusa printeren som benyttes i denne oppgaven har en byggevolum på 25x21x20 [cm] (10,500 cm^3 / 10,5L).

Den benytter en Ø 0,4 mm messingdyse (nozzle) og kan ekstrudere materialer som Acrylonitrile butadiene styrene (ABS), Polylactic acid (PLA) og Polyethylene terephthalate (PET) for å nevne noen. Materialene som skal benyttes må være i filament form på Ø1,75 mm og mates gjennom dysen via et direct drive extruder system, som gir svært god nøyaktighet. Bygge-plattformen (heatbed) kan oppvarmes inntil 110°C og har i tillegg automatisk nivå regulering mot bygge-plattformen, som gjør oppsett og kalibrering svært enkelt. Bygge-plattform er bevegelig i Y retning og dysen beveges i X og Z retning. Maskinen kontrolleres fra LCD displayet som gir god oversikt, på lettfattelig språk (Prusa, 2018).

Maskinen er av enkelt design, er robust og relativt billig i innkjøp, samt enkel i bruk. NTNU Gjøvik har kjøpt inn flere 3D printere av denne typen som kan disponeres av studentene, dette gjør printeren er et åpenbart valgalternativ for denne oppgaven.

3.3.1 Forberedelse av printeren

Forberedelse av printeren begynner med oppvarming og rengjøring av dyse og bygge plattform. Her må det velges materialet som printeren skal benytte for å varme opp til riktig temperatur. Deretter mates filamentet gjennom ekstruderen frem til strengen som ekstruderes har jevn farge og tykkelse. Under innmating av filament er det viktig å treffe kanalen filamentet skal inn i, derfor er det vanlig praksis å klippe filamentenden til en spiss i 45° vinkel. Når filamentet er ferdig matet bør en first layer calibration (første lags kalibrering) gjennomføres. Dette for å sørge for riktig avstand til bygge plattformen, samt at filamentet som ekstruderes har god nok heft til bygge plattformen. Måten dette gjøres på Prusa i3 MK2 er at maskinen er forhåndsprogrammert til å ekstrudere en streng av filament i et mønster over store deler av bygge plattformen. Under printingen av dette mønsteret kan avstanden mellom dyse og bygge plattform (z akse) justeres. Samtidig bør man kontrollere strengens heft til bygge plattformen. Det er viktig at strengen som legges ned er litt flat og klemt ned mot bygge plattformen, slik at man sørger for god heft. Samtidig er må den ikke være så flat at den er gjennomsiktig eller ikke henger sammen. Da er dysen for lav og man vil få problemer med kvaliteten på printen. Denne kalibreringen kan gjennomføres flere ganger til ønsket resultat (Chvalina, u.å.).

3.3.2 Klart for printing av modell

Hvis resten av stegene er gjennomført med tilfredsstillende resultater, er det nå klart for å printe modellen. Vanligvis lastes G-kode filen opp på et SD- kort som plasseres i maskinens kortleser, men det er også mulig å koble sammen PC og printer via en kabel. Maskinen vil først gjennomgå en automatisk kalibrering av avstand til bygge plattformen ved hjelp av nivåsensoren som undersøker ni forskjellige punkter på bygge plattformen (Prusa, 2018). Når denne kalibreringen er overstått ekstruderer dysen ned en streng i enden av bygge plattformen for å rense dysen for urenheter og å sørge for at filamentet er matet helt ut til dysespissen. Deretter begynner maskinen å printe første lag av modellen. Det kan, dersom første lag har relativt liten kontaktflate i forhold til resten av modellen, være hensiktsmessig at modellen benytter brim for økt kontaktflate.

3.3.3 Materialer

Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) er et vanlig og billig materiale som ofte brukes til filament på FDM printere. ABS er en termoplast med høy slagstyrke, gode mekaniske egenskaper, god isolator mot elektrisitet og er motstandsdyktig mot temperaturer opp mot 85°C (se tabell 2). Av denne grunn brukes ABS til en rekke forskjellige komponenter som eksempelvis LEGO, PC tastatur, håndverktøy og mye mer. Den mest anvendte produksjonsmetoden for ABS er sprøytestøping. Dette grunnet lav smeltetemperatur og lite krymp ved avkjøling (se tabell 2), sammenliknet med andre materialer med tilsvarende egenskaper. I smeltet tilstand kan ABS avgi en ubehagelig lukt, men er ikke kjent for å være giftig på noen måte (Rogers, 2019).

Innen 3D printing er ABS kjent som et noe krevende materiale å arbeide med, siden det krever god vedheft til bygge plattformen, en kalibrert og nøye justert FDM printer. Samtidig bør ABS hovedsakelig ekstruderes uten kjøling, og helst i et lukket kammer for høyere temperatur og mindre påvirkning av vindtrekk. Dette kan være spesielt krevende på små modeller, ettersom forrige plastlag ofte ikke har rukket å stivne tilstrekkelig innen det neste legges.

Tabell 2: Generelle egenskaper for ABS (Campo, 2006).

General Properties of ABS	
Specific gravity	1.05
Tensile modulus at 23°C (Mpsi)	0.30
Tensile strength at yield (Kpsi)	5.00
Notch Izod impact at 23°C (ft-lb/in)	2.50 - 12.0
Thermal limits Service temperature (°C)	75.0 - 85.0
Shrinkage (%)	0.4 - 0.7
T_g (°C)	85.0 - 115.6
Vicat point (°C)	114.00
Process temperature (°C)	210.0 - 270.0
Mold temperature (°C)	50.0 - 80.0
Drying temperature (°C)	80.0 - 85.0
Drying time (h)	2.0 - 4.0

En av de største fordelene med bruk av ABS ved 3D printing, for utenom bedre mekaniske og termiske egenskaper enn mange andre plastfilament, er muligheten for etterbehandling. En relativt utbredt etterbehandlingsmetode for ABS er acetonglatting (vapor smoothing).

Metoden går ut på å plassere en 3D printet modell av ABS i et kammer med aceton damp, for en gitt tidsperiode, som sørger for å smelte den grove strukturen som etterlates av FDM printeren. Dette vil i praksis si at de ytre lagene i den 3D printede modellen smelter sammen og skaper en jevn og glatt overflate. Dette gir ikke bare en bedre finish, men også bedre mekaniske egenskaper sammenlignet med ubehandlede modeller printet i ABS (Zhang, et al., 2017).

3.3.4 Etterbehandling

De vanligste etterbehandlingsalternativene for grov overflatestruktur er sliping og polering, overflatebehandling med eksempelvis lakk eller glass-/sandblåsing med varierende middel. Felles for disse etterbehandlingsmetodene er at de kan være tid- og arbeidskrevende. Et annet alternativ er kjemisk etterbehandling. Dette passer kun for enkelte materialer, men krever til gjengjeld lite bemannet arbeidstid.

Aceton er et kjemisk middel som reagerer med ABS plast. Aceton er et fargeløst løsemiddel i væskeform som ofte brukes ved fremstilling av polymer. Grunnen for dette er at man kan endre viskositeten til enkelte typer plast ved å iblande aceton.

I det daglige forekommer aceton som hovedingrediens i de fleste neglelakkfjernere og naturlig i menneskekroppen som et biprodukt av metabolismen. Aceton er svært brannfarlig og kan være giftig ved inntak, men er allikevel regnet som en lav risiko kjemikalie (ChemicalSafetyFacts, 2019).

I denne oppgaven benyttes dampen/gassen aceton avgir til å smelte/glatte/jevne de ytre overflatene til en modell printet i ABS. Dette skjer fordi aceton har egenskapen til å løse opp ABS plast. Så dersom modellen ble senket i et acetonbad ville modellen relativt hurtig blitt totalt oppløst. Ved å istedenfor kun benytte acetondampen kan man i større grad kontrollere nedbrytningen av ABS og begrense denne til kun jevning/glatting av de ytre overflatene. Aceton har kokepunkt ved 56°C og kan også oppvarmes for å skape mer damp. Ved å øke temperaturen og dermed dampproduksjonen til væsken vil etterbehandlingen skje raskere enn ved vanlig romtemperatur (Chaudhari, et al., 2017).

3.4 SLA maskin: Formlabs, Form 2

Form 2 fra Formlabs er en Stereolithography Apparatus (SLA) 3d-printer (additive3d.com, 2016). SLA er en additiv produksjonsmetode som skiller seg veldig fra de mer utbredte FDM printerne. I motsetning til FDM printerne, bruker denne metoden en lyskilde (laser) for å selektivt herde allerede flytende materiale (resin) til fast form (Varotsis, u.å.). Denne prosessen kalles foto polymerisering, og vil på lik linje med andre 3d-printing metoder bygge opp en modell lag for lag (Varotsis, u.å.).

Selve print jobben kan være betydelig enklere å utføre enn i FDM maskiner. Ettersom denne metoden ikke trenger at materialet først smeltes for så å kjøles ned igjen, slipper man velkjente utfordringer som layershift, stringing, warping og dårlig heft mellom modell og bygge plattform. Til SLA printeren brukes det 1 liters resin patroner som er spesielt formet for å passe inn i Formlabs' sine printere.

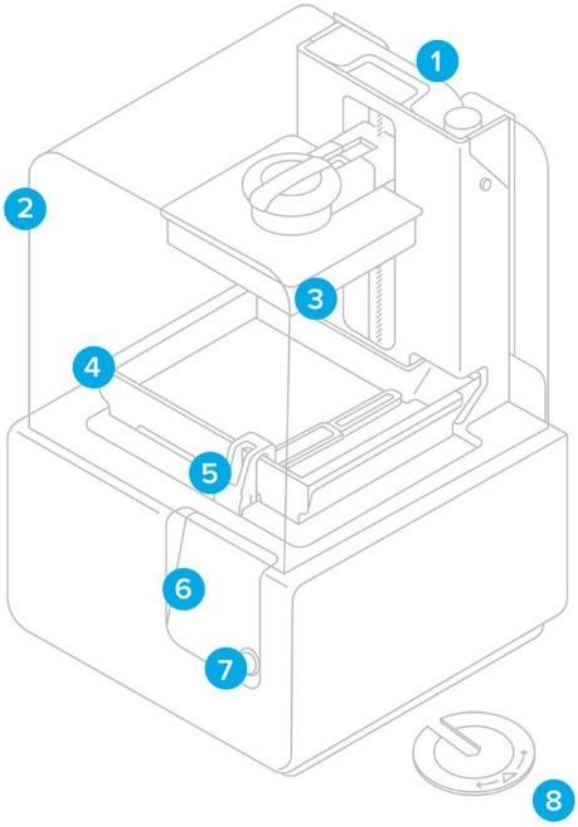
Tekniske spesifikasjoner Form 2:

Teknologi: Stereolithography (SLA)
XY oppløsning: Ikke tilgjengelig (n/a)
Laser punkt størrelse: 140 mikrometer
Effekt: En stk 250 mW laser
Bygge volum: 14.5 cm × 14.5 cm × 17.5 cm (3,680 cm^3 / 3,68L)
Lag tykkelse: 25 – 300 mikrometer
(Formlabs, u.å.a).

3.4.1 Hoved komponenter og bruk

1. **Resin patron**
2. **Deksel / omslag**
3. **Bygge plattform**
4. **Resin beholder**
5. **Visker**
6. **Berøringsskjerm**
7. **Knapp**
8. **Verktøy for oppretting**

(Formlabs, 2018a)



Figur 3: Form 2 - Hoved komponenter (Formlabs, 2018a).

Prosessen for å printe med disse starter med Formlabs egne programvare PreForm, som prinsipielt ligner på slicere til FDM maskiner. Før man laster inn print filen over til printeren vil programmet simulere print jobben og avdekke eventuelle feil innstillinger og andre utfordringer som kan oppstå. Mer om disse litt lengre ned. Når programvaren gir beskjed om at modellen er printbar kan man laste over print filen til printeren fra pc via en datakabel. Etter opplasting vil printeren vise en enkel oppstarts rutine. Det er viktig å åpne en luke i resin patronen (1) under print for å unngå dannelse av trykk i patronen. Eventuelle plast rester og annet avfall må forsøke fjernes fra resin beholderen (4). En uren beholder kan enkelt ødelegge printen underveis. Bygge plattformen (3) er avtagbar noe som gjør det enklere å løsne ferdige print og rengjøre plattformen etter bruk. Denne festes så enkelt til printeren ved hjelp av et håndtak som låser inn bygge plattformen i riktig posisjon. Før denne settes inn er det kritisk at plattformen er godt rengjort og at flaten ikke har skader, spesielt på områdene hvor produktet printes. Når print filen er ferdig lastet opp og oppstarts rutiner er utført kan man trykke på «print» for å starte printeprosessen.

Plattformen senkes ned i resin beholderen, slik at omtrent halve høyden er under resin overflaten, og det første laget til modellen blir lagt ved at laseren selektivt herder det flytende resinet til fast materiale. Etter hvert lag vil en visker (5) føres frem og tilbake i resin beholderen. Dette er for å skyve eventuelle avfall vekk fra printeområdet og samtidig røre i resinet. Bygge plattformen vil løftes etter hvert lag og gjenta samme prosess til modellen er ferdig printet. Bygge plattformen kan så enkelt tas ut fra printeren slik at modellen kan frigjøres enklere fra plattformen.

Det anslås at en resin beholder må byttes ut for hver brukt liter med resin, som gjør denne til en forbruksvare. Betydelige kostnader kan derfor medføre, hvis denne slites mer enn nødvendig. Det er derfor viktig at modellen printes i vinkel og oppå en «raft». Det er for å unngå at laseren skal brenne for mye på konsentrerte områder og skygge resin-karet som vil påvirke kvaliteten på senere print. I PreForm kan man enkelt velge å legge til raft, støttestrukturer og samtidige vri modellen til en tilfredsstillende vinkel. Vinkelen som modellen må printes i er ikke bare for å unngå unødvendig slitasje på resin beholderen, men også får å unngå «cups». Dette er lommer i modellen som kan skape en sugeeffekt mellom lommene i modellen og resin beholderen, som kan medføre at modellen løsner fra bygge plattformen. Om en modell står i slik vinkel at hull, radier og andre geometrier fanges opp som cups i PreForm vil programmet gi en beskjed om dette i sin simulering av print jobben.

3.4.2 Materialer

Materialene til bruk av SLA maskiner er forskjellige typer resin av methacrylate photopolymers (Formlabs, 2018b). Materialene til støpeformene som ble produsert i SLA printeren Form 2, printes med Formlabs sine egne resin materialer. Resin kommer i flere kvaliteter og egenskaper. Grey (standard resin) er et materiale som gir høy oppløsning med svært nøyaktige detaljer og særdeles glatt overflate, og er godt egnet for prototyper og modellering (Formlabs, u.å.b) Rigid (engineering resin) ble brukt som et alternativ til Grey på grunn av tilgjengelighet. Dette er et materiale spesielt egnet for mekaniske komponenter (Formlabs, u.å.c), men forskjellene i materialegenskapene fra Grey og Rigid, på godt og vondt, har liten betydning for våre undersøkelser. Disse materialene ble valgt med særlig hensyn på å slippe etterarbeid av støpeformen etter utprint.

Grey (standard resin):

Tabell 3: Grey materialegenskaper (Formlabs, 2017).

	Etterbehandling	
	Ingen	Etter-herdet
Strekkfasthet		
Ultimate tensile strength (UTS)	38 MPa	65 MPa
Tensile Modulus	1.6 GPa	2.8 GPa
Elongation	12 %	6.20 %
Temperatur egenskaper		
Heat Deflection Temp. @ 1.82 MPa	42.7 °C	58.4 °C
Heat Deflection Temp. @ 0.46 MPa	49.7 °C	73.1 °C

Rigid (Engineer resin):

Tabell 4: Rigid materialegenskaper (Formlabs, 2018c).

	Etterbehandling	
	Ingen	Etter-herdet
Strekkfasthet		
Ultimate tensile strength (UTS)	40 MPa	75 MPa
Tensile Modulus	2.2 GPa	4.1 GPa
Elongation	13.30 %	5.60 %
Temperatur egenskaper		
Heat Deflection Temp. @ 1.8 MPa	-	74 °C
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	-	88 °C

3.4.3 Etterbehandling

Etter utprint er det viktig at modellen vaskes i isopropanol, for å fjerne resin rester og annen forurensning. Etter dette kan modellen herdes. Resin trenger å herdes i UV lys for å kunne oppnå oppgitte materialegenskaper. For Grey er det ikke nødvendig med etter-herding ifølge Formlabs (Formlabs, u.å.b). For Rigid er dette en nødvendig prosess. Egen vaske- og herdestasjon kan kjøpes som tilleggsutstyr fra Formlabs. I disse vil hver av prosessene ta ca 20-30 minutter. Disse maskinene er ikke en nødvendighet da vask i Isopropanol kan vaskes manuelt i egne kar, og naturlig UV fra Sola vil herde modellene. Det anbefales allikevel å anskaffe disse maskinene for å kraftig redusere etterbehandlingstiden samt mannetimer brukt for å gjennomføre prosessene.

3.5 Støpe prosessen

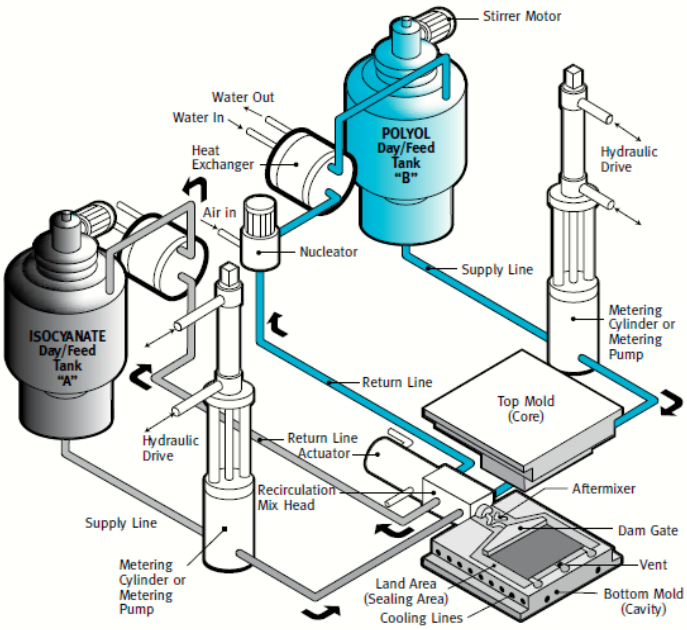
En støpe prosess innebærer at et materiale fylles i en form og gjenskaper detaljene formen har. Det finnes en rekke forskjellige støpe prosesser og metoder som alle har sine fordeler og ulemper. Støpeformene produsert ved 3D printing vil ha begrensede termiske og mekaniske egenskaper sammenliknet med tradisjonelle former produsert i metall. Vanlig sprøytestøping med termoplast vil, grunnet høy temperatur og trykk, ikke være en aktuell metode. For denne oppgaven er det dermed kun aktuelt å se på herdeplast-/ to-komponentstøping i plast. Nærmere bestem reaction injektion molding.

3.5.1 Støpemetode

I reaction injection molding (RIM) prosessen sprøytes, i likhet med TP sprøytestøping, flytende plast inn i en form. Forskjellen er at ved tradisjonell TP sprøytestøping, vil plasten ha en relativt høy temperatur ved innsprøytning. Etter innsprøytning vil avkjøling begynne og plasten i formen blir gradvis kjøligere frem til fast tilstand og utstøtning.

Ved RIM prosessen vil plastkjemikaliene være avkjølt og blandes ved støping. Blandingen av de forskjellige komponentene skaper deretter kjemiske reaksjoner som sørger for at materialet ekspanderes, tykner og herder inne i formen (RIM Manufacturing, 2019).

I RIM prosessen (se figur 4) blandes to eller flere komponenter i flytende tilstand gjennom et blandehode (mixing head). Komponentene består ofte av isocyanater og polymer, som lagres i separate tanker og transporteres i separate kanaler frem til blandehodet. De separate væskene pumpes inn i blandehodet med relativt høyt trykk (1500 – 3000 psi) for å sørge for en jevn og god blanding gjennom blandehodet.



Figur 4: Prinsippskisse RIM maskin (Covestro LLC, 2015).

Videre sprøytes blandingen, via en etter-blander for ytterligere blanding, inn i en ofte forvarmet form med et lavere trykk (50 – 150 psi) frem til formen er tilstrekkelig fylt. Blandingen holdes i formen til materialet har herdet til fast tilstand og kan støtes ut av formen (Rosato, et al., 2012).

RIM prosessen innebærer lavere formtrykk og temperatur enn TP sprøytestøping, noe som gir større sannsynlighet for vellykkede resultater ved bruk av 3D printede former.

3.5.2 Støpemateriale

Polyuretan (PUR) er en kjemisk fremstilt herdeplast ofte formet ved RIM prosess. Herdeplast er en polymer som ofte fremstilles ved at to eller flere flytende kjemikalier sammenblandes. Dette skaper kjemiske reaksjoner og temperatur som gjør at blandingen herder og oppnår fast tilstand. Når fast tilstand er oppnådd kan den ikke lenger endres slik termoplast kan. Dette er derfor en ikke reversibel prosess og er grunnen til at herdeplast må blandes i formen den skal formes etter. Fordelen med herdeplast er gode mekaniske og termiske egenskaper, slitasjestyrke og motstandsdyktighet mot vær og vind (Campo, 2006).

PUR tilhører co-polymer gruppen med lukkede celler. Bruksområdet for PUR er svært omfattende grunnet store variasjoner av fremstilling og egenskaper. Molekylvekten i PUR spiller en vesentlig rolle for fleksibiliteten og de termiske egenskapene til produktet. Elastisk PUR har eksempelvis høyere molekylvekt enn fastere PUR. Disse vil gjerne også ha svært forskjellige termiske egenskaper. Samtidig finnes det en rekke forskjellige tilsetningsstoffer som endrer egenskapene og utseende til sluttproduktet (Campo, 2006). Dette gjør at PUR kan ha uendelig mange mulige applikasjoner og bruksområder. Mulige fremstillinger er blant annet kompakt hardplastkonsistens, fleksibel solid gummikonsistens eller myk skumkonsistens.

Tabell 5: Generelle egenskaper for PUR herdeplast (Campo, 2006).

General Properties of Generic PUR Thermosets	
Specific gravety	1.47
Tensile modulus at 23°C (Mpsi)	1.00
Tensile strength at yield (Kpsi)	14.00
Notch Izod impact at 23°C (ft-lb/in)	2.20
Elongation at break at 23°C (%)	4.00
Heat deflection temperature (°C) at 66 psi	260.00
Heat deflection temperature (°C) at 264 psi	150.00
Thermal limits service temperature (°C)	49 - 121
Shrinkage (%)	0.30
Water absorption at 24 h (%)	0.40
Processing temperatur (°C)	232 - 260

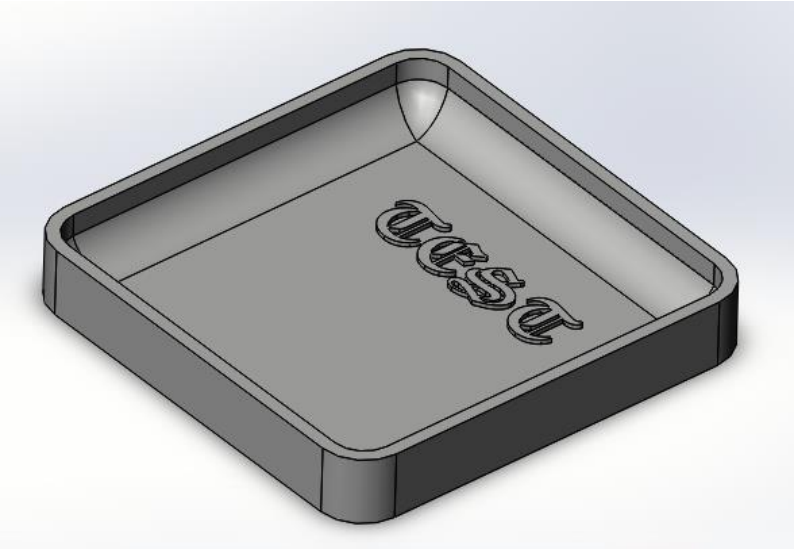
All støping i denne oppgaven utføres via Strukturplast AS på Gjøvik. Strukturplast AS har utviklet sin egen polyuretan kalt NORSelast®. Dette er et solid elastomer materiale, hvor det mest elastiske NORSelast-materialet har en bruddforlengelse på 600%. Det sterkeste har en bruddstyrke på 50 MPa (Strukturplast AS, u.å). Disse produseres i PUR og PIR (polyisocyanurate) og defineres ut ifra Shore hardhets-skalaen. NORSelast strekker seg fra 60 Shore A til 70 Shore D.

4 Egne undersøkelser

Etter innsamling og gjennomgang av teoretisk grunnlag, fant gruppen det nødvendig å foreta egne undersøkelser. Her beskrives undersøkelser og arbeid gruppen har foretatt seg, for å koble teorien opp mot realiteten. Gruppen henter på denne måten inn valide primærdata. Primært inneholder kapittelet aktiviteter som er blitt utført, men som ikke defineres som resultater.

4.1 Design og analyse av former

Design og analyser av støpeformene ble utført i SolidWorks. Gruppen har i denne oppgaven valgt eget formdesign til støpforsøkene som ble gjort. Problemstillingen går på generelle muligheter og er ikke begrenset til spesifikke produkter. Det har vært viktig for oppgaven å implementere visse geometrier og dimensjoner i designet som gjerne kommer med velkjente utfordringer ved støping. Ut over dette har det for hver av AM metodene som ble brukt, blitt laget testformer (se figur 5). Utformet som enkle begre med noen detaljer og hjørneradier. Testformene ble brukt som referanse, slik at vi kunne sammenlikne FDM og SLA på lik linje.

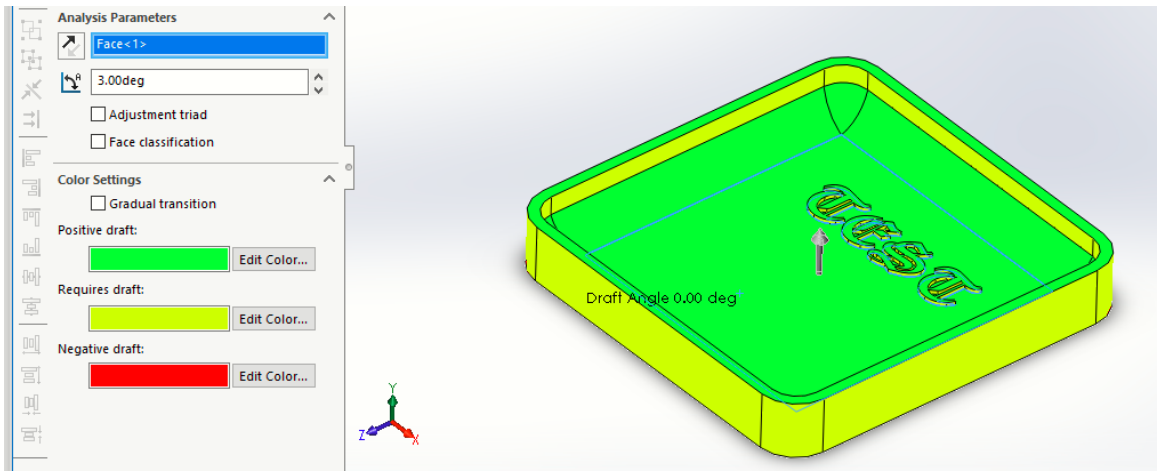


Figur 5: Ferdig designet testform i SolidWorks.

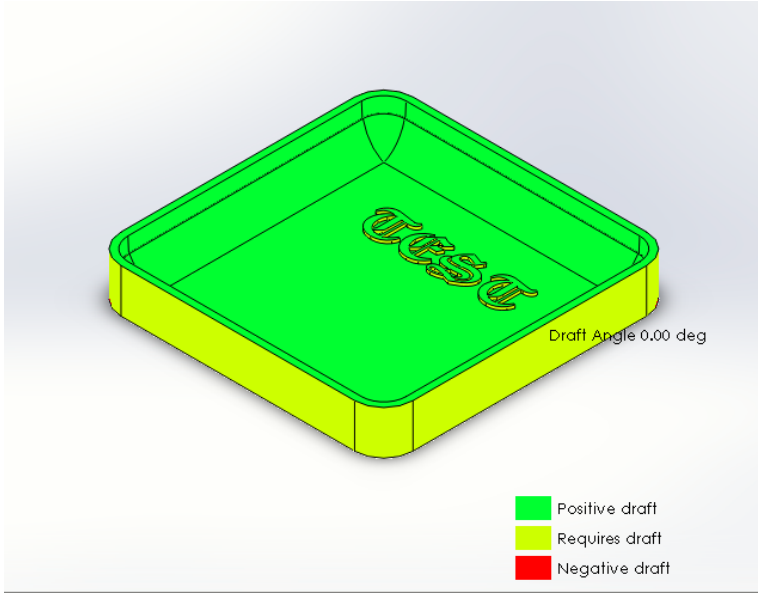
Det er flere kritiske faktorer som må være til stede for å kunne oppnå vellykkede støp. Ved å benytte et åpent formdesign elimineres en del av disse faktorene, men fortsatt gjenstår noen faktorer. Slippvinkler er kanskje den viktigste. Uten slippvinkler vil vertikale strukturer i produktet feste seg ekstra godt til formen, og kan i verstefall være umulig å løsne uten å skade produktet. Slippvinkler, kalt «draft» kan enkelt legges inn og kontrolleres ved hjelp av «Mold Tools» i SW.

I «Mold Tools» finnes verktøyet «Draft Analysis» og dette benyttes for å sikre at formen har de nødvendige slippvinkler. I analysen velges grunnflaten og retningen slippvinkelen skal ha. Samtidig velges også gradtallet slippvinklene skal være på.

Når formen ble lagt inn og de overnevnte valg ble definert, fikk formen farger (se figur 6) som ga informasjon om hvor slippvinkler måtte legges inn. Ettersom slippvinkler kun var nødvendig innvendig i formen ble de ytre veggene ignorert.



Figur 6: Testform i SolidWorks – Under slippvinkel-analyse.



Når de innvendige vertikale veggene hadde blitt tilegnet slippvinkler ble disse også grønne (se figur 7). Dette indikerte at alle vertikale vegger innvendig i formen hadde korrekte vinkler på 3° eller mer. Teksten i formen ble ikke tillagt slipvinkler grunnet lave vertikale vegger som ikke burde by på problemer.

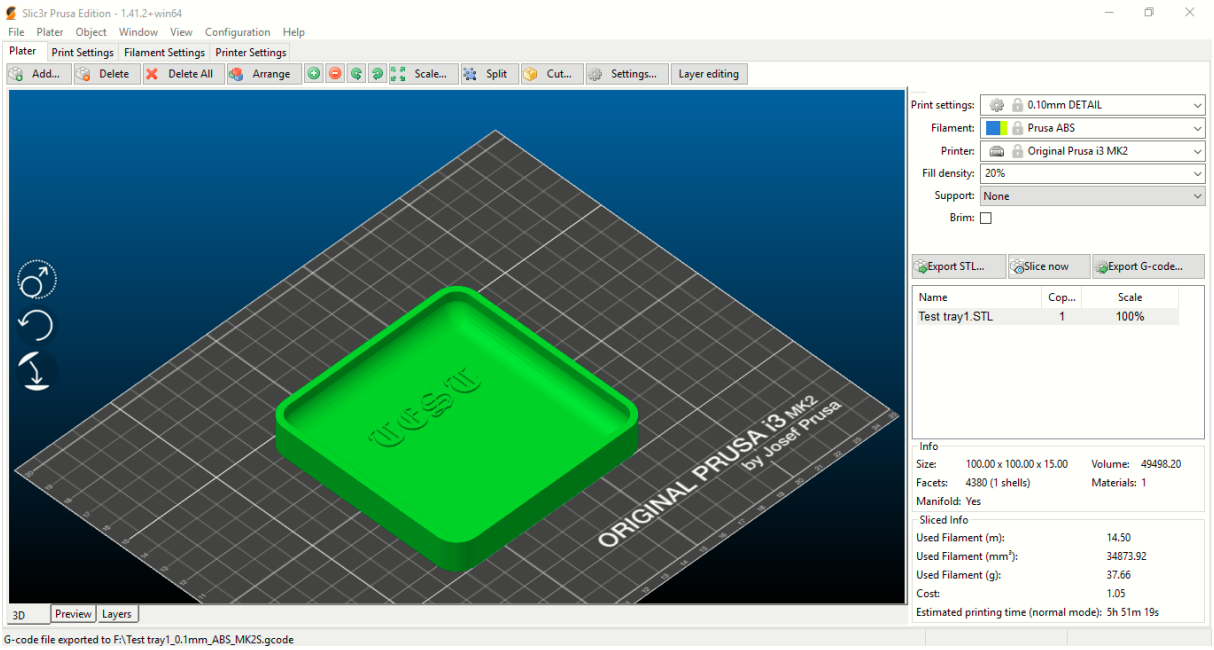
Figur 7: Testform i SolidWorks - etter slippvinkel-analyse.

4.2 Produksjonsprosessen

Additiv produksjon starter med generering av STL fil og denne må videre omgjøres til koder. Kodingen inneholder all informasjon printeren trenger for å utføre jobben. Denne informasjonen lastes så opp til printeren. Nå skal det sees nærmere på hvordan maskinenes programvare benyttes.

4.2.1 FDM

Når STL-fil er generert i SW må denne konverteres til g-koder slik at maskinen kan lese filen. Til dette formålet benyttes Prusa's egen slicer; Slic3r Prusa Edition. Her får man opp en «hurtig meny» som inneholder valgte innstillinger og informasjon på høyre siden og et grafikkfelt på venstre side. Grafikkfeltet er en kopi av bygge-plattformen til den valgte Prusa printeren. Videre velges en STL-fil som lastes opp i grafikkfeltet og organiseres etter ønsket plassering ved utprint. Fordelen er at plasseringen på bygge-plattformen blir identisk i grafikkfeltet og på den virkelige bygge-plattformen til printeren, dersom dette er av betydning. Gruppens testform plasseres sentrert på bygge-plattformen med den største flaten ned (se figur 8).



Figur 8: Testform i Slic3r PE.

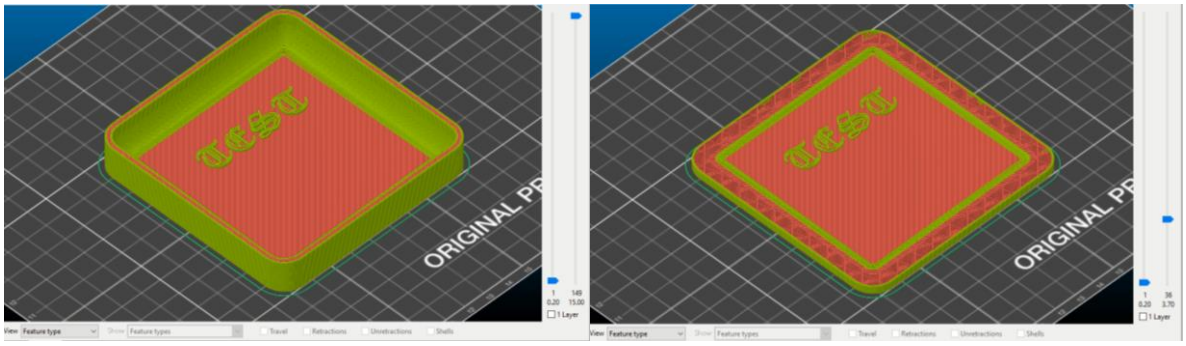
Etter å ha valgt laghøyde, materiale, type printer og modellens fyllmengde (infill) i «hurtig menyen» kan modellen Slices. Dette innebærer at modellen og de valgte parametere konverteres til g-koder. Etter modellen er konvertert får man opp estimert filamentforbruk i meter, kvadrat millimeter og gram. Her får man også oppgitt kostnad, dersom prisen per filament rull er definert på forhånd, og estimert tidsforbruk fra printstart til printslutt.

Slic3r PE har forhåndsprogrammerte parametere for alle de valgte innstillinger i «hurtig menyen» som vises til høyre i bildet over. Disse parameterne kan endres ved behov.
For denne formen var det ikke hensiktsmessig å endre noen av de forhåndsprogrammerte parameterne.

De viktigste parameterne for ABS var:

Infill	–	20% med kubisk mønster i 45° vinkel
Support	–	Ingen
Hastighet	–	50 mm/s for overflater, 60 mm/s for infill
Temperatur	–	255°C for dyse, 100°C for bygge-plattform
Kjøling	–	Ingen

Videre kan planlagt oppbygning av modellen besiktiges lag for lag (se figur 9). Programmet er ikke perfekt og kan generere feil ved lesing av STL-fil. Eksempler på dette kan være at printeren forsøker å printe i løse luften eller printer dobbelt opp på enkelte plasser. Det kan derfor være hensiktsmessig å forsikre at printjobben er korrekt planlagt. Etter at printjobben er startet på maskinen kan det også være en god ide å følge med på minimum første lag. Dette for å forsikre at minimum dette legges korrekt. Videre er det anbefalt å følge med på prosessen, da modellen kan løsne fra plattformen.

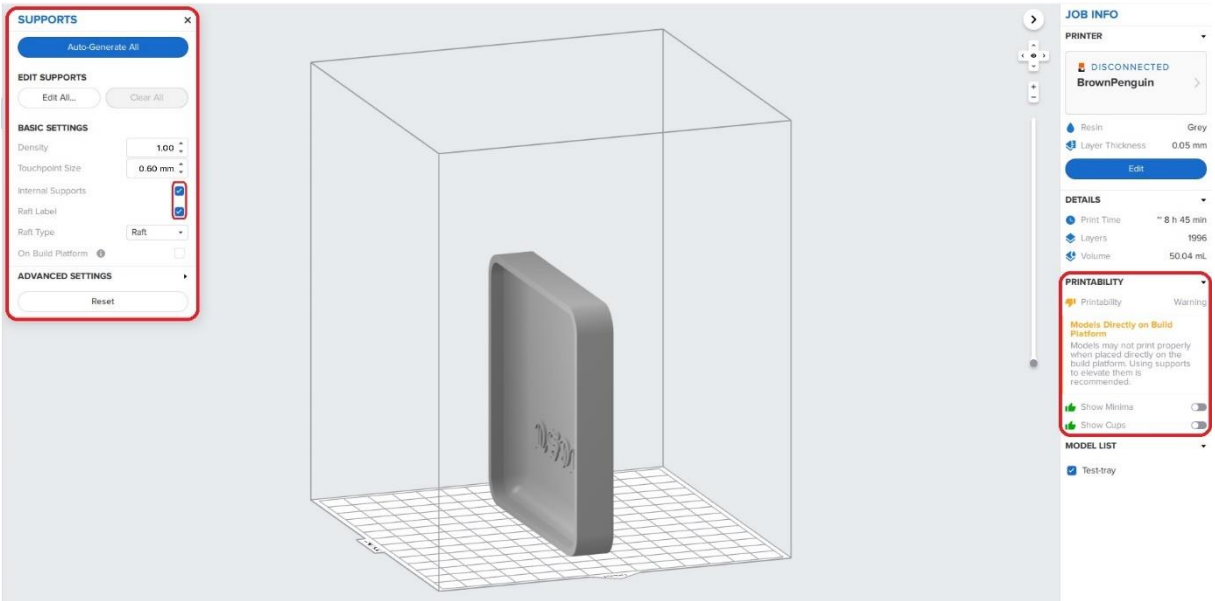


Figur 9: Testform i Slic3r PE – besiktiges lag for lag.

4.2.2 SLA

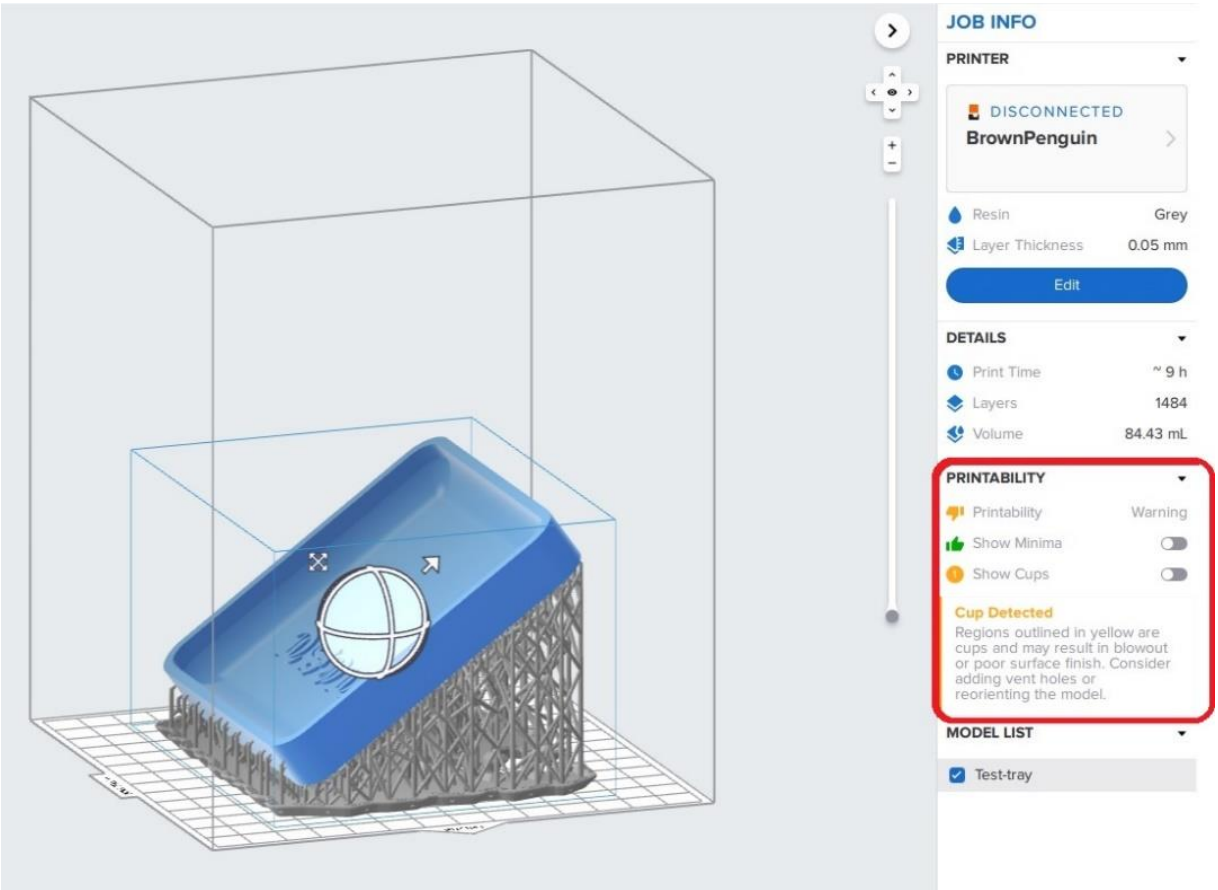
Tanken bak forsøket med SLA printer var å finne en additiv metode som kan printe støpeformer uten å måtte etterbehandle overflate og finish. Støpeformen ble lagret som STL-fil som PreForm kunne lese. Etter å ha lastet inn STL-filen i PreForm ga programmet fort beskjed om at modellen trengte egen plattform å printe modellen oppå (raft), for å unngå printing direkte på bygge plattformen.

Printbarheten får på dette stadiet en gul ned-tommel fra PreForm. Støttestrukturer og raft ble så enkelt lagt til i modellen. Dette auto genereres i PreForm sin «supports» meny.



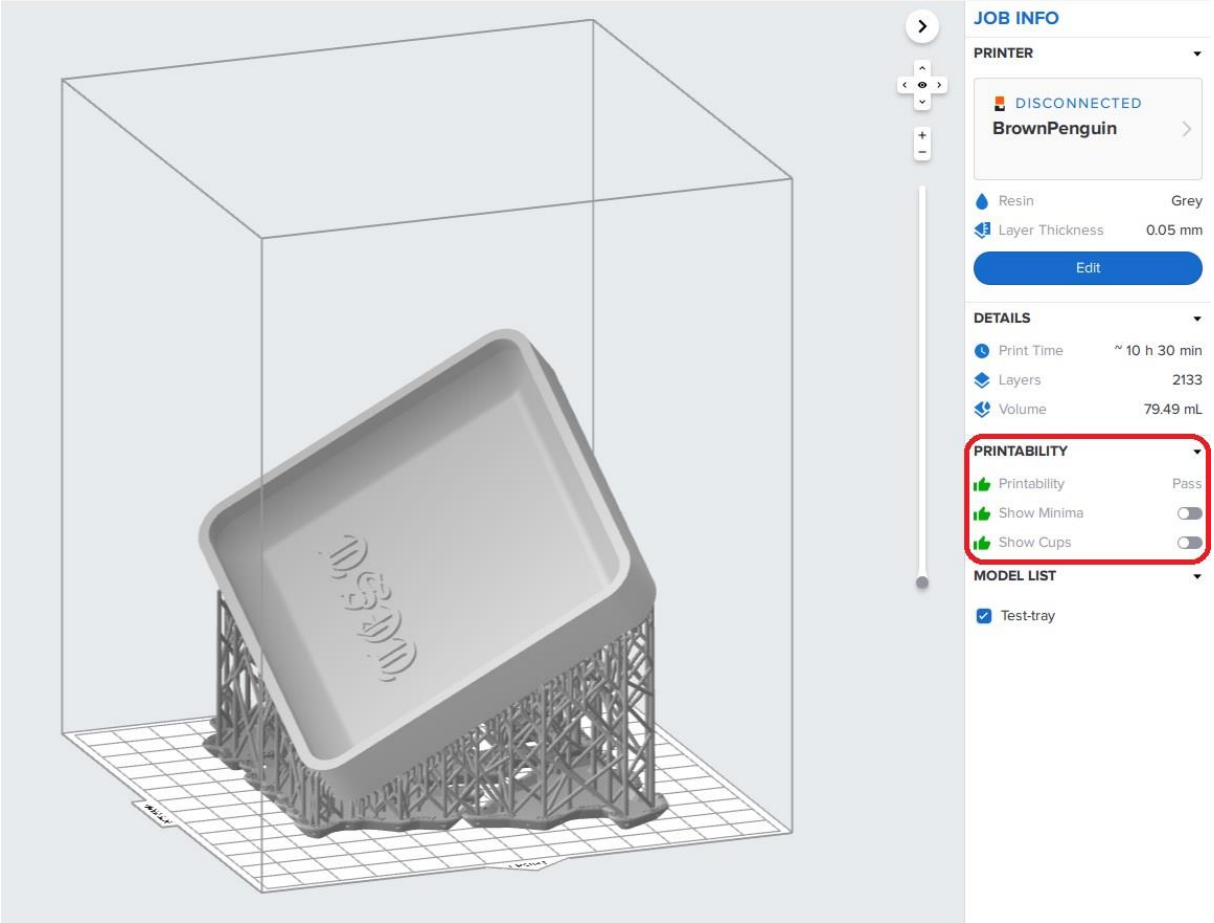
Figur 10: Testform i PreForm - rett etter innlasting av STL- fil

Som nevnt tidligere er det fordelaktig å printe modeller i SLA maskiner i en vinkel av minimum 20° for å unngå at laseren brenner på samme område hele tiden og dermed slite ut resin beholderen fortere. Om man trykker på modellen inne i PreForm kommer det opp et rotasjons hjul som lar deg fritt rotere modellen i alle grader. Modellen ble vridd i en litt tilfeldig vinkel, for så å sjekke printbarheten igjen. Erfarende operatører vil enklere kunne se hvilken vinkel modellen optimalt skal ligge i. I forsøket ble det noen justeringer frem og tilbake før PreForm godkjente printbarheten.



Figur 11: Testform i PreForm - med raft og støttestrukturer (viser rotasjons hjul)

Modellen har nå godt med støttestrukturer, raft og en tilfredsstillende vinkel med tanke på større utnyttelse av printeflaten. PreForm er derimot ikke helt fornøyd enda, og cups ble fanget opp av programvaren. Etter litt vinkling frem og tilbake fikk modellen endelig klarsignal og grønn opp-tommel fra PreForm, som forteller oss at printbareheten nå er tilfredsstillende. Det å vinkle modellen og samtidig avdekke cups før auto-generering av støttestrukturer, viste seg å være fordelaktig ettersom generering av disse strukturene tar betydelig lengre tid. I tillegg vil støtte strukturene forsvinne for hver gang modellen roteres eller endres, og dermed må man auto-generere på nytt. PreForm bruker noe tid i sine analyser og en kraftig pc anbefales ved hyppig bruk av programvaren. Selve justeringene derimot er svært enkle å utføre.



Figur 12: Testform i PreForm - tilfredsstillende PreForm innstillinger – klar for utprint

Etterfulgt av godkjent printbarhet ble filen lastet opp til Form 2 via en datakabel. Disse maskinene har godt med minne så datakabelen kan plugges ut etter opplasting. Maskinen ble så klargjort for printing. Dette innebærer grundig rengjøring av bygge plattformen, fjerning av eventuelt avfall i resin tanken og en enkel oppstarts prosedyre som Form 2 tar deg igjennom via sin berøringsskjerm. Etter denne prosedyren er nå maskinen klar for utprint. Berøringsskjermen viser tilgjengelige modeller som er lastet opp, og siste opplasting legger seg øverst i listen. Vår modell ble valgt og deretter trykte vi på «print» og maskinen startet opp.

PreForm regner ut printe tiden, som i dette tilfelle skulle ta 10 timer og 30 minutter. Noe som også stemte, og 10,5 timer senere var modellen ferdig printet.

4.3 Etterbehandling av støpeformer

Generelt krever produksjon av støpeformer en eller annen form for etterbehandling. Det finnes flere metoder som ofte er arbeidsomme og tidkrevende. Metodene som representeres her er av de minst arbeidsomme ved additiv støpeform produksjon etter våre funn.

4.3.1 FDM

ABS plast kan, som nevnt tidligere, etterbehandles med aceton ved at acetongassen bryter ned det øverste laget av overflatene til modellen. Ved utførelse av denne etterbehandlingsformen bør modellen plasseres i et lukket kammer som tåler aceton. Modellen bør aldri være i direkte kontakt med acetonvæsken, men plasseres på et stativ eller liknende slik at acetondampen kan omkranse modellen. Varigheten på behandlingen er svært temperaturavhengig og dersom behandlingen skal skje hurtig kan man benytte en ovn eller varmeplate (Chaudhari, et al., 2017). Det er viktig å merke seg at ved høye temperaturer fordamper aceton svært hurtig. Dette kan medføre redusert kontroll over nedbrytningen av modellen, samt økt brannfare.

Ved forsøkene gruppen utførte begynte overflatene til støpeformen, etter en kort periode i kontakt med acetondampen ved cirka 20°, å mykne. Ved berøring og håndtering av støpeformen ble avtrykk avsatt i overflaten. Det er derfor gunstig å kunne løfte ut stativet modellen er plassert på, for å redusere fysisk berøring av modellen til et minimum. Et stativ ble derfor fremstilt og benyttet. Etter en lengre periode begynte overflaten å se våt og glattere ut. Videre og mer utfyllende beskrivelse av gruppens forsøk med acetonbehandling kommer i kapittel 5.1.1.

4.3.2 SLA

Etter utprint i SLA maskinen så støpeformen svært bra ut, det betyr allikevel ikke at støpeformen nå er helt ferdig og klar til bruk. På lik linje med andre metoder må støttestrukturer fjernes fra modellen. I FDM printere ville man kunne velge å bruke vannoppløselig plast til støttestrukturer, slik at modellen etter print kan legges i vann til strukturene er helt løst opp. Denne løsningen for FDM maskiner krever vanligvis mer enn èn ekstruder, slik at maskinen kan mate inn hoved materiale og støtte materiale hver for seg automatisk. Dette er ikke mulig i SLA maskiner hvor man bare kan bruke en type resin til hver printjobb.

Når man ser på omfanget av støttestrukturene som blir generert av PreForm kan det virke som at denne etterbehandlingen er tidkrevende og knotete. Det stemmer ikke! PreForm genererer støttestrukturene slik at det bare er små punkter som festes til modellen, og disse løsner enkelt fra modellen. Før eller etter at støttestrukturen er fjernet trenger modellen å vaskes. Dette er for å fjerne overflødig resin, og kan bli gjort i tilhørende vaskeautomat med Isopropanol. Standard resin Grey fra Formlabs skal i utgangspunktet ikke trenge herding. En rask titt på den tekniske oversikten over materialet viser allikevel tydelig økning i styrke etter herding, dette ble derfor utført. Før modellen settes til herding er det hensiktsmessig at den tørker en liten stund til all Isopropanol har forduftet. Herdeprosessen tar 30 minutter ved 60°C i Formlabs' herdeautomat.

Etterarbeidet i SLA maskiner kan ha flere prosesser enn i andre AM-metoder. Disse prosessene derimot er enkle å utføre og krever lite bemannet tid. Hvis man velger å kjøpe tilhørende vaske- og herdeautomater vil det bare påløpe arbeidstid når man tar modellen fra den ene maskinen til den andre, og man kan la maskinene selvstendig gjøre jobben med vasking og herding. Utover dette må støttestrukturer plukkes av og eventuelt pusse over små knupper som blir igjen etter støttestrukturene, dersom dette er nødvendig. Under dette forsøket ble det bruk 10 minutter (bemannet tid) i rent etterarbeid av formene etter utprint i SLA maskinen. Dette inkluderer flytting av modellen over til vaske- og herdestasjoner, oppløsing av støttestrukturer og raft, samt opprydding etter bruk av utstyr.

4.4 Kostnader

Alle oppgitte priser tar utgangspunkt i dagens valutakurser (6. Mai 2019). Frakt og import avgifter kan tilkomme begge maskinene, da disse prisene er hentet fra produsentenes egne hjemmesider (som ikke befinner seg i Norge). Frakt og import kostnader inkluderes ikke i beregningene, da det er stor usikkerhet rundt disse kostnadene. Det samme gjelder strømforbruket til maskinene. Prusa i3 MK2S er ikke lenger for salg fra leverandør, men priseksempel for Prusa i3 MK3S benyttes istedenfor og bør være tilsvarende hva MK2S kostet ny i sin tid.

Prusa i3 MK3S koster 8100 NOK fra leverandør (Prusa Research, u.å.).

ABS fra 3dnet.no, som er NTNU's leverandør av filament, koster 199 NOK for 750 gram (3DNet, u.å.a).

Aceton fra Biltema, som er benyttet i dette prosjektet, koster 69,90 NOK per liter (Biltema, u.å.).

Formlabs' Form 2 pakke med vaske- og herdestasjon koster 44 100 NOK fra leverandør (Formlabs, u.å.d).

Formlabs Grey (standard resin) koster 1795 NOK per liter (3DNet, u.å.b).

Formlabs Rigid (engineer resin) Koster 2395 NOK per liter (3DNet, u.å.c).

ABS formene forbruker cirka 40 gram filament per produsert form. Dette utgjør en materialkostnad på cirka 11 NOK per form.

SLA formene forbruker cirka 80 milliliter resin per produsert form. Dette utgjør en kostnad på cirka 144 NOK per form i Grey og cirka 192 NOK per form i Rigid.

I prisoverslag fra Topro AS (vedlegg 3) fikk vi oppgitt at formen totalt ville komme på 6000 NOK i Aluminium (6061). Dette innebærer:

- **Materiale** 300 NOK
- **Innstilling av CNC-maskin** 1700 NOK
- **CNC-maskinering** 4000 NOK (6t, hvorav 2t er bemannet tid)

4.5 Støping hos Strukturplast AS (Gjøvik)

Teststøpene ble gjort for å kontrollere støpbarhet og varmebestandighet til formmaterialene. Materialene Strukturplast jobber med er herdeplast, hovedsakelig PIR og PUR. Felles for materialene er at de er relativt tyntflytende frem til herdeprosessen starter. Dette gir god utflytning i formen og sikrer gjenskapning av finere detaljer.

Blant alternative materialene å velge mellom, var det ønsket et materiale med høy herdetemperatur. Dette utfordrer de additivt produserte støpeformene med tanke på termiske egenskaper.

RIM maskinen (figur 13) fungerer etter prinsippet forklart i kapittel 3.5.1. Trond Stenersen forteller at i denne prosessen inngår det totalt fire komponenter, hvorav to er hovedkomponente isocyanat og polyol. De resterende komponentene er tilsetningsstoffer som gir materialet sine karakteristiske egenskaper. Maskinen har derav fire vertikale beholdere på rekke øverst på maskinen med tilhørende pumpemotorer for hver beholder. Komponentene føres separat frem til blandehodet som kan sees i fremkant av maskinen (venstre på bildet) og sprøytes ut av dysen i enden ved hjelp av pumpemotoren sett øverst til venstre på maskinen. Blandingen er forvarmet og holder 40 – 45°C ut av dysen, dette for å opprettholde en lav viskositet frem til formen er fylt. Fatet under maskinen nedenfor dysen tar opp overflødig plastblanding og søl.

Figur 13: Strukturplast AS sin RIM maskin sett i profil.

Før støpingen kan begynne kreves det en del forarbeid. Ved ankomst til Strukturplast sine lokaler på Gjøvik var RIM maskinen klargjort for PIR støping. Etter drøfting med designer og operatøren, ble det besluttet å omstille til PUR. Dette er en prosess som innebærer endring av tilsetningsstoffer, blandingsforhold og temperaturer for de respektive komponentene. Dette gjøres via maskinens kontrollpanel (figur 15). Videre følger en rense prosedyre for å sikre korrekt blandingsforhold. Etterfulgt av prøvestøp med inspeksjon av den kjemiske reaksjonen. Dette støpes direkte på et herdebord (se figur 14). Herdebordet holder en slik temperatur at herdingen skjer mest mulig kontrollert og hurtig. Støpeformene plasseres på dette bordet en stund før støp for å holde riktig temperatur under støp. Dersom inspeksjonen er tilfredsstillende, er det nå klart for støping.

Figur 14: Strukturplast AS sitt herdebord.

Figur 15: Trond Stenersen ved Strukturplast AS foran kontrollpanelet til RIM maskinen.

5 Resultater

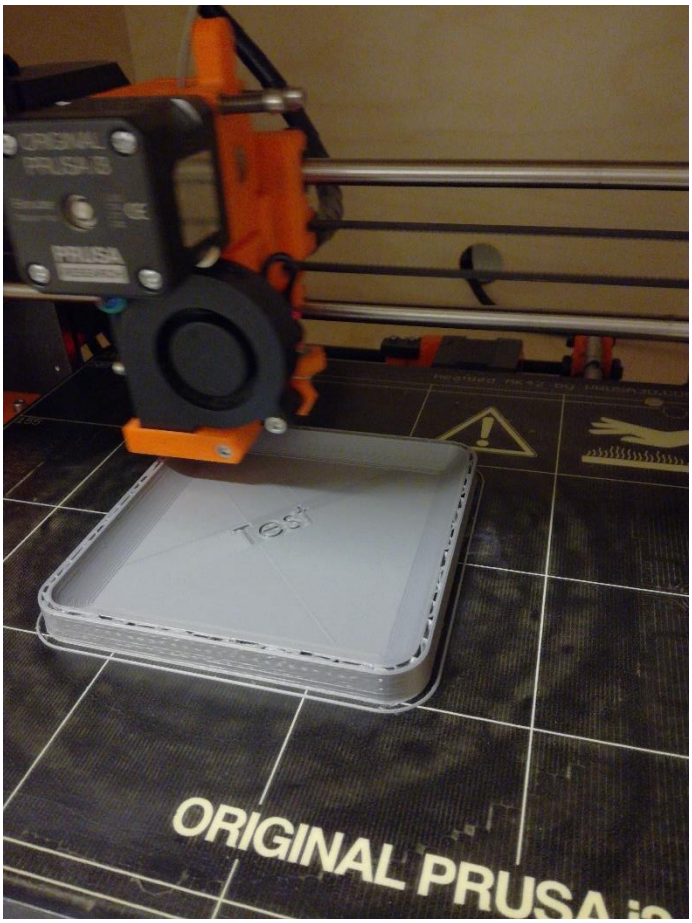
5.1 Formproduksjon

Formene, produsert ved FDM metoden, ble produsert i ABS med 20% infill i henholdsvis 0,20, 0,15, 0,10 og 0,05 mm laghøyde. Umiddelbart etter oppstart av formproduksjonen på FDM printeren oppsto det utfordringer med printingen. Materialet ABS var nytt og ukjent for gruppen å jobbe med og oppførte seg annerledes enn PLA og PET som gruppen har erfaringer med fra tidligere.

Etter å ha vasket maskinens bygge-plattform med isopropanol, matet inn ABS filamentet og gjennomgått førstelags kalibrering, ble støpeform-filen lastet opp for print. Printingen begynte tilsynelatende bra, men raskt ble det oppdaget at materialet heftet dårlig til bygge-plattformen. Om lag en time etter oppstart hadde hjørnene på modellen løftet seg fra plattformen. På dette tidspunktet var det lite hensiktsmessig å la printeren fortsette jobben, siden formen ikke holdt riktig geometri. Jobben ble derfor avsluttet og det ble foretatt vurderinger av årsaken til problematikken. Videre fortsatte gruppen med å søke etter mulige løsninger på internett. Det viste seg at slike utfordringer ikke var ukjent ved printing i ABS. Materialet krever relativt høy temperatur ved utprint og krymper noe ved avkjøling. Dette kan skape problemer siden bygge-plattformen holder 100°C, altså formen som printes holder 100°C i bunn, men langt mindre på oversiden. Oversiden av formen trekker seg derfor noe sammen mens undersiden av formen som skal ligge flatt på plattformen løfter seg. Resultatet blir at formen mister geometrien og nøyaktigheten den skulle hatt.

Løsningen på dette problemet skulle allikevel vise seg å være relativt simpel. Først og fremst ble det sikret at printeren ikke sto i vindtrekk, som ville sørget for ytterligere nedkjøling på oversiden av formen. Videre ble en tynn film med lim lagt på området av bygge-plattformen som formen skulle printes på. Limet sørget for bedre vedheft mellom bygge-plattformen og plasten som printes oppå. Dette ga gode resultater og metoden ble brukt for alle formene som ble printet i ABS.

Totalt ble det produsert syv testformer i ABS. Disse ble nummerert og merket med rekkefølgen de ble printet i, samt laghøyden, på undersiden av formene. Det ble antatt at det var nødvendig med flere forsøk før de ønskede resultatene av acetonbehandlingen ble oppnådd. Samtidig regnet gruppen med at laghøyden ville ha betydning for tiden behandlingen tok. Syv like testformer med totalt fire forskjellige laghøyder ble derfor produsert. Testform 1 ble, som den eneste, produsert i 0,20 mm laghøyde (se figur 16). Laghøyden skapte en uhensiktsmessig grov overflate og ble derfor ikke forsøkt flere ganger. Etter utprint av denne rådførte vi oss med Trond Stenersen på Strukturplast AS om mulige utfordringer vårt formdesign kunne by på. Vi ble da rådet til å endre dybden på teksten fra 1 mm til maksimalt 0,3 mm. Dette grunnet at støpmaterialet ville feste seg i smale, dype detaljer. Samtidig ble vi informert om at dersom bokstavene i teksten sto utover istedenfor, ville dette ha større sjanse for suksess. Teksten ble derfor endret til å stå opp fra formen på de resterende seks formene (se figur 17). Hensikten med teksten var å se hvor godt støpmaterialet klarte å gjenskape de finere detaljene i formen.



Figur 16 Testform 1 under produksjon på Prusa i3 MK2.

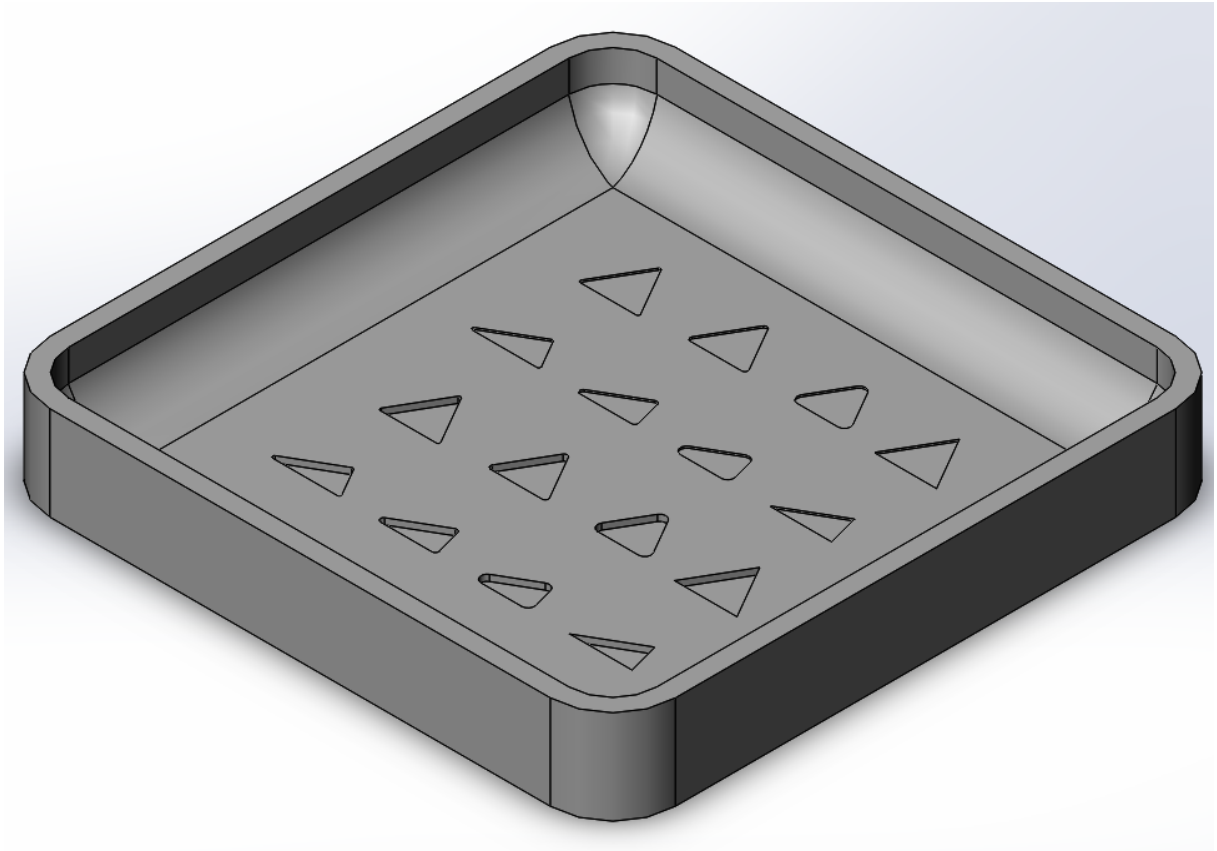
Testform 6 var den eneste formen som ble produsert i 0,05 mm. Det ble ikke gjort flere forsøk med denne laghøyden grunnet uhensiktsmessig lang utprint tid.

Figur 17 Testform 2 med nytt design.

Formene, produsert i SLA maskinen Form 2, ble produsert med 100% infill i 0,05 laghøyde. Printing ved SLA (resin) metoder tillater ikke å kunne justere infill mengden på samme måte som i FDM maskiner. Å printe ut modeller med infill geometrier innebærer lukkete «infill celle strukturer». For resin printing vil dette resultere i at ikke-herdet resin ikke får en drenerende vei ut fra disse cellene. Å kunne redusere infill mengden er ofte hensiktsmessig for å kunne redusere materialforbruket og vekt, dette kan altså være problematisk i resin baserte 3D-printere. For modeller hvor redusert infill er en viktig faktor, kan infill strukturen og dreneringskanaler manuelt modelleres inn med CAD-programvaren.

Etter godkjent printbarhet fra PreForm ble «testform 1 – SLA» opplastet til Form 2 og klargjort for utprint. Dette innebærer sjekk av ren bygge plattform, sjekk av resin tank og åpning av resinbeholderens lufteluke. Etter dette trykker man på «print» på berøringsskjermen til printeren, og prosessen er i gang. Dette er altså vår første printjobb i en SLA maskin så printingen ble observert. En stund inn i printingen ble det observert feil på modellen, og utprinten ble avbrutt. Konkret hva som gikk galt med printen er noe uklart. En enkel feilsøking ble iverksatt, og det ble etter hvert oppdaget løs-gjenstander, mest sannsynlig rest plast fra tidligere printjobber, i resin karet. Disse ble så plukket ut. Feilsøkingen antydet ingen andre problemer og printjobben ble satt på igjen. 10 timer og 47 minutter senere var «testform 1 – SLA» ferdig printet med det vi vil kalle perfekte resultater.

Etter utprint av «testform 1 – SLA» ble det besluttet å implementere visse geometrier og dimensjoner i støpeformen (Se figur 18). Tanken var å kunne vurdere detaljene på en mer vitenskapelig måte. En rekke trekanter ble senket ned i bunnen av støpeformen, henholdsvis 0.3 og 1.0 mm. Trekantene ble plassert systematisk og skilles mellom trekantenes vinkler, hjørneradier og dybde.



Figur 18: Testform 2 - SLA

«Testform 2 – SLA» ble printet ut i et annet materiale, Formlabs' rigide resin, på grunn av tilgjengelighet. Etter tidligere erfaring med «testform 1 – SLA» ble printeren grundigere sjekket for løs-gjenstander og andre urenheter. Dette ga utmerkete resultater og ferdig print kom ut på 13 timer og 33 minutter. Dette tilsvarer rundt tre timer lengre printetid enn «testform 1 – SLA» til tross for tilnærmet lik modell. Det bemerkes at Rigid er noe mer tyktflytende enn Grey, men er usikre om dette innebærer en naturlig økning i printetiden. Derimot ble det lagt merke til at posisjonsinnstilninger i PreForm har stor betydning på printetiden. Modeller i PreForm må roteres slik at printbarheten godkjennes av programvaren og like modeller kan bli stående i forskjellige posisjoner som vil gi noe utlik printetid.

Kontrollformen, produsert ved SLS metoden i EOS - maskinen, ble produsert med 100% infill i PA12. Formen ble produsert for oss av en annen Bachelorgruppe for sammenlikningsgrunnlag. Printetid, laghøyde og håndteringstid er derfor ukjent.

Tabell 6: Produksjonstidene.

Nummer	**Laghøyde [mm]**	**Printetid [min]**	**Håndteringstid [min]**	**Material kostnader [Kr]**
Testform 1	0,20	203	10	11
Testform 2	0,15	256	7	11
Testform 3	0,15	256	6	11
Testform 4	0,10	352	4	11
Testform 5	0,10	352	5	11
Testform 6	0,05	1011	4	11
Testform 7	0,15	256	4	11
Testform 1 SLA	0,05	647	7	144
Testform 2 SLA	0,05	813	6	192
Kontrollform SLS	-	-	-	-

5.1.1 Etterbehandling

Under gjennomføring av disse forsøkene ble en beholder av polypropylen benyttet, da denne er gjennomsiktig og motstandsdyktig mot acetylen. Modellene ble plassert på et stativ av stål, som også er motstandsdyktig mot acetylen, og ble behandlet en av gangen. Av sikkerhetshensyn ble avtrekk benyttet hver gang beholderen med aceton ble åpnet. Av personlig verneutstyr ble gummihansker, vernebriller og åndedrettsvern benyttet ved håndtering av forsøksmodellene.

Vesentlige dimensjoner ble målt før og etter acetonbehandling for kontroll av endring. I tillegg blir det printet referansemodeller som ikke ble behandlet med aceton. Under forsøkene ble det ikke benyttet noen ekstern varmekilde for oppvarming av acetonbadet. Forsøkene ble gjennomført ved to forskjellige romtemperaturer, først 18°C og deretter 28°C, for å undersøke betydningen av temperatur ved behandlingen.

Testform 1

«Testform 1» ble plassert i et lukket kammer med cirka 1 dl flytende aceton i bunn av kammeret (se figur 19). Temperaturen i rommet holdt 18°C og formen ble plassert på et stativ med innsiden av modellen vendt fra acetonbadet (baksiden ned).

Figur 19: Testform 1 i acetonkammeret under etterbehandling.

Etter 105 minutter i kammeret viste modellen første tegn til endringer i overflaten. Visuell inspeksjon viste en glattere overflate på undersiden og nederst på sideveggene av formen. Innsiden av formen var relativt uendret.

Etter 240 minutter i kammeret så undersiden og de ytre veggene på formen svært glatte og nærmest våte ut, men innsiden av modellen viste stadig minimale tegn til endring.

Vi innså at plasseringen av testformen, med baksiden ned mot acetonbadet, var uheldig. Kammeret som formen ble plassert i var ikke tilstrekkelig dimensjonert, slik at partiklene i acetondampen fikk vanskeligheter med å passere mellom modellen og kammerveggen. Dette ble antatt å kunne løses ved en omorganisering av formen i kammeret. Formen ble derfor nå plassert på høykant for å undersøke hvilken forskjell dette utgjorde.

55 minutter etter omorganiseringen, viste innsiden av modellen tydelige tegn til glattere struktur. Dermed var omorganiseringen vellykket, samtidig ble det avdekket at den delen av formen som var nærmest acetonbadet også smeltet hurtigere enn resten. For jevn glatting på innsiden av modellen, ble det antatt at formen måtte plasseres flatt med innsiden vendt mot acetonbadet. På denne måten ville acetondampen treffe hele innsiden av modellen likt og resultatet antas å bli jevnere.

Etter 340 minutter i kammeret ble testen avsluttet. Resultatet ble ikke som ønsket, men viste at plasseringen av modellen har mye å si for sluttproduktet. Dette måtte tas i betraktning ved neste test og innsiden av neste testmodell burde derfor vendes ned mot acetonbadet.

Testform 2

«Testform 2» ble plassert i et kammer med cirka 2 dl aceton i bunn av kammeret. Temperaturen i rommet holdt 18°C og formen ble plassert på et stativ med innsiden av modellen vendt ned mot acetonbadet.

Etter 110 minutter hadde innsiden av modellen blitt en del glattere, mens resten av modellen var relativt uendret. Den groveste strukturen i radiene var fortsatt ganske markante og trengte mer tid i kammeret.

Testen ble avsluttet etter 240 minutter. Formen ble glattere og innsiden var smeltet meget jevnt (se figur 20). Den groveste strukturen i radier og hjørner var også glattere, men ikke tilfredsstillende glatte. Resultatet ble ikke som ønsket, men var bedre enn ved første test. Forsøket viste at denne plasseringen av formen, med innsiden ned, gjorde at smeltingen av innvendige overflater skjedde meget jevnt. Testen ble likevel avsluttet på dette tidspunktet fordi acetonbehandlingen ved denne temperaturen ble for tidkrevende. Dette ble tatt i betraktning ved neste test.

Figur 20: Testform 2 etter acetonbehandling.

Testform 3

«Testform 3» ble plassert i et kammer med cirka 2 dl aceton i bunn av kammeret. Temperaturen i rommet holdt 28°C og formen ble lagt med innsiden av formen vendt ned mot acetonbadet.

Formen ble acetonbehandlet i 200 minutter før den ble tatt ut og lagt til luft tørking under avtrekk. Behandlingen ga tilsynelatende svært gode resultater ved første øyekast. Den hadde blitt tilstrekkelig glattet ut, og overflaten så svært jevnt smeltet ut (se figur 21). Ved nærmere inspeksjon ble det avdekket at visse detaljer hadde blitt redusert. Flatene hadde også fått en noe ujevn og bølgete struktur. Resultatet viste at den noe høyere temperaturen i rommet hadde stor innvirkning på tiden behandlingen tok. Det var fortsatt ønskelig å redusere behandlingstiden samt å minske behovet for smelting, da den økte smeltingen reduserte detaljnivået i formen litt for mye.

Figur 21: Testform 3 etter acetonbehandling.

Testform 4

«Testform 4» ble plassert i et kammer med cirka 2 dl aceton i bunn av kammeret. Temperaturen i rommet holdt 28°C og formen ble lagt med innsiden av formen vendt ned mot acetonbadet.

Formen ble acetonbehandlet i 135 minutter før den ble tatt ut og lagt til luft tørking under avtrekk. Formen ble tilfredsstillende jevnt glattet og så svært blank ut, samtidig som detaljene fortsatt var godt synlig (se figur 22). Resultatet viste at ved lavere laghøyde konserverte detaljene bedre, samtidig som behandlingstiden ble betraktelig redusert. Dette på bekostning av økt produksjonstid.

Figur 22: Testform 4 etter acetonbehandling.

Testform 1 og 2 i SLA

Testformene produsert i SLA ble vasket og herdet etter print. Dette anbefales alltid, men er ikke tvingende nødvendig. Vaskingen skjedde i Formlabs' tilhørende vaskestasjon i Isopropanol. Formene ble vasket i 10 minutter hver og deretter lufttørket i cirka 60 minutter. Tørkingen kan gjøres langt hurtigere med høytrykks luft og medregnes ikke som etterbehandlingstid. Støttestrukturen som ble benyttet ved utprint av formene ble fjernet etter vask. Om støttestrukturen fjernes før eller etter herding er irrelevant. Videre ble formene lagt i Formlabs' tilhørende herdestasjon i 30 minutter. I herdestasjonen ble formene utsatt for UV lys som reagerer med materialet og herder formene. Herdestasjonen bruker noe tid på oppvarming før herdeprosessen begynner. Denne tiden kan variere mye ut ifra temperaturen i rommet, men tok i vårt tilfelle cirka 15 miutter. Utover dette krevdes ingen videre etterbehandling av formene.

Øvrig

Testform 5-7 i ABS ble ikke behandlet grunnet behov for ubehandlede sammenlikningsgrunnlag for de acetonbehandlede formene.

Kontrollformen ble først sandblåst og blåst ren med høytrykks luft, fortalte gruppen som produserte formen oss. Utover dette ble halve formen lakkert i varmebestandig lakk, grunnet undersøkelser Strukturplast AS ønsket utført.

Tabell 7: Etterbehandlingstidene.

Nummer	**Temperatur [°C]**	**Behandlingstid [min]**	**Håndteringstid [min]**
Testform 1	18	340	16
Testform 2	18	240	9
Testform 3	28	200	5
Testform 4	28	120	4
Testform 1 SLA	20	55	3
Testform 2 SLA	20	55	3
Kontrollform i SLS	-	-	-

5.2 Første støpeforsøk

Støpematerialet falt på NORSelast® sitt eget solid PUR materiale med styrke på 65 shore D. Det vil si en av de sterkeste PUR materialene Strukturplast AS jobber med. Dette er også den PUR typen som oppnår den høyeste herdetemperaturen (cirka 130°C). Dette kan derfor regnes som en torturtest for de additivt produserte formene.

Først ble det forsøkt å støpe i oppvarmede former. Testform 1 og 2 i ABS ble da lagt på varmebordet, som holdt 105°C på daværende tidspunkt, og påført slippmiddel. Testform 1 reagerte på varmen, ved å blåse opp tomrommet mellom de solide lagene i formen. Testform 2 reagerte kun ved å bli noe myk. Når PUR blandingen ble tømt i formene via en kopp, gikk det noen sekunder før herdeprosessen startet. Under herdeprosessen steg temperaturen i formen til 130°C en liten stund, før den begynte å avta. Når dette pågikk oppdaget vi bobling i plasten som herdet. Dette skyldtes formen som kollapset og luftrommet i formene punkterte. Det ble derfor besluttet å fortsette testing uten forvarmet form, i en såkalt «cold casting» prosess. Utstøtningen av de støpte delene viste seg også å være noe utfordrende, trolig grunnet utilstrekkelig glatting ved acetonbehandlingen.

Figur 23 Testform 1 (øverst) og testform 2 (nederst) etter støping.

Testform 3 i ABS ble videre forsøkt støpt i, denne gangen uten forvarming av formen. Den ble lagt på en avkjølt arbeidsbenk, påført slippmiddel og PUR ble fylt i formen via en kopp. Fra utsiden av formen var det lite synlig reaksjon under herdeprosessen. Og etter cirka et minutt ble formen plassert i et herdekammer med en temperatur på mellom 50 og 80°C. Etter 10 minutter i kammeret ble formen hentet ut og delen utstøtt fra formen. Denne gangen gikk utstøtningen lettere, men igjen var formen kollapset grunnet den høye herdetemperaturen. Hjørnene og kantene til den støpte delen var meget bra, men flaten og skriften var ikke tilfredsstillende. Dette skyldes hovedsakelig at materialet mykner ved cirka 100°C og luften inne i formen også ekspanderer ved høyere temperatur. Dette gjør at formen får bobler i overflaten ved herdingen til materialet.

Figur 24 Testform 3 etter støping.

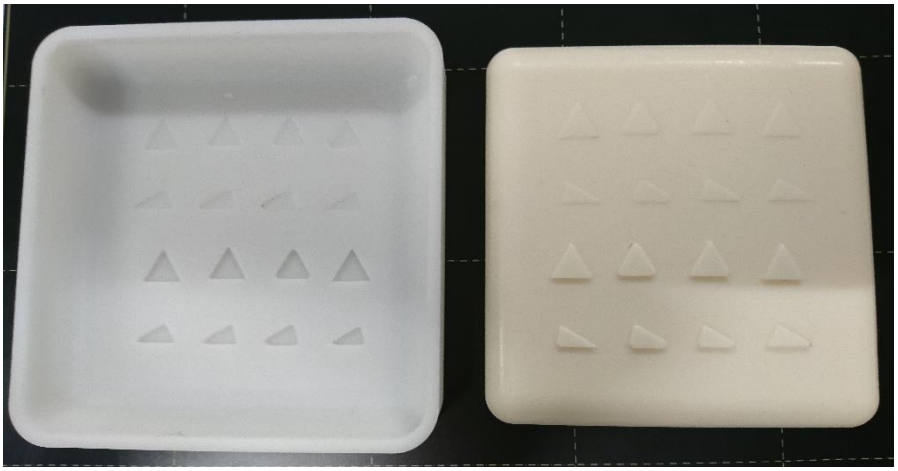
Kontrollform i PA12 (se figur 25) ble først overflatebehandlet på halve støpflaten med varmebestandig lakk fra Biltema (Grå halvdel). Videre ble den påført slippmiddel og fylt med PUR. Også denne ble fylt uten forvarming grunnet tidligere erfaringer Strukturplast hadde med dette materialet. Etter herding ble den støpte delen utstøtt, noe som viste seg litt krevende, grunnet den grove, kornete strukturen formen har innvendig. Formen hadde klart seg utmerket gjennom støpe- og herdeprosessen. Delen som ble produsert i formen hadde relativt grov overflate, men hadde beholdt detaljene meget bra. Dessuten oppdaget vi at halvdelen som var lakkert etterlot en noe bedre og jevnere overflate enn halvdelen som var ubehandlet (lakken fyller opp porer).

Figur 25 Kontrollform i PA12 etter støp.

Testformen produsert av SLA maskinen i Grey resin ble påført slippmiddel og fylt uten forvarming, overflatene var ellers ubehandlet. Etter herding ble delen utstøtt svært enkelt og formen var intakt og like fin som før (se figur 26). Den støpte delen hadde gjenskapt innsiden av formen i svært høy detalj og overflatene var upåklagelige. Formen kan uten tvil støpes i flere ganger og etterlater et meget tilfredsstillende resultat.

Figur 26 Testform i Standard Resin Grey fra Formlabs etter støp.

Testformen produsert av SLA maskinen i Rigid resin ble påført slippmiddel og fylt uten forvarming, overflatene var ellers ubehandlet. Etter støp og herding ble delen også her utstøtt svært enkelt. Formen var intakt og like fin som før støping (se figur 27). Denne formen hadde andre geometrier avtrykket inne i formen med diverse radier og dybder. Noe den støpte delen gjenskapte ned til den minste detalj. Overflatene var også her upåklagelige. Formen kan benyttes flere ganger, trolig med samme tilfredsstillende resultat.



Figur 27 Testform i Rigid Resin etter støp.

Støpforsøkene hos Strukturplast AS ga flere avdekkende resultater oppimot vår problemstilling. Det ble raskt tydelig at ABS har klare begrensninger når det kommer til varmebestandighet. Samtlige former ble deformerte og regelrett ødelagte ved støp i PUR, 65 shore D. Vi har derimot ikke avvist ABS i FDM printere som mulig additiv metode for produksjon av støpeformer. Dette grunnes særdeles lav grad av infill i disse formene.

Det ble utført ytterligere forsøk, og da med blant annet ABS form i 100% infill. Mer om disse resultatene kommer i «andre støpe forsøk».

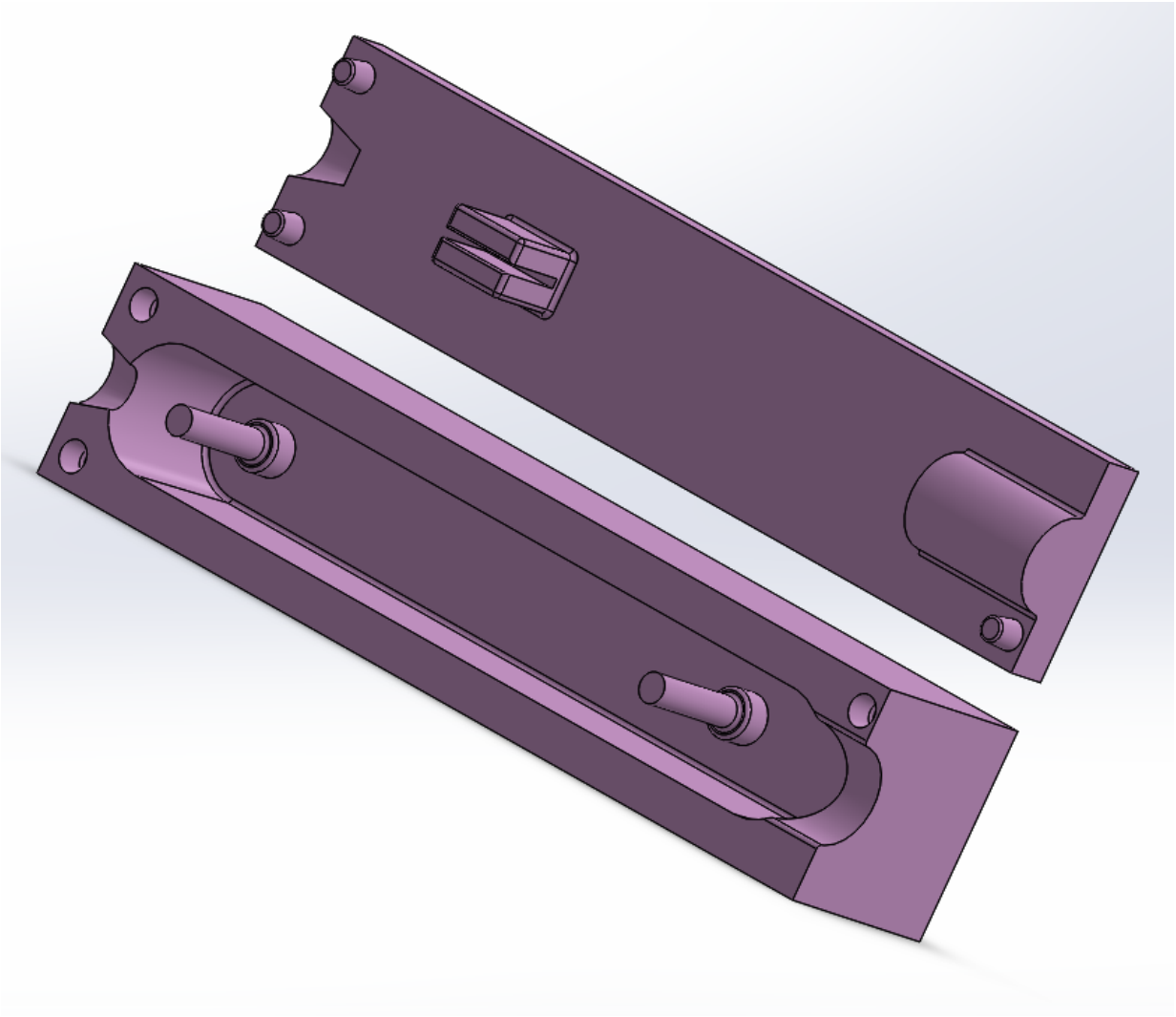
Våre mistanker om at SLA produserte former ville gi de beste resultatene ble bekreftet allerede i første støpe forsøk. Det ble produsert to former i SLA, i to forskjellige resin materialer. Begge disse ga ypperlige resultater, og formene bar ingen preg etter støp forløpet.

Det ble ikke gjort vitenskapelige analyser og målinger av detaljer og geometrier i formene. Visuell sammenligning og drøfting med Strukturplast AS viste tydelig gode nok resultater av både ABS- og resinformene. For formene produsert i ABS var det mulig å kunne analysere detaljene visuelt til tross for deformerte og ødelagte former.

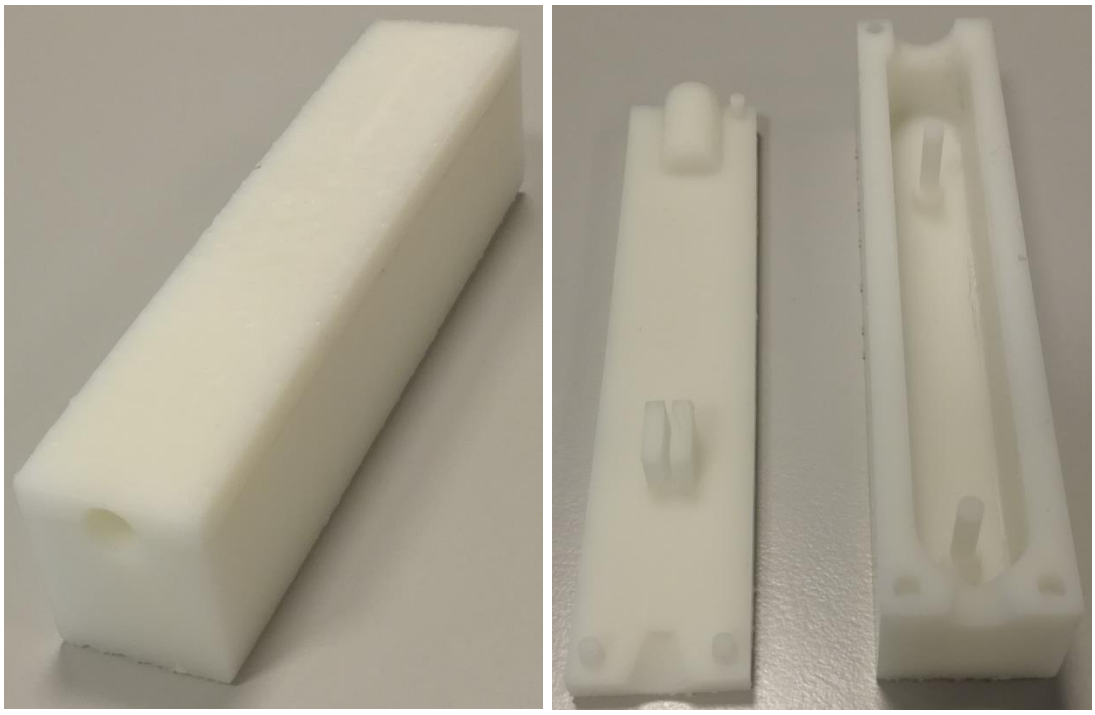
5.3 Andre støpeforsøk

Formene som ble produsert til «andre støpeforsøk» ble avlevert hos Strukturplast AS som i etterkant utførte støpingen. Resultatene fra dette ble tilsendt oss i ettertid.

I andre runde med støp var vi nå rusted med en lukket støpeform (se figur 28). Denne fikk vi som en reaksjon fra Strukturplast AS etter gode resultater fra «første støpeforsøk». Disse ble produsert i SLA printeren med FormLabs' Rigid resin (se figur 29).

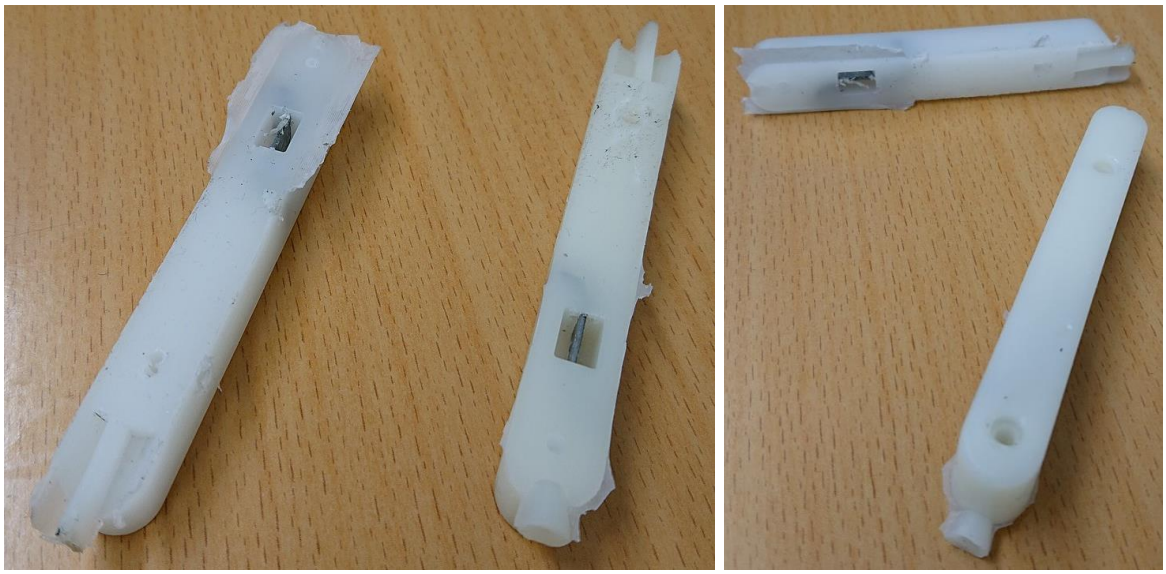


Figur 28: Lukket form - Strukturplast AS



Figur 29: Ferdig produsert lukket form ved SLA.

I den lukkede formen ble fylt med NORSelast® PUR 65 shore A, som har noe lavere herdetemperatur (cirka 30°C lavere) enn 65 shore D. Materialvalget ble tatt av Strukturplast AS på bakgrunn av produktets bruksområdet. Materialet fylte formen tilfredsstillende og resultatet ble meget bra (se figur 30). Det støpte produktet fikk noe flash som enkelt kunne fjernes i etterkant.



Figur 30: Støpte komponenter i lukket form, produsert i NORSelast PUR 65 shore A.

I løpet av dette prosjektet har vi sett verdien av å kunne produsere støpeformer produsert i FDM printere, grunnet lavere pris og generelt enklere på mange områder. En ny aceton-behandlet testform i ABS ble derfor produsert i 100% infill, og klargjort til dette støpeforsøket (se figur 31). Dette ble gjort for å eliminere luftrommene internt i formen, som var en faktor i de tidligere testformene i ABS (20% infill).

Figur 31: Testform i ABS med 100% infill før støp.

ABS formen i 100% infill ble fylt med NORSelast® PUR 65 shore D. Formen tålte varmen dårlig (se figur 32). Det yttre laget i formen ble delaminert og det er usikkerhet hvorvidt dette kan skyldes acetonbehandlingen eller materialets temperaturtolleranse. Delaminering ble ikke oppdaget ved noen av de andre støpeforsøkene. Dette støpeforsøket ble gjort for å få en direkte sammenlikning med SLA og SLS formene som også er i 100% infill (solide).

Figur 32: Testform i ABS med 100% infill etter støp.

6 Diskusjon

Hensikten med denne oppgaven har vært å undersøke hvordan bedrifter kan produsere støpeformer rimelig ved additiv metode. På bakgrunn av dette ble det forberedt, i første omgang, flere like testformer for støp. Disse ble produsert i enten forskjellige materialer eller parametere. Dette ga et godt sammenlikningsgrunnlag på tvers av de additive metodene som ble benyttet.

Gjennom prosjektet har vi erfart at forventninger ikke alltid samsvarer med realiteten. Spesielt ved støp i acetonbehandlede former kommer dette tydelig frem. Samtlige av disse formene reagerte forskjellig under støpeprosessen, men ingen tålte den høye temperaturen støpematerialet oppnådde ved herding. En annen interessant oppdagelse ble også gjort under støpeforsøkene med testformene produsert i ABS. Ved et av støpene ble påføringen av slippmiddel glemt. Dette resulterte i at det ble umulig å skille støpematerialet fra formen. Dersom det ikke benyttes slippmiddel vil sammenføyningen mellom PUR og ABS være tilstrekkelig sterk nok til å kunne brukes som en kompositt. Som igjen åpner for nye bruksområder.

Ettersom det etterhvert finnes mange additive tilvirkningsmetoder ble kostnad og etterarbeid særlig hensyntatt under dette prosjektet. Videre ble det besluttet å, i første omgang, benytte enkle åpne former for eliminasjon av forstyrrende faktorer.

Planen videre var egentlig å kunne avdekke begrensninger ved metodene, undersøke de termiske grensene for materialene og konkludere med de respektive bruksområdene. Ettersom dette var viktige faktorer for vår oppgave ble kartleggingen av disse også vår høyeste prioritet, men dette skulle til å endre seg. Etter første støpeforsøk ønsket Strukturplast AS videre støpeforsøk i andre SLA produserte former. På grunn av tidsfrister ble det derfor besluttet å gå videre med SLA i stedefor å avdekke begrensingene ved bruk av ABS. En siste testform i ABS ble allikevel produsert med 100% infill. Dette ble gjort for å kunne utelukke infill gradens betydning på varmebestandighet. Vi ble opplyst, av Strukturplast, om at lav grad av infill kan skape problemer i plastproduserte støpeformer. I våre forsøk ble det påvist at graden av infill hadde liten betydning for varmebestandigheten, og at materialet (ABS) i seg selv er i disse tilfellene den begrensende faktoren.

Svakheten med det nye fokusområdet var at vi nå mistet muligheten til å kunne avdekke begrensende faktorer ved materialene som opprinnelig var ønsket. Da med tanke på hvilken herdetemperatur som er grensen for hva materialene faktisk tåler. Det er fortsatt trolig at ABS er egnet som formmateriale til støping i materialer som oppnår lavere herdetemperatur. På en annen side er det fortsatt noe usikkerhet om aceton har kjemisk påvirket støpeformene i ABS.

Design. Et enkelt åpent formdesign ble valgt for å eliminere faktorer som luftlommer og trykk. Andre fordeler ved designvalget var at vi fikk besiktiget herdeprosessen og kunne enkelt utstøte deler. Til vårt formål fungerte det enkle designet bra og ga gyldige resultater opp mot oppgavens rammebetingelser. På en annen side ville det vært interessant og kunne gjenta forsøkene i lukkede former, for å undersøke i hvilken grad dette påvirker varmebestandigheten. Et lukket formdesign ble benyttet i «andre støpeforsøk», men materialet denne ble fylt med oppnådde en herdetemperatur på kun 100°C og kan derfor ikke sidestilles med de øvrige resultatene. Derimot fungerte dette helt utmerket og anses som et særdeles godt resultat i vår jakt på gode additivt-produserte støpeformer.

Produksjon. Gruppen er godt fornøyd med valg av additive metoder som ble brukt, og resultatene fra disse. Det dukker stadig opp nye metoder, og det ville vært umulig å ta for seg alle disse med vår tidsbegrensning. Vi har valgt den vanligste metoden (FDM) opp mot en metode som er kjent for sin høye oppløsning (SLA), noe som er særdeles ønskelig for støpeformer. Det har vist seg at hver av metodene har sine begrensinger og utfordringer, men har avdekket muligheter for hver av metodene som ble brukt i oppgaven.

Vårt støpeform-design ga lite utfordringer for 3D-printerne som ble brukt i denne oppgaven. Det har heller ikke vært behov for støttestrukturer for formene produsert i FDM. Dette har latt oss fokusere på rammebetingelsene i oppgaven mot for å bli hengende igjen i andre utfordringer som kan oppstå ved avansert geometri og omfattende støttestrukturer. For bedrifter som benytter seg av «Guide til AddForm» (se vedlegg 1) kan slike utfordringer være av mindre betydning hvis erfaringer, spesialisering og ekspertise utnyttes. I forhold til vår oppgave har denne tidsbesparelsen vært avgjørende for å kunne oppnå tilstrekkelige resultater.

For FDM printeren brukt i oppgaven er etterbehandling en nødvendighet for formproduksjon og anses som en svakhet ved metoden. Tilsynelatende skal SLA printere være optimalt for additiv støpeform produksjon, men også her har det dukket opp svakheter ved metoden. Som nevnt tidligere har SLA modeller behov for raft og/eller støttestrukturer ved produksjon. Redusert grad av infill skaper utfordringer, og overkonstruerte modeller øker materialkostnader.

Etterbehandling. Metoder og materialer ble delvis valgt på bakgrunn av muligheter for lite eller ingen etterbehandling. Til tross for dette ble alle former etterbehandlet på et eller annet vis. Etterbehandlingsmetodene som ble benyttet krevde generelt svært lite bemannet tid. Dette grunnes stor grad av automasjon, sammenlignet med andre metoder som krever manuelt arbeid.

Ved bruk av standard resin for SLA ble det oppgitt at etter-herding var overflødig. Samtidig ble det funnet kilder/bevis (se kap. 3.4.2) for at materialegenskapene ble forbedret ved herding. For å øke mulighetene for suksessfulle resultater, ble denne etterbehandlingen gjennomført for samtlige av de produserte formene i SLA. Rigid resin derimot anbefales alltid å etter-herdes. I situasjoner hvor oppgitte materialegenskaper uten etter-herding er tilstrekkelig, kan denne prosessen utgå. For etterbehandlingene som er brukt i SLA produksjonen er etter-herding prosessen som forbruker mest tid. Annen etterbehandling av overflate anses ikke som nødvendig for formproduksjon ved bruk av SLA.

Acetonbehandlingen av ABS formene fungerte, men tok bort en del detaljer og reduserte til dels nøyaktigheten. Videre er det usikkert om behandlingen endret materialegenskapene til ABS og dette burde vært utforsket mer. Under støping var resultatene svært sprikende, noe som kan tale for at aceton påvirker materialegenskapene i noe grad, grunnet variasjon i behandlingstid. Samtidig har vi ikke funnet noen kilder/bevis som hverken bekrefter eller avkrefter dette. Blant våre kontaktpersoner på Strukturplast var det også delte meninger om dette.

Tid og kostnad. Støpeformene produsert i FDM viste seg å være den rimeligste metoden i materialforbruk sammenliknet med resin i SLA. Rent økonomisk er det fordelaktig å kunne kontrollere graden av infill (forbruk av materiale). Vi har i løpet av dette prosjektet fått et pristilbud på CNC-produksjon av vår testform i aluminium. Selv om resin har en betydelig høyere kostnad enn ABS er dette en kostnad som kan neglisjeres i forhold til CNC-produksjon. For bedrifter med et begrenset budsjett kan additivt utstyr og materiale fremstå kostbart. Denne kostnaden derimot kan fort tjenes inn hvis hyppig bruk av eksterne underleverandører brukes.

Støping. Støpematerialet som ble valgt herdet kjemisk ved en temperatur som lå over varmebestandighetsgrensen for ABS. Ved å utføre en slik torturtest på lik linje for alle formmaterialene, fikk vi et godt sammenligningsgrunnlag. Svakheten med forsøkene var at vi, til tross for gode resultater, ikke avdekket den øvre grensen av varmebestandighet for hvert enkelt formmateriale.

Detaljene og gjenskapelsen av forminnsiden ved SLA formene var meget bra sammenlignet med SLS kontrollformen. Formene virket dessuten upåvirket av støpet. Dette gjaldt ikke for FDM formene i ABS, disse tålte ikke varmen. Støpematerialet klarte likevel å gjenskape detaljene til en viss grad. Under første støpeforsøk ble det debattert hvorvidt luftrommene internt i FDM formene spilte en vesentlig rolle for varmebestandigheten. Dette ble senere motbevist ved å utelukke luftrommene og gjenta støp i samme materiale. Acetonbehandlingens påvirkning på materialet burde også vært kartlagt bedre, men grunnet begrenset tid ble dette nedprioritert.

Våre egne testformer ble utformet for størst mulig suksessfaktor, for å kunne vurdere temperaturbestandigheten. Med liten grad av kompleksitet eller andre utfordringer. Den lukkede støpeformen vi fikk tilsendt av Stukturplast, hadde på sin side en mer kompleks geometri enn testformene. Denne ble fylt under andre støpeforsøk og klarte seg også svært bra, men i et støpemateriale med lavere herdetemperatur. Det er usikkert hvordan denne ville reagert ved høyere temperaturer. Det skal også belyses at ingen av formene i oppgaven ble utsatt for høyt trykk under støp, som ofte kan være en vesentlig faktor ved normal produksjon. Resultatene kunne potensielt fått et annet utfall dersom disse faktorene hadde blitt inkludert.

7 Konklusjon

Oppgavens problemstilling er besvart i denne oppgaven. Det konkluderes med at det er mulig å additivt produsere støpeformer for prototyper og mindre serier. Dette kan gjøres relativt rimelig, enkelt og med tilfredsstillende resultater.

For den additive metoden FDM konkluderes det med at den etterlatte strukturen er for grov til å gi gode støperesultater og krever derfor etterbehandling.

Det konkluderes med at acetonbehandlet ABS, som er det rimeligste materialet i oppgaven, har store begrensninger og er ikke egnet til støp i PUR 65 Shore D som herder ved 130°C.

Konklusjonen ved SLA metoden er at denne egner seg godt til additiv støpeform produksjon. Overflatene blir jevne og glatte rett ut av printeren.

Grey/Rigid resin fungerte utmerket ved forsøkene gjennomført i denne oppgaven, og det konkluderes med at dette er de mest tilfredsstillende materialene benyttet.

Gruppens eget formdesign fungerte godt til oppgavens formål. Den lukkede formen fra Strukturplast hadde også meget god støpbarhet.

Utover å svare på oppgaven har gruppen, ved en tilfeldighet, oppdaget at ABS og PUR kan lamineres til en kompositt og åpner for nye bruksområder. Disse er ikke vurdert.

Gruppen har valgt å se bort fra konklusjon vedrørende SLS og materialet PA12, da oppgaven ikke har tatt for seg denne metoden. Disse er kun benyttet som sammenlikningsgrunnlag opp mot metoder og materialer oppgaven har tatt for seg. Allikevel bemerkes det at metoden benytter pulver som etterlater grov struktur og krever etterbehandling som faller utenfor våre avgrensinger.

8 Videre Arbeid

Med dette prosjektet har gruppen klart å avdekke muligheter og bruksområder for additivt produserte støpeformer i plast. Samtidig har det dukket opp begrensninger, hvor noen av disse ikke er tilstrekkelig kartlagt. Ingen av disse begrensningene derimot setter en stopper for arbeidet videre rundt dette spennende og særdeles relevante temaet. Til tross for noen mislykkete forsøk har gruppen sett verdien av metoden og materialet som ble brukt, og vil i dette kapittelet anbefale også disse til «videre arbeid».

FDM (ABS-filament). Ingen av formene produsert i ABS overlevde torturtesten og vurderes til for dårlig varmebestandighet og muligens kjemisk forringelse av materialet ved bruk av aceton. Metoden og materialet forkastes ikke. FDM og ABS inkludert aceton behandling har gitt de desidert billigste støpeformene og det anbefales videre å avdekke det øvre grense for herdetemperatur samt den kjemiske påvirkning acetonbehandlingen har på materialet.

SLA (resin). Alle disse støpeformene overlevde torturtesten med ypperlige resultater. Formene bar ingen preg etter støp og kan gjenbrukes. Gruppen anbefaler å se nærmere på flere bruksområder og gjøre forsøk med sprøytestøping utsatt for trykk. Øvre grense for herdetemperatur og andre støpematerialer bør også kartlegges.

SLS (PA12 pulver). Oppgaven har ikke tatt for seg denne metoden, men har blitt brukt som kontroll for sammenliknings grunnlag. SLS printeren (EOS) som ble brukt har en høy prislapp og krevde manuelt etterarbeid etter utprint. Metoden kommer derfor utenfor oppgavens rammebetingelser. Kontrollformen derimot besto torturtesten, og det anbefales å videre se nærmere på bruksområder og målgruppe for denne metoden.

Referanser

3DNet (u.å.a) *3DNet.*
Tilgjengelig fra: https://3dnet.no/collections/1-75/products/abs-1-75
(Hentet: 07. Mai 2019).

3DNet (u.å.b) *3DNet.*
Tilgjengelig fra: https://3dnet.no/collections/resin/products/formlabs-form-2-standard-resin
(Hentet: 07. Mai 2019).

3DNet (u.å.c) *3DNet.*
Tilgjengelig fra: https://3dnet.no/collections/resin/products/formlabs-rigid-resin
(Hentet: 07. Mai 2019).

additive3d.com (2016) *The Process of Stereolithography.*
Tilgjengelig fra: https://additive3d.com/the-process-of-stereolithography/
(Hentet: 06. Mai 2019).

Bandyopadhyay, A. & Bose, S. (2016) *Additive Manufacturing.*
Boca Raton: Taylor & Francis Group.

Biltema (u.å) *Biltema.*
Tilgjengelig fra: https://www.biltema.no/bygg/maling/rengjoringsmiddel/aceton-2000030019
(Hentet: 07. Mai 2019).

Campo, E. A. (2006) *The complete part design handbook - for injection molding of thermoplastics.*
1 utg. München: Carl Hanser Verlag.

Chakravorty, D. (2019) *All3DP*.
Tilgjengelig fra: https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/
(Hentet: 26. April 2019).

Chaudhari, A. A., Godase, A. M., Jadhav, R. S. & Naik, A. V. (2017) Acetone Vapor Smoothing: A Postprocessing Method.
International Journal of Research and Scientific Innovation, 5, s. 123-127.

ChemicalSafetyFacts (2019) *www.chemicalsafetyfacts.org.*
Tilgjengelig fra: https://www.chemicalsafetyfacts.org/category/acetone/
(Hentet: 25. Mars 2019).

Christoffersen, L., Tufte, P. A. & Johannessen, A. (2011) *Forskningsmetode for økonomisk - administrative fag.*
3 utg. Oslo: Abstrakt forlag.

Chvalina, T. (u.å) *First layer calibration and Live adjust Z.*
Tilgjengelig fra: https://help.prusa3d.com/article/ZhBlGFD9Ah-live-adjust-z
(Hentet: 02. Mai 2019).

Covestro LLC (2015) *Engineering Polyurethanes – RIM Part and Mold Design Guide.*
Tilgjengelig fra: http://www.reactioninjectionmolding.com/wp-content/uploads/2013/09/RIM-PartMoldDesignGuide.pdf
(Hentet: 02. April 2019)

Difi (2018) *Hva er en interessent?*
Tilgjengelig fra: https://www.prosjektveiviseren.no/hva-er-en-interessent
(Hentet: 21. Mars 2019).

Formlabs (2017) *material datasheet - standard.*
Tilgjengelig fra: https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/Standard-DataSheet.pdf
(Hentet: 06. Mai 2019)

Formlabs (2018a) *Quick start guide.*
Tilgjengelig fra: https://support.formlabs.com/s/article/Quick-Start-Guide?language=en_US
(Hentet: 05. April 2019)

Formlabs (2018b) *What materials does the Form 2 print with?*
Tilgjengelig fra: https://support.formlabs.com/s/article/What-materials-does-the-Form-2-print-with?language=en_US
(Hentet: 16. Mai 2019).

Formlabs (2018c) *material datasheet – rigid.*
Tilgjengelig fra: https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/Rigid_Technical.pdf
(Hentet: 06. Mai 2019).

Formlabs, (u.å.a) *Formlabs Stereolithography - quick stats.*
Tilgjengelig fra: https://formlabs.com/3d-printers/form-3/tech-specs/
(Hentet: 10. April 2019).

Formlabs (u.å.b) *Materials for High Resolution Rapid Prototyping.*
Tilgjengelig fra: https://formlabs.com/materials/standard/#greyscale
(Hentet 10. April 2019)

Formlabs (u.å.c) *3D Printing Materials for Engineering, Manufacturing, and Product Design.*
Tilgjengelig fra: https://formlabs.com/materials/engineering/#rigid-resin
(Hentet: 06. Mai 2019)

Formlabs (u.å.d) *Formlabs Store.*
Tilgjengelig fra: https://formlabs.com/store/form-2/buy-printer/
(Hentet: 07. Mai 2019).

Halvorsen, K. (2014) *Å forske på samfunnet - en innføring i samfunnsvitenskapelig metode.*
5 utg. Oslo: Cappelen akademisk.

Hötter, J.-S. & Gebhardt, A. (2016) *Additive Manufacturing - 3D Printing for Prototyping and Manufacturing.*
München: Carl Hanser Verlag.

Pechter, D. (2019) *All3DP.*
Tilgjengelig fra: https://all3dp.com/2/g-code-generator-all-you-need-to-know/
(Hentet: 26. April 2019).

Prusa Research (u.å) *Prusa Shop.*
Tilgjengelig fra: https://shop.prusa3d.com/en/3d-printers/181-original-prusa-i3-mk3-3d-printer.html#
(Hentet: 07. Mai 2019)

Prusa, J. (2018) *www.prusa3d.com.*
Tilgjengelig fra:
https://prusa3d.com/downloads/manual/prusa3d_manual_mk2_en.pdf?5#_ga=2.141637170.1671525228.1554813806-849543085.1549274943
(Hentet 10. Mars 2019).

RIM Manufacturing (2019) *Reaction Injection Molding (RIM) Process.*
Tilgjengelig fra: http://www.reactioninjectionmolding.com/rim-process/
(Hentet: 10. Mars 2019).

Rogers, T. (2019) *Everything You Need to Know About ABS Plastic.*
Tilgjengelig fra: https://www.creativemechanisms.com/blog/everything-you-need-to-know-about-abs-plastic
(Hentet: 18. April 2019).

Rosato, D. V., Rosato, M. G. & Schott, N. R. (2012) *PLASTICS TECHNOLOGY HANDBOOK - Volume 2.*
New York: Momentum Press.

SINTEF (2016) *AddForm – Additiv tilvirkning av forminnsatser for sprøytestøping av funksjonelle prototyper og små produktserier.*
Tilgjengelig fra: https://www.sintef.no/prosjekter/addform/
(Hentet: 22. Mars 2019).

Standard Norge (2018) *NS-EN ISO/ASTM 52901:2018 Additiv produksjon – genrelle prinsipper – krav til innkjøpte AM-deler.*
Tilgjengelig fra:
https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1015349
(Hentet: 10. April 2019).

Strukturplast AS (u.å) *NORSelast – one of the worlds strongest elastic material*
Tilgjengelig fra: www.norselast.com/
(Hentet: 05. Februar 2019).

Strukturplast AS (2019) *Strukturplast.*
Tilgjengelig fra: www.strukturplast.no
(Hentet: 04. Februar 2019).

Varotsis, A. B. (u.å) *Introduction to SLA 3D Printing.*
Tilgjengelig fra: https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing#work
(Hentet 16. Mai 2019)

Westhagen, H. et al. (2008) *Prosjektarbeid - utviklings- og endringskompetanse.* 6 utg. Oslo: Gyldendal akademisk.

Zhang, S.-U., Han, J. & Kang, H.-W. (2017) Temperature-dependent mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modeling and vapor smoothing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* volum 18, utg. 5, s. 763–769.

Vedlegg

Vedlegg 1 – Guide til AddForm

SINTEF

Notat

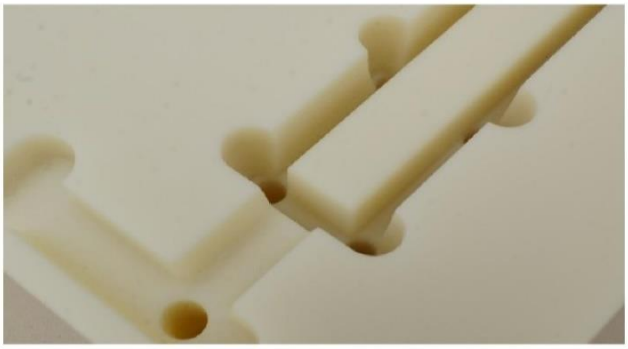
Guide til AddForm

SAKSBEHANDLER / FORFATTER	BEHANDLING	UTTALELSE	ORIENTERING	ETTER AVTALE
Knut Richard Kviserud (AS OM BE Plast) Erik Andreassen (SINTEF Industri) Rune Kringstad Sandøy (SINTEF Manufacturing)				
GÅR TIL				
Partnerbedrifter i AddForm-prosjektet				X

PROSJEKTNR / SAK NR	DATO	GRADERING
902000074	2018-10-12	Fortrolig

Innholdsfortegnelse

1 Introduksjon 2
2 Tekniske uttrykk og forkortelser 4
3 Når kan vi bruke AddForm? 5
4 Noen plastadditivmaterialer som kan brukes som formmaterialer 9
5 Formkonstruksjon 17
6 Formproduksjon 22
7 Støpeprosessen 23
8 Kjente utfordringer 24
9 Leverandører benyttet i AddForm 26



Dette notatet inneholder prosjektinformasjon og foreløpige resultater som underlag for endelig prosjektrapport.
SINTEF hefter ikke for innholdet, og tar forbehold mot gjengivelse.

1 Introduksjon

I AddForm-prosjektet har vi gjennom drøyt tre år arbeidet med utprøving av forminnsatser (for sprøytestøping) lagd med additiv tilvirkning i polymerbaserte materialer ("plast"), inklusive materialer tilsatt f.eks. 50-60 vektprosent metallpulver eller glasspulver. Det har blitt undersøkt hva som finnes på markedet, det er gjennomført ulike labforsøk, og viktigst av alt er det gjennomført en rekke forsøk med sprøytestøping av reelle produkter hos AS OM BE Plast.

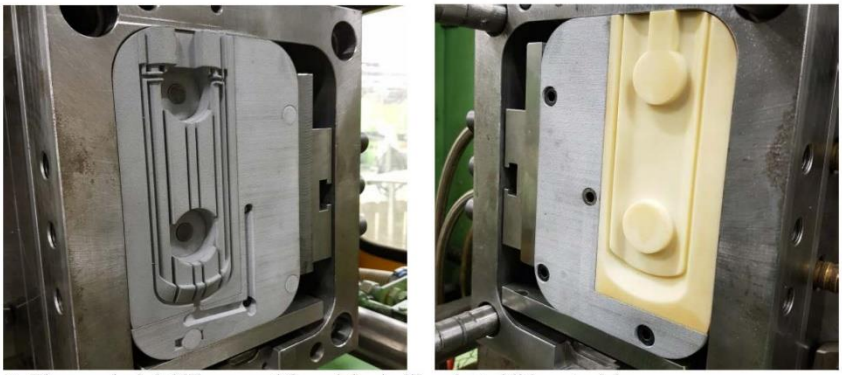
I utgangspunktet var AddForm-konseptet fokusert på å lage forminnsatser utelukkende av plast, som monteres i en moderform av stål. De ulike formdelene ble lagd enklest mulig, og det ble ofte valgt løsninger slik at ulike formdeler måtte plukkes fra hverandre for å få ut den støpte delen. Etter hvert har det utviklet seg mer og mer som et hybridkonsept, hvor man bruker både maskinerte metalldeler og plastdeler produsert additivt for å få en billigst mulig form som kan støpe komponenter i riktig kvalitet. En kan også kombinere ulike additivmaterialer som vist i Figure 1. Dette er en utvikling som har gjort at man har lyktes med å komme i mål med prosjekter hvor man ikke ville ha lyktes med rene plastformer.

Dette dokumentet bygger primært på personlige erfaringer som er gjort gjennom arbeidet med sprøytestøping av reelle produkter i AddForm, samt erfaringer fra labforsøk og tilgjengelig litteratur.

Dokumentet er ment som en støtte til:

- Produktdesigneren
  - Ved tilpasning av produkt for rask og billig sprøytestøping i en AddForm
- Formkonstruktøren
  - Ved vurdering av om AddForm er riktig formkonsept
  - Ved utvikling av støpeform
- Verktøymakeren
  - Ved formtilpasning før produksjon
- Maskinoperatøren
  - Ved innkjøring av maskin
  - Ved feilsøking

Dokumentet er delt inn kronologisk etter flyten i et prosjekt, fra et produktdesign kommer inn til ferdige produkter har kommet ut av sprøytestøpemaskinen, se også Figur 2. De første kapitlene er hovedsakelig rettet mot formkonstruktør, og eventuelt produktdesigner, mens de siste kapitlene er rettet mot verktøymaker og operatør som er ansvarlig for den fysiske produksjonen.



Figur 1. Eksempel på AddForm med formdeler i ulike plastadditivmaterialer.

1) Materialvalg for innsats
- Valg av AM-prosess/materiale
- Eventuelt komponenter i andre materialer (inkl. metall) i kritiske områder

2) Design av innsats
- Størrelse, veggtykkelse etc i forhold til dimensjonstoleranser, pris og mekanisk ytelse (det er vanlig med "bakfylling" av innsatser)
- Prinsipp for (rask) infesting i stamform
- Forenklet utstøtersystem, "manuelle sidetrekk" etc

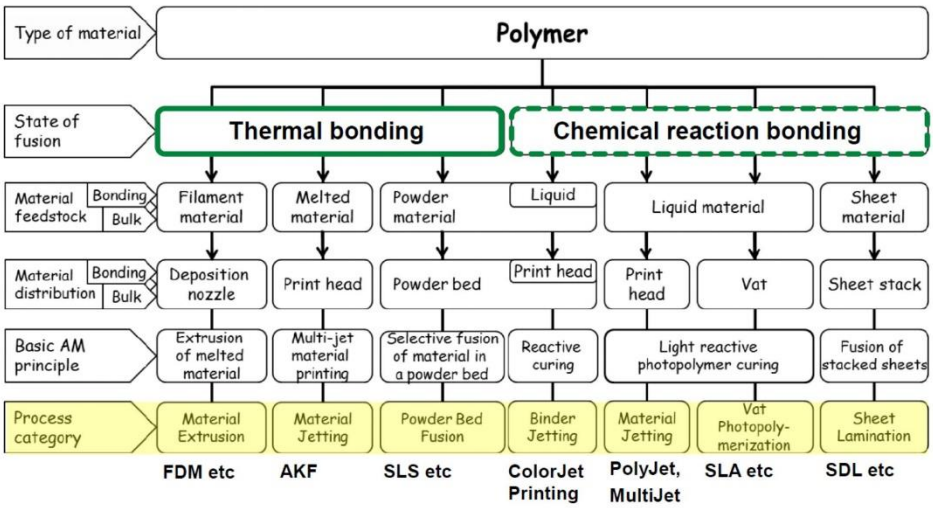
3) 3D-printing av innsats
(og eventuelt framstillling av andre komponenter til en "hybridinnsats")

4) Etterbearbeiding av 3D-printet innsats
- "Polering" av overflater (blåsing, tromling, løsemildler, …)
- Etterherding (UV, termisk) for visse materialer
- "Bakfylling" og eventuelt innlegging av forsterkning/avstiving
- Maskinering (f.eks. utstøterhull)
- Deponering av belegg for bedre slipp, bedre temperaturbestandighet etc

5) Sammenstilling og montering i stamform

6) Sprøytestøping!

Figur 2. Eksempel på trinn i AddForm-arbeidsprosessen. Trinn 4 vil en helst unngå!



Figur 3. Prosesskategorier for éntrinns additiv tilvirkning av polymerbaserte materialer. Noen kommersielle navn på prosesser er lagt inn nederst. Illustrasjonen er basert på ISO/ASTM 52900:2015 "Additive manufacturing – General principles – Terminology". Se også https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:dis:ed-2:v1:en

2 Tekniske uttrykk og forkortelser

3D-printing	Se **Additiv tilvirkning**.
AddForm	**AddForm** er navnet på prosjektet, men også OM BE Plasts navn på teknologien, d.v.s. bruk av forholdsvis rimelige forminnsatser lagd i polymerbaserte materialer.
Additivmateriale	I denne sammenhengen er et **Additivmateriale** et materiale som forminnsatsen er "printet" i. Dette er da hovedsakelig polymerbaserte materialer ("plast") inklusive materialer tilsatt f.eks. 50-60 vektprosent metallpulver eller glasspulver.
Additivteknologi	Et videre begrep enn **Additiv tilvirkning**
Additiv tilvirkning	**Additiv tilvirkning** er den standardiserte betegnelsen på tilvirkningsprosesser der materiale "adderes", vanligvis lag for lag, basert på en 3D-DAK-geometri. Dette da i motsetning til f.eks. subtraktive tilvirkningsprosesser (f.eks. maskinering). I dagligtale bruker mange uttrykket **3D-printing** som synonym for **Additiv tilvirkning**.
Alumide	Et additivmateriale (fra EOS) bestående av PA12 tilsatt ca 50 vektprosent aluminiumspartikler. Dette er et materiale som brukes i plast-**PBF**-maskiner fra EOS (f.eks. maskintypene P395, P396 og P100 som finnes i Norge). Det finnes liknende materialer fra andre leverandører.
AM	**AM** er forkortelsen for "additive manufacuring", som er det samme som **Additiv tilvirkning**.
Digital ABS	**Digital ABS** er et additivmateriale fra Stratasys. Det er en herdeplast (altså ikke en ABS) som brukes i **MJT**-maskiner fra Stratasys.
FDM	**FDM** er forkortelsen for "fused deposition modeling". **FDM** er en type **AM**-prosess (i kategorien **MEX**), men **FDM** er egentlig et varemerke fra én maskinprodusent.
MEX	**MEX** er en forkortelse for "material extrusion" (se Figur 3). "Material extrusion" er den standardiserte betegnelsen på kategorien av **AM**-prosesser som går under mange navn, bl.a. **FDM**, men **MEX** er en mer generell betegnelse enn **FDM**.
MJT	**MJT** er en forkortelse for "material jetting" (se Figur 3). "Material jetting" er den standardiserte betegnelsen for en kategori av **AM**-prosesser.
PBF	**PBF** er en forkortelse for "powder bed fusion". "Powder bed fusion" er den standardiserte betegnelsen på kategorien av **AM**-prosesser som på norsk kalles pulverseng-prosesser, se Figur 3. Slike prosesser kalles ofte **SLS** eller "laser sintering", men **PBF** er en mer generell betegnelse.
PerFORM	**PerFORM** er et additivmateriale (fra DSM Somos) bestående av en herdeplast (UV-herdende) tilsatt ca 60 vektprosent glasspulver. Dette er et materiale som brukes i **SLA/VPP**-maskiner fra mange maskinleverandører. Det finnes liknende materialer fra andre leverandører.
SLA	**SLA** er forkortelsen for "stereolithography apparatus". Dette er en **AM**-prosess i kategorien **VPP**.
SLS	**SLS** er forkortelsen for "selective laser sintering". **SLS** er en type **AM**-prosess (i kategorien **PBF**), men **SLS** er egentlig et varemerke fra én maskinprodusent. Kalles ofte også lasersintring ("laser sintering" på engelsk).
VPP	**VPP** er en forkortelse for "vat photopolymerization" (se Figur 3). "Vat photopolymerization" er den standardiserte betegnelsen for en kategori av **AM**-prosesser der bl.a. **SLA** inngår.

3 Når kan vi bruke AddForm?

Generelt vil dette være avhengig av hvilket materiale som skal sprøytestøpes, antall deler som skal produseres, den sprøytestøpte delens geometri og målsetningen med produksjonen. I tillegg er det for eksempel slik at en geometri som i utgangspunktet er problematisk kan fungere bra dersom materialet som skal støpes er gunstig eller planlagt produksjonsvolum er lavt nok. Totalt sett gir dette en kompleksitet som gjør det vanskelig å lage entydige retningslinjer for når AddForm er egnet.

Nedenfor er det beskrevet ***Drivere*** (argumenter for bruk av AddForm), ***Utfordringer*** (argumenter som taler mot bruk av AddForm) og ***Strategier for å lykkes på tross av Utfordringer***. Dette er ment som en støtte til en formkonstruktør som skal vurdere om AddForm er riktig teknologi, men det kreves fortsatt vesentlig bakgrunnskunnskap og intuisjon fra konstruktøren sin side.

Avsnitt 3.1 er basert på erfaringer som er gjort i løpet av AddForm-prosjektet, mens avsnitt 3.2 presenterer erfaringer gjort av leverandører av additivmaterialer som er mye benyttet til støpeformer[1,2]. I tillegg finnes det en del litteratur i vitenskapelige/tekniske tidsskrifter, men vi kommer ikke inn på disse her.

3.1 Drivere og Utfordringer

Drivere

Det er to primære drivere for å bruke polymerbaserte additivmaterialer istedenfor stål eller aluminium i forminnsatser til sprøytstøping.

1. *Lav produksjonskostnad*: For relativt små komponenter med kompleks geometri kan det være mye å spare på additivt framstilte forminnsatser. Det er vanskelig å gi et godt tall, da det kan variere mye, men hvis man tenker seg et deksel i størrelse 50x100 mm med mye detaljer på baksiden, kan man anta en kostnad på 30% av maskinerte metalldeler. Dette er en ren sammenligning av innsatser produsert gjennom maskinering og additiv tilvirkning. I tillegg kommer mulighetene med additivteknologi til å lage forenklede støpeformer som kan redusere kostnadene helt ned mot 10% av en tradisjonell form.

   Noen faktorer som styrer kostnadsbesparelser er:
   - *Størrelse*: Additiv tilvirkning har et kostnadsbilde som er nesten lineært i forhold til størrelse. Maskinerte deler er ikke nødvendigvis så mye dyrere selv om delene går opp i størrelse. Derfor vil det være mindre å spare på AddForm til store deler.
   - *Kompleksitet*: Svært enkle geometrier som kan maskineres enkelt og raskt er langt billigere å maskinere enn komplekse geometrier med behov for mye gnist-erodering. Additiv tilvirkning er nærmest upåvirket av kompleksitet. Derfor blir fordelen med AddForm størst ved komplekse geometrier.
   - *Overflatekrav*: Pr 2018 er additivmaterialene (for forminnsatser) med best overflatefinish betydelig dyrere enn materialer med grovere overflatefinish. Derfor vil man kunne lage testkomponenter med grov overflate til en langt rimeligere kostnad enn tilsvarende komponenter med en visuelt bedre overflate. Dersom det er rent tekniske tester som skal utføres, og overflaten ikke har betydning, kan man lage innsatser additivt svært rimelig.

2. *Kort ledetid for produksjon av formdeler*: Et sett vanlige forminnsatser med middels kompleksitet tar gjerne 4-5 uker å fremstille i Europa, med mindre man betaler ekstra for kort leveringstid. Tilvirkningstiden kan være noe kortere i Øst-Asia, men ledetiden blir omtrent lik når det tas høyde for transporttid. Praktisk tilvirkningstid for additivt framstilte formdeler er

[1] Technical Application Guide Polyjet For Injection Molding, Stratasys.
[2] Injection Molding Using Rapid Tooling, DSM Somos

gjerne 1-2 dager. Dersom delene bestilles fra eksterne leverandører er typisk leveringstid fra 3 dager til 2 uker, avhengig av prosess og leverandør.

Et annet alternativ til både AddForm og konvensjonelle former er direkte additiv tilvirkning. Ulempen med denne løsningen er at man ofte ikke får benyttet ønsket materiale, og dermed ikke kan oppnå hensikten med produksjonen. På sikt vil imidlertid antakelig additiv tilvirkning ta markedsandeler fra sprøytestøping for visse produkter og seriestørrelser.

Utfordringer

- *Høye produksjonsvolum*
  - AddForm anses som mest egnet i tilfeller der man ønsker forholdsvis få komponenter, gjerne ned mot 20 støp
  - I gunstige tilfeller kan det være mulig å oppnå langt flere støp. Det er vanskelig å gi en generell regel på forventet antall, da dette avhenger både av produktets geometri, materiale og toleransekrav, samt hvor godt man lykkes med utformingen av støpeformen
- *Høye kjerner i formen*
  - En tommelfingerregel er at kjerner som er høyere enn sin egen bredde kan være problematiske
  - Additivmaterialene har forholdsvis lav strekkstyrke, og høye kjerner kan også bøyes av støpetrykket, så de kan knekke før eller under avforming
- *Tynne vegger*
  - Det går normalt greit å fylle geometrier ned mot en tykkelse på 1.5 mm
  - Tynnere geometrier kan gå under ellers gunstige betingelser, gitt at det er små områder og at det ikke blir innesluttet luft
  - Additivmaterialene har lav termisk ledningsevne og dette er til hjelp ved innsprøytingen, men samtidig kan høye skjærspenninger i plastsmelten generere mye varme som kan ødelegge additivmaterialet.
- *Lange flytveier*
  - Ved en godstykkelse på 2 mm er det som regel uproblematisk å fylle en lengde på 100 mm. Ved lengre flyteveier bør man vurdere materialets flytegenskaper, formmaterialets evne til å motstå trykk, samt se på muligheten til å øke godstykkelsen i første del av flytveien
- *Spisse hjørner*
  - Former i additivplast er ofte utsatte for "erodering" av utvendige hjørner, spesielt ved vanskelige materialer eller i områder hvor det passerer mye plastsmelte.
- *Glatte overflater*
  - Ikke alle formmaterialer er egnet til å gi støp med glatte overflater
  - Eksempelvis har materialet Alumide Ra/Rz på omtrent 8/60 µm som levert, mens tilsvarende tall for PerFORM er 2/20 µm.
- *Spesielle overflatebeskaffenheter*
  - Det er vanskelig å oppnå overflater på formdeler som gir tilsvarende overflatekarakteristikk som for eksempel polert eller erodert form
- *Strenge toleranser*
  - Sammenlignet med maskinerte formdeler er typisk komponenter i additivplast mer unøyaktige. Erfaring viser at for eksempel fylte SLS-materialer som Alumide kan ha en standardtoleranse på omkring +/- 0.3 % (med +/- 0.3 mm som laveste grense), mens fylte SLA-materialer som PerFORM er noe bedre; standardtoleransen oppgis ofte til +/- 0.2 % (med +/- 0.2 mm som laveste grense).
  - Toleransene til det sprøytestøpte produktet er imidlertid også påvirket av forminnsatsens deformasjon i sprøytestøpeprosessen, særlig det høye trykket. Formdeler i additivplast har jo mye lavere stivhet enn tilsvarende deler i stål.
- *Høy smelte/prosesstemperatur på støpeplast*

- Høyere temperatur fører typisk til raskere "erodering" av formdeler. Hvis støpeplasten har en viss adhesjon til additivplasten blir denne effekten forsterket (ved avforming)
- Det har likevel lyktes å støpe plast med prosesstemperatur opp mot 340°C i PA12-baserte former (former i Alumide).

- *Høy viskositet til støpeplast*
  - Høy viskositet vil typisk føre til raskere "erodering" av formdeler, da trykket blir høyere.
- *Fyllstoff (fibre, partikler etc) i støpeplast*
  - Fyllstoff vil typisk føre til raskere nedbrytning av formen. Én årsak er den abrasive effekten, men erfaringer i prosjektet indikerer at en større utfordring er at avformingskreftene blir større.
  - Det har i prosjektet blitt gjennomført vellykkede støp med ulike fyllstoffer, inkludert inntil 10 mm langer glassfibre
- Stive materialer
  - Stive materialer kan gi økt risiko for kjernebrudd, da krympekraften blir høyere.

Strategier for å lykkes med AddForm på tross av Utfordringer

- Benytte best egnet formmateriale
  - Se kapittel 4 for egenskaper til noen aktuelle formmaterialer
  - Valg av formmateriale påvirker både kostnad, holdbarhet og kvalitet, og må dermed være en avveining mellom disse aspektene
- Maskinere formdeler produsert i additivplast
  - Flere formmaterialer er egnet for ettermaskinering, noe som kan gi mulighet for å få bedre toleranser i noen tilfeller. Maskinering kan gjøres både før og etter prøvestøp
  - Dersom det forventes at ettermaskinering må gjøres etter prøvestøp, bør det legges på maskineringsmonn under bygging av formdelene
- Framstille utsatte formdeler i metall
  - Formdeler som er kritiske i forhold til toleranser og detaljering, eller som er spesielt utsatte med hensyn til formbrudd eller nedbrytning, kan med fordel produseres i metall
- Produsere ekstra sett med utsatte forminnsatser
  - Det må aksepteres høyere risiko for formbrudd og annen skade av former i additivplast enn for maskinerte former i metall
  - Utsatte formdeler i additivplast kan produseres i ekstra sett for å byttes ut når de blir slitte eller ødelagt. Dette kan gi mulighet for produksjon av større serier enn det som ellers ville vært tillatt
- Tilpasse produktgeometri
  - Dersom det ikke er ødeleggende for formålet med produksjonen, kan det være hensiktsmessig å gjøre tilpasninger av produktspesifikasjonen for å øke sjansen for å lykkes med AddForm
  - Økte slippvinkler og bunnradier reduserer sjansen for brudd i kjerner
  - Økt godstykkelse på tynne detaljer kan redusere risikoen for manglende fylling, eller redusere støpetrykk slik at slitasje og deformasjon av form reduseres
  - Mindre strenge overflatekrav kan gjøre det mulig å benytte billigere materialer
  - Det kan være nødvendig å sette videre toleransekrav for å lykkes med AddForm

3.2 Anbefalinger fra leverandører

Nedenfor har vi gjengitt noen anbefalinger fra leverandører av additivmaterialer med tanke på bruk i forminnsatser. Mer detaljer kan en finne i diverse "design guidelines" på nettet.

Anbefalinger fra DSM Somos for bruk av PerFORM:

- 50 – 100 støp
- Dimensjoner bør være under 127 mm
- Veggtykkelse bør være over 1.6 mm
- Slippvinkler bør være minimum 2 °

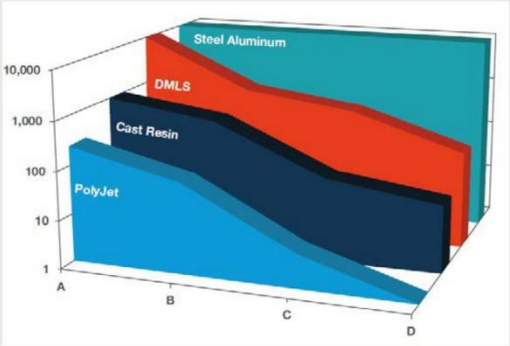
Materialer som DSM Somos opplyser at et støpt i former av PerFORM:

Many commonly used thermoplastics can be used in Rapid Tooling and more are being qualified.

- Polyethylene
- Polypropylene
- Thermoplastic elastomers
- High impact polystyrene
- ABS
- Polycarbonate
- Glass-filled PA

Anbefalinger fra Stratasys for bruk av Digital ABS:

- 80+ støp med elastomerer (eks. TPE)
- 20 – 80 støp med vanlige plaster (eks. POM, ABS, PS, PP)
- 5 – 20 støp med tekniske plaster (eks. PA, PC-ABS, PC)
- Målsetning om evaluering av støpt del
- Volum ("bounding box") under 165 cm^3
- Slippvinkler bør være på minimum 5°
- Det bør benyttes radius i indre hjørner
- Egnet for materialer med smeltetemperatur under 300°C
- Materialer med lavt smeltepunkt og gode flytegenskaper er best egnet
- Materialer som skal være gjennomsiktige er mindre egnet
- Glassfylte materialer gir lavere forventet levetid på verktøyet



A	• Polyethylene (PE) • Polypropylene (PP) • Polystyrene (PS) • Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) • Thermoplastic elastomer (TPE)
B	• Glass-filled Polypropylene (PP+G) • Acetal (Polyoxymethylene [POM]) • Polycarbonate-ABS blend (PC+ABS)
C	• Polycarbonate (PC) • Glass-filled Acetal (POM+G) • Polyamide (PA)
D	• Glass-filled Polycarbonate (PC+G) • Glass-filled Polyamide (PA+G) • Polyphenylene Oxide (PPO) • Polyphenylene Sulfide (PPS)

Figur 4 Sammenheng mellom realistisk produksjonsvolum og støpeplast for ulike formmaterialer (PolyJet = Digital ABS i dette tilfellet).

4 Noen plastadditivmaterialer som kan brukes som formmaterialer

Det finnes en lang rekke teknologier og materialer for additiv tilvirkning av plast. Noen materialer som kan brukes i forminnsatser og deres fordeler og ulemper er oppsummert i Tabell 1.

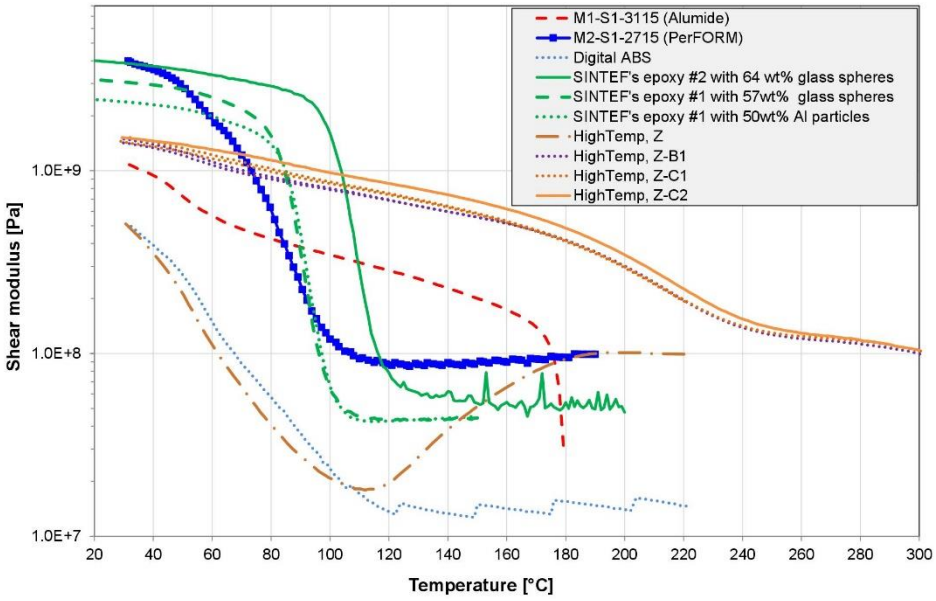
Tabell 2 og Figur 5 viser mekaniske og termomekaniske egenskaper for noen av materialene. Sistnevnte figur er basert på målinger gjort i AddForm-prosjektet. Vi har gjort mange målinger av mekaniske og termomekaniske egenskaper, men dette er ikke inkludert i denne rapporten.

Tabell 1. Oversikt over ulike additivprosesser for plast, med noen tilhørende kommersielle materialer og deres fordeler og ulemper. For definisjoner og forkortelser se kap. 2.

AM kategori	Materialeksempler	Fordeler	Ulemper
Material extrusion (MEX)	PC, PPSU, PEI (Ultem), …	•Høytemperatur-materialer som Ultem er tilgjengelig	•Grove overflater (bygd med filament)
Material jetting (MJT)	Digital ABS, Digital ABS2, VisiJet M3 X	•Dokumenterte cases fra Stratasys og 3D Systems	•Høy kostnad per bygg (dyre materialer) •"Stripede" overflater (kan utbedres ved blåsing) •Begrenset temperaturmotstand
Powder bed fusion (PBF)	Alumide (PA12 med Al partikler), ulike fylte materialer, PEEK, …	•Lav kostnad per bygg (gjelder ikke PEEK!) •Generelt god ytelse sprøytestøpeverktøy •Seigt •Noe termisk ledningsevne (for Al fylte materialer)	•Relativt grove overflater •Lav stivhet •PA12 har begrenset temperaturbestandighet •PEEK er dyrt •Noen støpeplaster hefter til Alumide
Vat photo-polymeri-zation (VPP)	PerFORM, CeraMAX, PLASTCure Rigid 10500, E-tool, … (de fleste er fylte med keramiske partikler)	•God overflatebeskaffenhet og nøyaktighet •God stivhet •God ytelse for sprøytestøpeverktøy (tverrbundet materialer)	• Høy kostnad per bygg (dyre materialer) • Materialer med høy fyll-andel er sprø
	High Temp …. Ulike lavkostmaterialer og -maskiner	•Lav kostnad per bygg •Lav investeringskostnad for maskin	• Begrenset temperaturbestandighet • Sprø

Tabell 2. Sammenligning av (termo)mekaniske egenskaper for noen relevante additivmaterialer.

Egenskap	Formlabs High Temp[3]	Stratasys Digital ABS[4]	DSM Somos PerFORM[5]	Stratasys Ultem 9085[6]	EOS Alumide[7]	*Enhet*
Flytgrense	51	60	80	47	48	*MPa*
Strekkfasthet	3600	3000	9800	2150	3800	*MPa*
Bruddforlengelse	2	40	1.2	5.8	4	*%*
Bøyestyrke	107	75	146	112	72	*MPa*
Bøyestivhet	3300	2200	9030	2300	3600	*MPa*
Bruddseighet (Izod)	17	80	20	120		*J/m*
Bruddseighet (Charpy)					4.6	kJ/m^2
Glassovergangs-temperatur		53	81	186		*°C*
HDT (0.46MPa)	289	95	268		177	*°C*
HDT (1 .81 MPa)	130	55	119	153		*°C*



Figur 5. Stivhet (skjærmodul i dette tilfellet) for ulike materialer som funksjon av temperatur.

[3] https://formlabs.com/media/upload/XL-DataSheet.pdf
[4] http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Material_Spec_Sheets/MSS_PJ_PJMaterialsDataSheet.pdf?v=635785205440671440
[5] https://www.protolabs.com/media/1010895/somos-perform.pdf
[6] http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Material_Spec_Sheets/MSS_FDM_ULTEM9085.pdf
[7] https://www.sculpteo.com/static/0.30.0-49/documents/materials/alumide/mds-alumide.pdf

Tabell 3 viser en kostnadssammenligning av noen relevante materialer. I sistnevnte tabell kan det være nyttig å notere seg at enkelte materialer (f. eks. Stratasys Ultem 9085) har kostnad som primært er knyttet opp til volumet av delen, mens andre materialer (EOS Alumide) har kostnad som er knyttet opp til volumet av en boks som omslutter delen.

Tabell 3. Sammenligning av kostnader for materialer produsert med ulike prosesser hos Materialise OnSite[8]. Delen er en boks på 100x100x100 mm, med åpning på en side (bortsett fra delen som er massiv). TuskXC2700W er "stand-in" for PerFORM, da PerFORM ikke er direkte tilgjengelig gjennom online bestillingssystem. FormLabs HighTemp er prisberegnet med utgangspunkt i at delene produseres in-house, og kostnaden inkluderer materiale og tidsbruk.

Del \ Material	EOS Alumide	TuskXC2700W	Stratasys Ultem 9085	FormLabs HighTemp
Skall 2 mm	€164	€380	€791	€143
Skall 5 mm	€165	€519	€888	€178
Skall 10 mm	€166	€710	€1 179	€226
Massiv	€168	€1212	€2 371	€373

I resten av dette kapitlet er materialene som er mest relevant for AddForm presentert, inkludert karakteristiske fordeler og ulemper med de ulike materialene.

[8] http://www.materialise.com/en/manufacturing/materialise-onsite

Alumide (fra EOS)

Alumide er et komposittmateriale bestående av små aluminiumspartikler i en matrise av PA12. Materialet er mye benyttet i AddForm-prosjektet, på grunn av tre egenskaper:

- Stor formfrihet
- God holdbarhet
- Lav kostnad

Samtidig har Alumide enkelte sentrale ulemper, som har gjort at andre materialer har blitt benyttet parallelt med Alumide for å lage støpeformer:

- Alumide har forholdsvis grov overflate, og det er umulig å få helt glatt overflate på grunn av aluminiumspartikler som "rives ut" av matrisen ved pussing. Forsøk har vist at det er mulig å pusse materialet ned til en Ra-verdi < 2 µm, men partiklene som rives ut fører til at overflaten på den støpte komponenten får enkelte "nupper".
- Alumide har ganske lav stivhet, som fører til at kjerner bøyer av og at det er vanskelig å kontrollere veggtykkelser

Alumide har gjennom prosjektet vist seg å være en nyttig "arbeidshest", som er spesielt egnet dersom kravene til overflate, detaljering eller nøyaktighet er grove til moderate.

Figur 6. Normal overflate i Alumide (d.v.s. overflaten er bare "blåst" på vanlig vis for å fjerne løst pulver).

PerFORM (fra DSM Somos)

PerFORM er et komposittmateriale bestående av en herdeplastmatrise med ca 60 vektprosent glasspartikler/pulver. Dette materialet har blitt benyttet mye i AddForm-prosjektet på grunn av følgende egenskaper:

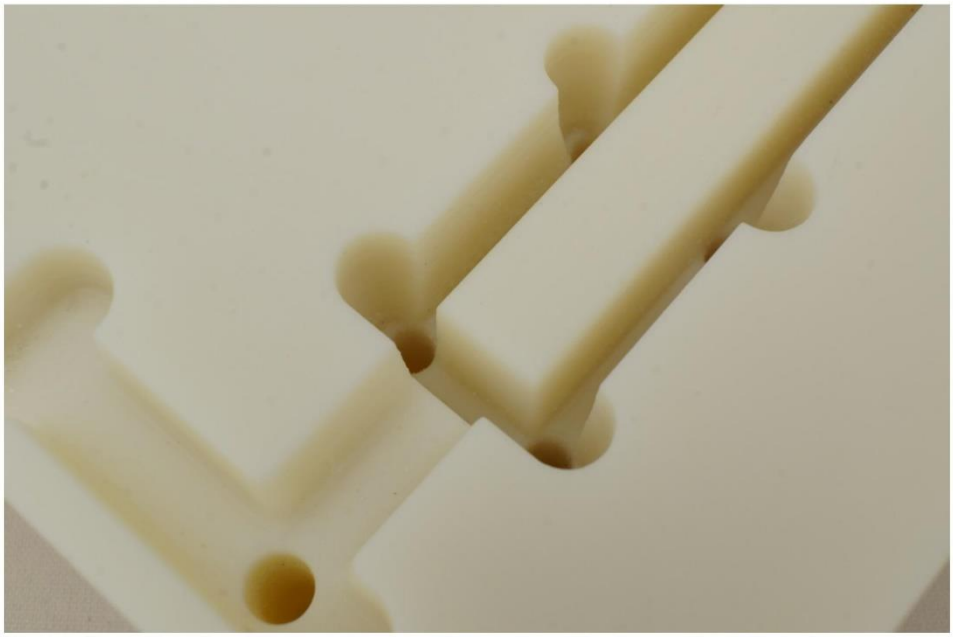
- God geometrisk oppløsning (detaljeringsgrad) og gode toleranser
- God overflatefinish (lav ruhet og lite markante "trappetrinn" (avhenger av valgt lagtykkelse og type additivmaskin)
- Høy stivhet

Samtidig har materialet noen vesentlige ulemper:

- Høy pris
- Sprøtt (lav bruddforlengelse i strekk)

Det har vist seg at dette materialet fungerer bra når man vil lykkes med å få fine, nøyaktige produkter. Samtidig har det vist seg utfordrende at materialet har lett for å sprekke opp ved strekkbelastning. Bruken av materialet har lyktes best ved forholdsvis små formdeler. Bruk i kombinasjon med Alumide, hvor kun kritiske flater støpes i PerFORM-innsats, har vist seg å fungere bra.

For å unngå sprekkdannelse må man redusere spenningskonsentrasjoner i strekk, d.v.s. benytte radier etc. Videre er det viktig at "slippflatene" har tilstrekkelig slippvinkel, og ikke har trappetrinn eller andre strukturerer som støpeplasten kan "gripe fast i" ved avforming. Permanente slippbelegg basert på visse silikonoljer har vist seg å redusere problemer ifm avforming.

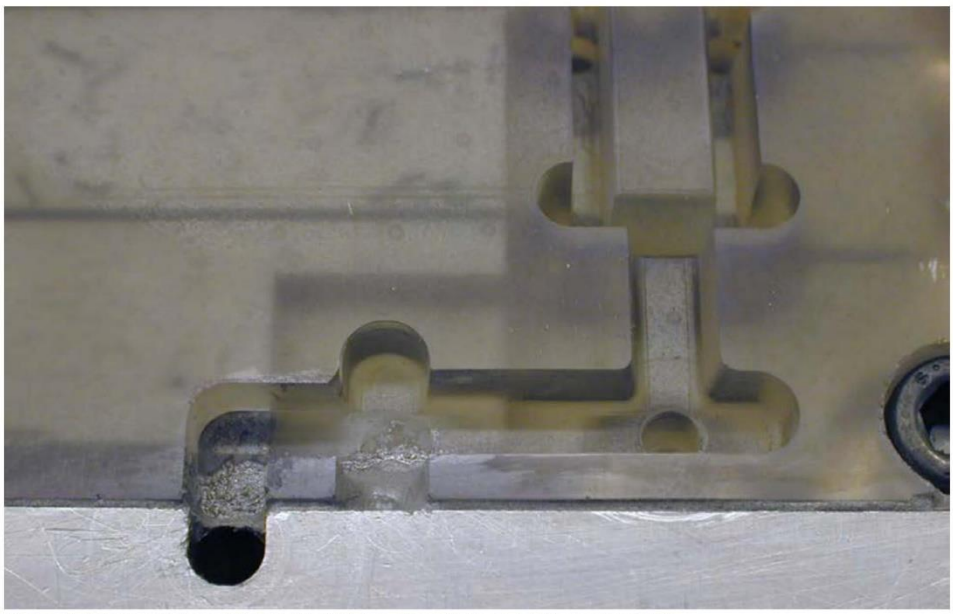


Figur 7. Normal overflate i PerForm (d.v.s. overflaten er bare "blåst" på vanlig vis for å glatte ut trappetrinn og fjerne visse stripedefekter som kan oppstå i overflaten som vendte opp i SLA-prosessen). Legg merke til visse trappetrinn på de vertikale flatene.

HighTemp (fra Formlabs)

HighTemp er et herdeplastmateriale som er utviklet for å bygges i den rimelige SLA-maskinen FormLabs Form 2. Materialet er forholdsvis lite benyttet i AddForm, men der det er benyttet har det gitt gode resultater. Det bygges altså i en SLA-prosess, og får dermed lav overflateruhet og god nøyaktighet. Ulempen med materialet er at det er sprøtt. Samtidig er en annen viktig egenskap at maskinen materialet bygges i er meget billig (omkring 40 kNOK), slik at investeringsbehovet for å muliggjøre bygging av former internt i bedriften er lavt.

I etterkant av byggeprosessen er det nødvendig å herde materialet med UV-lys for å oppnå best mulig termomekaniske egenskaper.



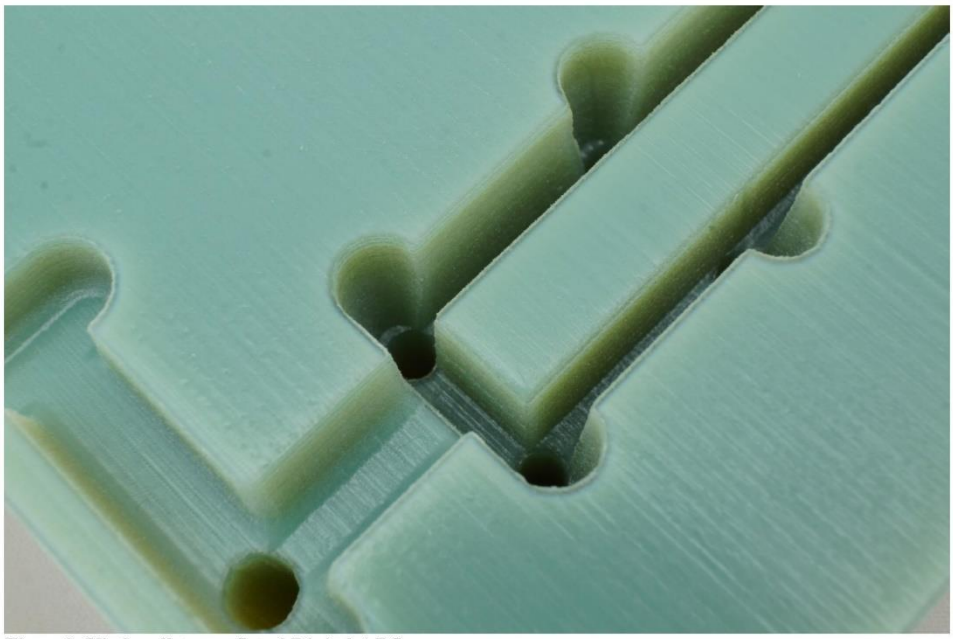
Figur 8. Ubehandlet overflate i HighTemp. Stamformen i stål sees nederst.

Digital ABS (fra Stratasys)

Digital ABS er et herdeplastmateriale som er utviklet av Stratasys for å kunne "imitere" ulike andre materialer. Materialet er markedsført for bruk til formverktøy, og det finnes mange eksempler på dette på nettet. I AddForm har materialet likevel blitt lite benyttet fordi:

- Kostnaden for bestilte deler er høy
- Overflaten fra maskin er middels god (synlige laglinjer)
- Temperaturbestandigheten er middels til dårlig
- Resultat fra støpeforsøk var dårligere enn for konkurrerende materialer (Alumide og PerFORM)

Samtidig er det viktig å merke seg at mange har lyktes med å benytte materialet til forminnsatser, så dersom man har tilgang på utstyr bør materialet vurderes. Permanente slippbelegg som nevnt for PerFORM bør også fungere for dette materialet.

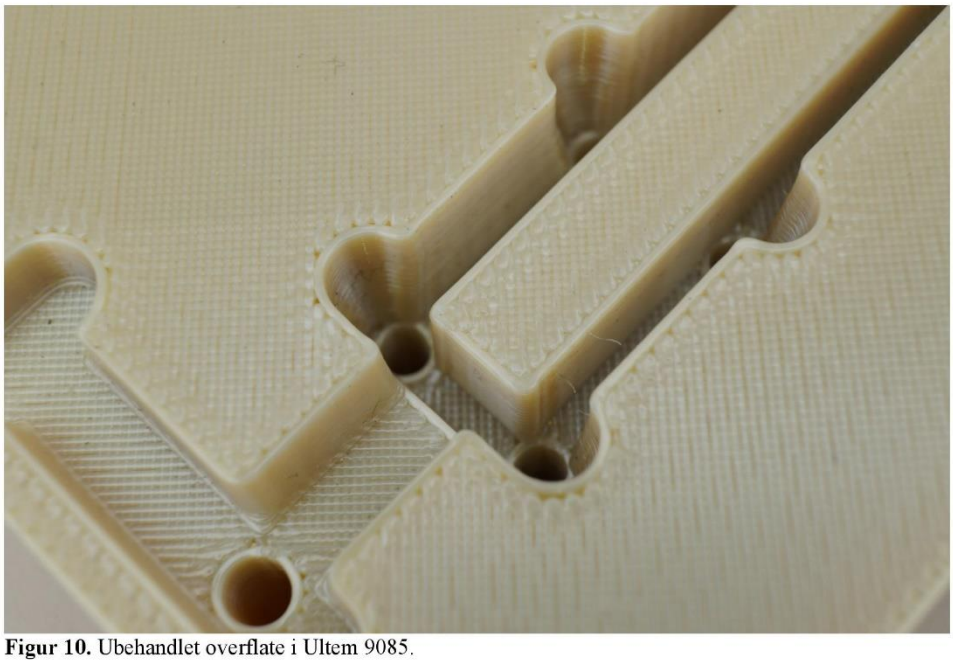


Figur 9. Ubehandlet overflate i Digital ABS.

Ultem 9085 (fra Stratasys)

Ultem 9085 er et materiale som bygges med FDM-teknologi. Dette fører til tydelige laglinjer og baner, samt ganske anisotrope egenskaper. Samtidig er materialet svært temperaturbestandig, og det er i utgangspunktet mulig å pusse det slik at overflaten blir god.

På grunn av den ugunstige overflaten, høy pris og dårlige resultater fra stopeforsøk, har ikke dette materialet blitt benyttet vesentlig i AddForm-prosjektet.



Figur 10. Ubehandlet overflate i Ultem 9085.

5 Formkonstruksjon

Dette kapittelet oppsummerer anbefalinger knyttet til formkonstruksjon, som er basert på erfaringer gjort i prosjektet. Anbefalingene er av en forholdsvis generell art, slik at det fortsatt er store krav til formkonstruktøren.

Bruk av moderform

For effektiv utnyttelse av AddForm bør det lages én eller flere moderformer. Med moderform menes en ytre form som omslutter forminnsatsene som er laget av plast, og som bl.a. har føringer og tilkobling til løpet fra støpemaskinen. Moderformen har som oppgave å både ta opp lukketrykket, og å hjelpe formdelene i plast med å ta opp støpetrykket. I tillegg kan utformingen av moderformen med fordel være slik at innsatsene blir minst mulig, og at kostnadene dermed holdes nede.

For produsenter med svært lik størrelse på komponentene, kan det være hensiktsmessig å lage en moderform tilpasset en fast størrelse. Dersom det er aktuelt å støpe komponenter i varierende størrelser bør det benyttes en eller flere moderformer med fleksibel innfesting, slik at den på en enkel måte kan tilpasses til forskjellige innsatsstørrelser.

Valg av formmaterialer

For å kunne bruke forminnsatser produsert ved additiv tilvirkning er det viktig at det ikke er for høye og tynne kjerner. Dette blir spesielt kritisk for materialer som trenger høy temperatur og/eller høyt trykk. Se for øvrig kapittel 3 for øvrige begrensninger.

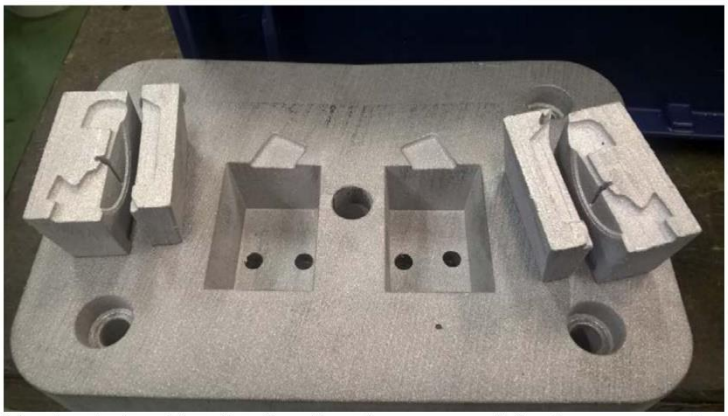
Dersom det er behov for veldefinerte konturer og/eller en visuelt fin overflate, er PerFORM anbefalt materiale. Dette er forholdsvis dyrt, så det bør isteden velges Alumide der dette er tilstrekkelig. Alumide tåler også høyere/tynnere kjerner enn PerFORM siden det er seigere. Dersom det er behov for kjerner med høyde-bredde-forhold vesentlig over 1, eller det er områder som forventes å være spesielt utsatt for slitasje, bør det vurderes å benytte enkeltkomponenter i aluminium.

Figur 11. Samme del sprøytestøpt med to ulike formmaterialer. Deelen til venstre er støpt i PerFORM, mens delen til høyre er støpt i Alumide.

Det er også viktig å se på hva som skjer med formrommet nær innløpspunktet. Dersom materialflyten umiddelbart etter innløpet flyter over tynne formkjerner, eller skarpe hjørner, vil disse kunne brytes ned raskt. De bør da lages av et mer varmebestandig materiale (som PerForm eller aluminium) eller man må konstruere inn lokale småinnsatser for å kunne skifte ut disse etter et antall støp. Det kan da være snakk om kun 5-10 støp før disse er vesentlig nedbrutt. Valg av innløpspunkt, innsprøytningshastighet og massetemperatur har innvirkning på disse utfordringene.

Oppdeling av form

AddForm gir en unik mulighet til å dele opp formene på en enkel måte. Ved å dele opp på riktig måte kan man avforme manuelt ved å plukke av flere deler og dermed gjøre avformingen enklere. Man kan også lage løse deler til utsatte områder, slik at man på en rimelig måte kan ha flere reservedeler til disse områdene.

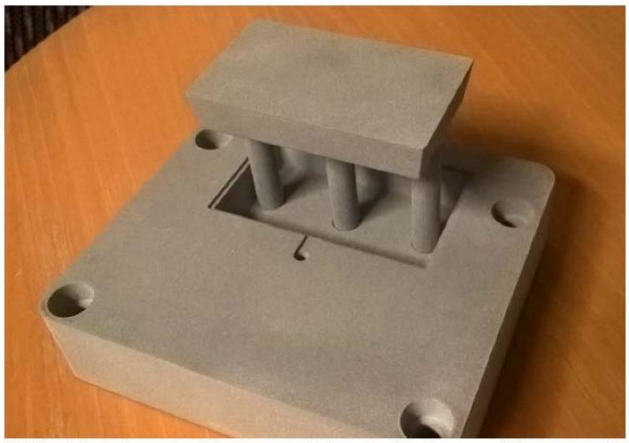


Figur 12. Bildet viser innløpssiden til en form for to komponenter. Selve formrommet er laget som to separate deler. Begge disse delene følger med produktet når verktøyet åpner. Formdelene plukkes manuelt løs fra produktet etter utstøt.

Figur 13. På kompliserte former kan det være nødvendig med et stort antall løse deler.

Bruk av utstøtere

I mange tilfeller er det gunstig å utnytte fordelene med additiv tilvirkning av utstøtere. Istedenfor de tradisjonelle runde utstøterne kan det produseres utstøtere som følger produktfasongen. For å unngå unødvendig tilpassingsjobb, bør disse lages med 5-10° kon ned i hovedinnsatsen. Stålpinner eller pinner produsert med AM kan brukes som forlengere ned mot utstøterplatene, og det er også mulig å produsere utstøterplate og pinner som en massiv komponent ved hjelp av AM.



Figur 14. I dette tilfellet ble hele undersiden av produktet brukt til utstøt. Pinnene ned til utstøterplate ble også printet. Men merk at dersom dette øker byggehøyden på printjobben, kan det være fordyrende. Da kan løse stålpinner være bedre enn de printede pinnene.

Ved bruk av tradisjonelle utstøterpinner er det bedre å bruke glatte stenger uten hode. Hvis man ikke kan skyve inn utstøterpinner med hode fra samme siden, kan disse skyves inn fra framsiden av formen, og det er ikke behov for å maskinere hull i utstøterplatene. Merk at man da må skyve tilbake utstøterne manuelt for hvert støp.

Kompensering for deformasjon

Polymerbaserte forminnsatser vil i mange tilfeller deformeres noe på grunn av sprøytetrykket. Det er svært vanskelig å kalkulere denne effekten, siden den vil variere i forhold til lokalt trykk (høyest nærmest innløpet) og formens geometri for øvrig (større veggtykkelse ut til metallform gir større deformasjon).

Som eksempel kan vi nevne SLS-materialet Alumide, som er et relativt mykt formmateriale. Der vil man typisk kunne få en utbøying av formen på 0-0,5 mm. De fleste vegger vil man kunne holde innenfor 0,2 mm avvik. Det er viktig å være klar over dette. Hvis man gjør styrketester eller andre tester der godstykkelsen har betydning, bør man måle tykkelsen på den støpte delen for å se hvilket grunnlag man har testet.

For å kompensere for disse avvikene bør det først lages en nominell form først som prøvestøpes, og om nødvendig lages en ny formhalvdel som kompenserer for avviket. Dette vil øke formkostnaden, og bør begrenses til mindre utskiftbare innsatser. Alternative løsninger er å lage flere innsatser for forskjellige tykkelser, og da velge den som gir best resultat under test, eller å lage innsatser med maskineringsmonn som kan tilpasses etter prøvestøp.

Valg av slippside

Å bestemme slippside er litt ulikt med polymerbaserte formdeler enn med metallformer. I metallformer vil støpet krympe rundt kjernedeler og dermed trekke seg bort fra kavitetene. I AddForm får vi to andre forhold som spiller inn. Det ene er at formdelene fjærer unna ved innsprøyting. Dette gjør at selv etter at støpet har fryst, vil det fortsatt være et fjærspenn fra formen mot produktet. Dette tar bort effekten av at støpet krymper bort fra kavitetene. I tillegg har vi en viss grad av vedheft mellom formmateriale og støp. Dette varierer med kombinasjonen av materialer, men oppleves i noen grad ved de fleste materialkombinasjoner.

For å motvirke vedheften kan det legges på et permanent slippbelegg. Vi har funnet fram til en del gode, raske og rimelige løsninger, f.eks. et belegg basert på en spesiell silikonolje og diverse kommersielle belegg som f.eks. "nano mold coating". Man kan til en viss grad påvirke hva som blir slippside ved bruke av slike slippmidler, men i noen tilfeller er man nødt til å bruke fysiske utdragere som trekker støpet med til rett side.

"Bakfylling" og forsterkninger

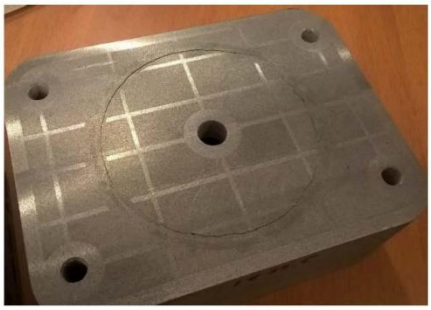
De fleste additivteknologier gjør det vanskelig å lage massive deler uten at det blir stor deformasjon av komponenten. Derfor bør formdelene lages som tynne skall på noen få millimeter tykkelse, og dette kan så fylles opp med et fyllstoff. Det er dette vi ofte kaller «bakfylling».

Funksjonen til dette bakfyllet er å unngå at form-rommet svikter eller bryter sammen når sprøytetrykket kommer på. Derfor er den viktigste egenskapen i bruk at fyllstoffet har stor stivhet og kan motstå høyt trykk. I tilvirkningsprosessen er det selvsagt også viktig at det er enkelt og raskt å fylle opp med, samt at det ikke krymper nevneverdig under herdingsprosessen.

For å redusere herdetid og krymp-effekt, bør baksiden av innsatsene rutes opp i separate lommer som vist på bildene til høyre.

I noen tilfeller er det også hensiktsmessig å legge inn metallforsterkninger for man fyller på med fyllstoff. På bildet til høyre er det lagt inn en stålring, men det kan også være skruer, stenger, eller også freste jern.

Selve fyllstoffet kan være mange ting. Vi har fått best resultat med epoxy med tilsetningsstoffer. Vi har brukt plastgranulat for å drøye ut blandingen, men glass-, eller metallpartikler gir en større stivhet.



Etter tilsetning og herding av bakfyllet, må baksiden freses av for å få et rett anlegg mot moderformen. Det nederste bildet til høyre viser baksiden av en forminnsats etter at den er frest og klar til bruk.

Innløp

Innløp er et kritisk punkt for polymerbaserte formdeler. Et tradisjonelt innløp er gjerne trangt for å gi et minimalt brudd og kunne skilles automatisk fra produktet. Dette gir høyt trykk, høy friksjon og derfor også høy temperatur i dette punktet. I AddForm bør det heller benyttes direkteinnløp med liten eller ingen innsnevring. Dette må klippes av etter støping. Alternativt kan det benyttes direkteløp ned på produktet, som også må klippes av etter støping. Dersom det er helt nødvendig med selvkuttløp, eller svært lite innløpspunkt, må det benyttes en lokal innsats i metall.

Lufting

For polymerbaserte formdeler, er styrt evakuering av luft/gass fra formrommet enda viktigere enn for tradisjonelle former. Siden disse formdelene har langt lavere stivhet (E-modul) enn stålinnsatser, vil de presses sammen ved formlukking, og man kan få et deleplan som er svært godt forseglet. For å hindre at trykket blir for stort, eller at gassene finner uønskede veier, bør det konstrueres luftevakuering i formdelene. Siden deleplanet ofte trykkes noe sammen, bør evakueringsspor lages dypere enn for tradisjonelle former. Dette kan gi noe støpeskjegg som må skjæres bort etter støping.

Pressmonn

I mange tilfeller må det benyttes fullt lukketrykk på maskinen, selv om man gjerne bruker et lavere innsprøytingstrykk. (Plastformene tåler ikke like stort trykk som stålformer, så man må gjøre tilpasninger i prosess og utforming slik at man kan redusere trykket.) Man ender gjerne opp i 50-75% av det lukketrykk man ville behøvd til tradisjonell støping av samme del. Denne reduksjonen kan gjerne brukes til å støpe større deler enn maskinen normalt vil kunne klare (gitt at den likevel har nok dosering).

Vi har sett videoer der man kun bruker polymerbaserte innsatser til å ta opp lukketrykket. Med maskinene som befinner seg på OMBE Plast er ikke lukkepunktet presist nok til at dette er anbefalt. Det bør derfor alltid være ståldeler som treffer hverandre, slik at lukkepunktet blir entydig definert for hvert skudd. Det kan gjerne være et pressmonn (forspenn) på de polymerbaserte innsatsene på 0.1-0.2 mm. Merk at et slikt forspenn vil bidra til å forsegle deleplanet, og dermed gir et økt behov for konstruksjon av luftevakuering.

Anbefalinger fra DSM Somos for bruk av PerForm:

- Bruk av moderform er anbefalt
  - Dersom det benyttes moderform med faste sider, bør forminnsatsen ytterkant bygges med overmål og freses
- Slippvinkler bør være på minimum 2° (3° for boss)
- Bruk stålinnsatser for gates, spesielt dersom støpeplasten er glassfyllt eller lignende
- Utstøterhull bør bygges med undermål og brotsjes

Anbefalinger fra Stratasys for bruk av Digital ABS:

- Bruk av moderform er anbefalt
  - Dersom det benyttes moderform med faste sider, bør forminnsatsens ytterkant bygges med overmål og freses
  - Bygg forminnsatsen 0.2 mm høyere enn lommen i moderformen
- Slippvinkler bør være på minimum 5°
- Det bør benyttes radius i indre hjørner
- For "shut-off"-flater for detaljer som er høyere enn 6 mm bør det settes en avstand mellom kavitet og kjerne på 0.05 – 0.1 mm
- Bruk metallpinner som forsterkning av høye kjerner (høyde-bredde-forhold over 3:1)
  - Hull til metallpinner bør lages med undermål og brotsjes
- Hull som er mindre enn 0.8 mm må bores opp (ikke bygges additivt)
- Skalér formen for å kompensere for plastens krymp
- Design "gate" for reduserte skjærkrefter i kaviteten
  - "Sprue", "modified-fan", "edge", "tab" eller "external-ring" er foretrukne utforminger

- Størrelse på gates bør være omtrent 3 ganger så store som for stålverktøy
- Anbefaler normalt sprue gate på 5 – 8 mm for komponenter mindre enn 100x50x25 mm, med 1-2 mm veggtykkelse
    - For plaster med høy viskositet bør diameter økes til 8 – 9 mm
- Unngå å benytte "varme løp"
- Utstøterhull bør bygges med 0.2 – 0.3 mm undermål og brotsjes
- Utstøterhull bør plasseres minimum 3 mm fra formens ytterkant
- Kjøling av form kan bygges inn for forlenget levetid

6 Formproduksjon

Maskinering og tilpassing av formdeler

For å holde kostnadene nede, er det viktig å redusere behovet for maskinering til et minimum. I mange tilfeller kan det være gunstig å modellere åpninger på opptil 0.2 mm mellom forskjellige deler for å unngå tilpasning. Dette vil kunne gi støpeskjegg, men dersom det er snakk om et lite antall prototyper, er det billigere å skjære bort støpeskjegg enn å tilpasse formdeler.

En teknikk som kan redusere behovet for tilpasning, men samtidig gi god tetting mellom delene, er å bruke koniske kontaktflater mellom formdelene. Da vil lukketrykket eller sprøytetrykket kunne presse delene sammen, og selv om det egentlig er for trangt, vil materialet svikte unna nok til at delene kommer på rett plass. (se bilde til høyre)

De fleste printede materialer kan maskineres med tradisjonelle verktøy som bor, fres, brotsj og fil. Men merk at brotsjing av hull kan være vanskelig, siden mange materialer har en tendens til å svikte litt unna, slik at resultatet blir et mindre hull enn det man vil få i stål.

Anbefalinger fra DSM Somos for bruk av PerForm:

- Dersom formhulrom og kjerne bygges med orientering opp, bør det legges på 0.1 – 0.2 mm på tilstøtende flater som maskineres bort for best mulig shut-off
- Dersom det er kurvede tilstøtende flater på formhalvdelene bør de bygges stående på siden for å redusere etterarbeid
- Benytt minst mulig lagtykkelse dersom det er strenge krav til overflatedetaljer og ruhet
- Ved mindre krav til detaljering kan det benyttes lagtykkelse på 0.1 mm
- Fres eller slip ytterkant av forminnsats dersom det benyttes moderform med faste sider
    - Det anbefales å bruke HM ved maskinering på grunn av harde partikler
    - Pinnefreser med 3 eller 4 skjær
    - Benytt høy spindelhastighet og lav mating
    - Anbefalt kuttdybde er 0.5 – 0.7 mm
    - Det bør ikke benyttes oljebaserte kjølevæsker
- Høyden på forminnsats børe være 0.2 – 0.5 mm mer enn dybden på moderformens hulrom
- Benytte smergel 180 – 220 og eventuelt 320 – 400 for pussing av områder som skal ha glatt overflate
- Ved behov for polering anbefales vannbaserte polermidler, f. eks. Wrights Silver Cream
- Bruk overflatebehandling med silikonbasert olje

Anbefalinger fra Stratasys for bruk av Digital ABS:

- Bygg med formhulrommet opp
- Bygg deler slik at "byggelinjer" er i samme retning som materialflyten i formen
- Benytt innstillingen "Glossy"
- Benytt materialparameterene RGD5160-DM eller RGD5130-DM
- Benytt smergel 180 – 220 for pussing av laglinjer som er på tvers av utstøterretningen
- Benytte smergel 180 – 220 og eventuelt 320 – 400 for pussing av områder som skal ha glatt overflate
- Brotsje hull til metallpinner for kjerneforsterkning og utstøterpinner (anbefalt H7 toleranse)
- Fres ytterkant av forminnsats dersom det benyttes moderform med faste sider
- Sjekk at forminnsats er 0.2 mm over moderform
- Eventuelt tilpass med fresing eller bruk av skims under forminnsats

7 Støpeprosessen

Innkjøringsprosess

Innkjøringen bør planlegges bedre enn for tradisjonelle former. På grunn av formens begrensede ytelse og levetid, er det viktig å finne de rette parameterne før man har påført betydelig slitasje. Et viktig punkt for å oppfylle dette, er å beregne produktvolumet ved hjelp av dataverktøy og så stille inn maskinens doseringsslag svært nær dette volumet for første skudd.

For tradisjonelle støpeformer er det ofte kritisk å varme opp formdelene til riktig formtemperatur. Dette for å klare å fylle formrommet, samt å unngå for rask avkjøling av enkelte materialer (kan f.eks. gi for lav krystallinitetsgrad). Dette er ikke like kritisk for polymerbaserte formdeler, da disse har langt lavere varmeledningsevne enn metalldeler, og de vil derfor ikke trekke varmen så raskt ut av smelten. Dette gjelder også om formdelene har romtemperatur ved oppstart. Dersom man ligger helt i grenseland med å klare å fylle formen, kan det bli litt enklere når formdelene har blitt litt varmet opp etter et antall skudd. Formdelene har fortsatt en varmeledningsevne, selv om den er betydelig lavere enn stål.

Støpeparametere

Det er viktig å være oppmerksom på temperaturbildet når man støper i AddForm. Polymerbaserte former har en langt lavere varmeledningsevne enn tradisjonelle formmaterialer. Dette betyr:

- Man kan bruke lavere trykk for å fylle formen, siden materialet kjøles i mindre grad.
- Kjøletiden pr støp blir lenger, siden varmen trekkes langsommere ut fra produktet.
- Formtemperering er ineffektivt, og den beste måten å kjøle formdelene på, er å bruke trykkluft mellom støpene.

Tiden er også viktig. Selv om støpene må stå lenger før de kan støtes ut, bør man være forsiktig med å ha for lange kjøletider hvis man har sårbare kjerner. Hvis støpet blir for kaldt, kan bindingen mellom formmaterialet og støpet bli for sterk, og man får brudd ved avforming.

Trykket bør generelt holdes lavere enn i tradisjonelle former. Dette muliggjøres også at den lavere varmeovergangen. For stort trykk kan føre til brudd i kjerner eller til og med sprekker i selve kavitetene.
Ved bruk av myke formmaterialer (for eksempel Alumide), er ettertrykk lite anvendelig, da formveggene gjerne svikter og man sprenger ut formen litt. Når støpet krymper, trekker formveggene seg sammen igjen, og man opplever ofte at det blir lite synkmerker på støp i slike former. Det er viktig å være klar over denne effekten.

7.1 Anbefalinger fra materialprodusenter

Anbefalinger fra Stratasys for bruk av Digital ABS:

- Bruk normal lukkekraft dersom det benyttes moderverktøy
- Benytt rikelig med silikonbasert slippmiddel
- Startparametere for innkjøring
  - Innsprøytningstid: 20 s
  - Holdetrykk: 0 psi, 0 s
  - Skuddvolum: 75% av kavitetens volum
  - Løptemperatur: På nedre grense for plasten som skal støpes
  - Innsprøytningshastighet: Nedre grense for plasten som skal støpes
  - Kjøletid: Avhengig av materiale
- Åpne formen så raskt som mulig, men etter at delen har størknet 100%, for å unngå for mye krymp
  - Dersom delen blir for kald kan formen ødelegges på grunn av kreftene som oppstår når delen skal presses ut
- Vent til formtemperatur er under 50 °C mellom støp
- Blås på formkavitet med trykkluft for å senke temperaturen raskere
- Justering av prosess
  - Øk skuddvolum til 90% av kavitetens volum og holdetrykk til 30 – 50% av innsprøytningstrykk
  - Korriger parametere med utgangspunkt i resultat

Anbefalinger fra DSM Somos for bruk av PerForm:

- Normal syklustid er 60 – 120 sekunder
- Blås på formen med trykkluft for å kjøle den
- Benytt slippmiddel tilpasset aktuell støpeplast
- Benytt lavest mulig lukketrykk for å redusere risiko for skade av form
- Unngå for høyt holdetrykk
- Bruk moderat innsprøytningshastighet

8 Kjente utfordringer

Nedsmelting/nedbryting av formdeler

Nedsmeling av formdeler er et problem som typisk oppstår spesielt ved skarpe, utvendige hjørner, eller i andre områder som er utsatt for stor slitasje i form av abrasiv slitasje fra smelten som passerer området i kombinasjon med høy temperatur. Nedsmeltingen skjer gjerne gradvis over flere støpesykler, slik at deler som kommer ut tidlig kan være av OK kvalitet, mens deler som kommer ut senere kan være for dårlige.

Aktuelle løsninger på denne utfordringen kan inkludere:

- Lag flere ekstra forminnsatser for områder som er spesielt utsatt for slitasje
- Benytte et formmateriale som er mer holdbart (PerFORM er eksempelvis mindre utsatt for denne slitasjen, mens maskinerte deler i aluminium er enda mindre utsatt)
- Bruk mindre aggressive støpeparametere, ved eksempelvis å redusere innsprøytningshastighet dersom det er mulig. Stor hastighet øker friksjonsvarmen og er med på å forsterke nedsmeltingen.
- Øk nedkjølingstid mellom støp. Bruk trykkluft til å kjøle ned de mest utsatte områdene.
- Gjør tilpasninger på den støpte delens geometri (er det mulig å droppe skarpe hjørner?) eller materiale (er det mulig å benytte et materiale med bedre flytegenskaper?) som kan redusere slitasjen på formen

Sprekker i formen
Sprekker i formen kan inntreffe både ved formtilpasning og under støpeprosessen. For førstnevnte vil mulige scenario være at innsatsen enten påføres spenninger ved maskinering (eksempelvis ved brotsjing av utstøterhull), eller at den påføres spenninger ved innfesting i formen (eksempelvis ved at festeskruer strammes for hardt). Under støpeprosessen kan sprekker inntreffe både som en konsekvens av spenninger som oppstår på grunn av lukketrykket eller støpetrykket eller ulik varmeutvidelse av ulike formdeler og på grunn av. Ofte er avformingen det kritiske trinnet som gir sprekker. Erfaringer fra prosjektet tilsier at materialene PerFORM og HighTemp er sprøe og forholdsvis utsatt for oppsprekking, mens Alumide er mer duktilt og lite utsatt for oppsprekking.

Aktuelle løsninger på denne utfordringen kan inkludere:
- Unngå sprøe formmaterialer der det ikke er nødvendig
- Sikre at forminnsats har god utvendig støtte i moderform
- Ikke bruk for stort pressmonn på forminnsatsene
- Bruke mindre aggressive støpeparametere
- Benytt riktig verktøygeometri ved maskinering i sprøe materialer
- Unngå unødvendig høyt tiltrekkingsmoment ved innspenning av forminnsatser i moderform

Knekte kjerner
Knekking av kjerner er et kjent problem ved bruk av AddForm, og det er avdekket tre distinkte feilmodi:

1. Knekking av kjerner på grunn av ujevnt trykk rundt kjernen i støpeprosessen
2. Knekking av kjerner ved avforming på grunn av at kjernene har blitt avbøyd under støpeprosessen
3. Avriving av kjerner ved avforming på grunn av høy effektiv uttrekkskraft fra støp på kjerne (forårsaket av høy vedheft, høy friksjon, kompresjon av kjerne etc)

Aktuelle løsninger på denne utfordringen kan inkludere (feilmodi i parentes):
- Øk slippvinkel på kjerne (1, 2, 3)
- Øk bunnradius på kjerne (1, 3)
- Slippbelegg eller -spray (f. eks. Mouldpro Nanomoldcoating) på kjerne (3)
- Planlegg plassering av innløp slik at tendensen til ujevnt trykk rundt kjerne reduseres (1, 2)
- Bytt til annet formmateriale (1, 2, 3)
- Produser utsatte kjerner i metall (1, 2, 3)

Dimensjonsfeil
I tillegg til krympproblematikk, som også oppstår ved konvensjonelle former, er det flere andre elementer som fører til dimensjonsfeil ved bruk av AddForm:
1. Unøyaktigheter etter produksjon i AM-maskin
2. Avbøyning av formdeler på grunn av støpetrykk
3. Kompresjon av AM forminnsats på grunn av støpetrykket
4. Nedbrytning av formdeler på grunn av abrasiv slitasje i høy temperatur, se tidligere punkt

Aktuelle løsninger på denne utfordringen kan inkludere (feilmodi i parantes):
- Benytt en mer nøyaktig AM-prosess (SLA er typisk mer nøyaktig enn PBF) (1)
- Produser forminnsatsene som tynne skall, og bruk stivest mulig bakfyll (1, 2, 3)
- Lag forminnsatsen minst mulig (kort vei ut til støtte i moderform) (2, 3)
- Legg inn avstivende elementer i bakfyll (2, 3)
- Unngå å bruke "pute" i støpeprosessen, da puten typisk absorberes gjennom (2, 3)
- Bruk mindre aggressive støpeparametere (2, 3)
- Bruk et stivere AM-materiale (2, 3)
- Produser innsatser for kritiske toleranser i metall (2, 3)

- Produser en form, gjør prøvestøp, og produser en ny form med kompensering for avvik (1, 2, 3)

Kraftig støpeskjegg
Støpeskjegg kan inntreffe dersom det er for lite trykk mellom formhalvdelene. Ved bruk av AddForm med moderform vil lukketrykket primært tas opp av formhalvdelene i moderformen. Det er derfor viktig å ha riktig pressmonn på forminnsatsene.

Deler har feil slippside eller sitter fast i støpeformen
I motsetning til ved konvensjonelle former kan plastformer få en betydelig kompresjon under støpeprosessen. Når produktene krymper ved nedkjøling vil kompresjonen til formen reduseres, men i enkelte tilfeller vil den ytre formhalvdelen beholde noe trykk inn mot delen. Dette kan enten føre til feil slippside, utfordringer med å få ut delen, og/eller skade på formen.

Aktuelle løsninger på denne utfordringen inkluderer:
- Bruk slippmiddel (for eksempel Mouldpro Nanomoldcoating)
- Øk slippvinkler på formdeler
- Konstruer forminnsatsen slik at den kan plukkes fra hverandre ved avforming
- Bruk mindre innsprøytingstrykk og/eller ettertrykk i støpeprosessen.

9 Leverandører benyttet i AddForm

Det finnes en lang rekke servicebyråer som kan benyttes for å bestille plastdeler produsert ved additiv tilvirkning. Disse selskapene strekker seg fra store internasjonale bedrifter (f. eks. Materialise) til mindre nasjonale og lokale bedrifter. Opplistingen under viser noen større og mindre selskaper som har vært benyttet i AddForm-prosjektet, og materialene deres.

Merk at denne opplistingen ikke innebærer en anbefaling av de nevnte leverandørene i forhold til andre leverandører.

Bedrift	Land	Relevante materialer hos leverandøren	Benyttet i AddForm labarbeid	Benyttet i AddForm casearbeid
Nordic 3D	Norge	Alumide	Ja	Ja
ProNor	Norge	VisiJet M3 X	Ja	
Materialise	Belgia	Alumide, PerFORM, Ultem 9085	Ja	Ja
The SL Pro	Tyskland	PerForm	Ja	Ja
Digital Mechanics	Sverige	Digital ABS, Ultem 9085	Ja	
Laser Prototypes Europe	UK	CeraMAX, PerFORM, NanoTool, Alumide	Ja	
Rauch CNC Manufactur	Tyskland	PEEK HP3	Ja	
CRP Technology	Italia	Windform GF 2.0. Windform LX 2.0	Ja	
Acron Formservice	Sverige	PA 615-GS	Ja	

Tabell 4 Benyttede AM-leverandører i AddForm-prosjektet

Vedlegg 2 – Tillatelser

Gjengivelse av «Figur 2: Prusa i3 MK2s komponentforklaring»

From :"Giuliano Dipoppa" <info@prusa3d.com>
Sent :02.05.2019 16.35.07
To :"Cato Engebakken" <catoen@stud.ntnu.no>
Subject : System.String[]
Dear Cato,
We gladly grant our permission to use picture of the Prusa i3 MK2S, and we appreciate that you asked before move forward with your project.
Kind regards,
Giuliano Dipoppa
Customer Support
PRUSA Research
+420 222 263 718
+421 220 570 305
188/7a Partyzánská, 17000, Prague
shop.prusa3D.com
For simple troubleshooting, please use: http://help.prusa3d.com

On May 2, 2019 3:12 PM CEST catoen@stud.ntnu.no wrote:

Hi!

I am a student at NTNU Norway in my last semester. In our Bachelor we are using your Prusa i3 MK2s. We are awere of the regulations regarded using photos in research reports. This is a request to use the printer description picture in your online manual; (https://prusa3d.com/downloads/manual/prusa3d_manual_mk2s_en.pdf#_ga=2.130352719.1184293430.1556801447-296975779.1550069058 pic. 1 – page 8). This Picture will only be used to explain the main components the printer includes.

If you agree with this we will add the confirmation mail to our apendix in the Bachelor report.

Best regards
Cato Engebakken

Gjengivelse av «Figur 3: Form 2 – Hoved komponenter»

Fra: support@formlabs.com
Sendt: fredag 3. mai 2019 kl. 15.46
Emne: Request to use Form 3 printer component picture [ref:_00Di0dMD6._5001Y1EiGTC:ref]
Hi Cato,

Thank you for contacting us in regards to using the picture published on our website in your research report.

You're welcome to use the printer components' picture from our quick start guide. We kindly ask you to attribute credits to us (i.e. please add "Credits: Formlabs" under the picture).

I hope this helps and I stay at your disposal for any further questions.
Thank you.

Best regards,
Mara Bisceglie
Formlabs Services | Customer Care

Sign up for our free Introduction to The Form2 and Preform in English or German.

Manage your prints and get print status notifications on Formlabs Dashboard. Register today!

Formlabs GmbH - Funkhaus Berlin - Nalepastr 18 12459 Berlin - HRB 166201 B - DE299521578 - Managing Directors: Luke Winston, Stefan Holländer

ref:_00Di0dMD6._5001Y1EiGTC:ref

Original request for Case #00226199:

Hi!
I am a student at NTNU Norway in my last semester. In our Bachelor we are using your Form 3. We are awere of the regulations regarded using photos in research reports. This is a request to use the printer component picture in your online quick start quide; (https://support.formlabs.com/s/article/Quick-Start-Guide?language=en_US). This Picture will only be used to explain the main components the printer includes.

If you agree with this we will add the confirmation mail to our apendix in the Bachelor report.

Best regards
Cato Engebakken

Bruk av «Guide til AddForm» som vedlegg

Fra: Knut Richard Kviserud <krk@ombe.no>
Sendt: onsdag 15. mai 2019 11:46
Til: Marius Gårdsrud Hole
Emne: SV: Guide til AddForm

Hei Marius.

Det er OK. Dere kan bruke «Guide til AddForm» som vedlegg.

Mvh
Knut Richard Kviserud
AS OM BE Plast
Tlf 915 38 534

Fra: Marius Gårdsrud Hole <mariusrj@stud.ntnu.no>
Sendt: onsdag 15. mai 2019 11.45
Til: Knut Richard Kviserud <krk@ombe.no>
Emne: Guide til AddForm

Hei.

Vi jobber med Bacheloroppgaven vår ved NTNU Gjøvik, som omhandler additiv formproduksjon av støpeformer.

Vår veileder; Harald Jøsendal har latt oss bruke "Guide til AddForm" som en veiledning under prosjektet. Denne har vi tidvis referert til i vårt dokument. Vi ønsker derfor å legge ved "Guide til AddForm" i vårt Bachelor dokument, men trenger tillatelse for dette.

Mvh. Marius G. Hole

Vedlegg 3 – Prisoverslag Topro AS

Fra: Espen Moldal <Espen.Moldal@topro.no>
Sendt: Wednesday, May 8, 2019 11:27:04 AM
Til: Cato Engebakken
Emne: SV: Uforpliktende prisoverslag (Bachelor oppgave NTNU Gjøvik)

Hallo
Vil tro at denne delen tar ca 1 hel dag å kjøre igjennom, ettersom det må kjøres med en såpass liten fres.
Så da vil prisen bli omtrent sånn.

Materiale 300 kr.
Innstilling 1700 kr.
Kjøring 4000 kr. (hvis vi regner totalt 6 timer i kjøring vil 2 av disse timene være bemannet)
Total 6000 kr.

Holder dette?

Vennlig hilsen/Kind regards

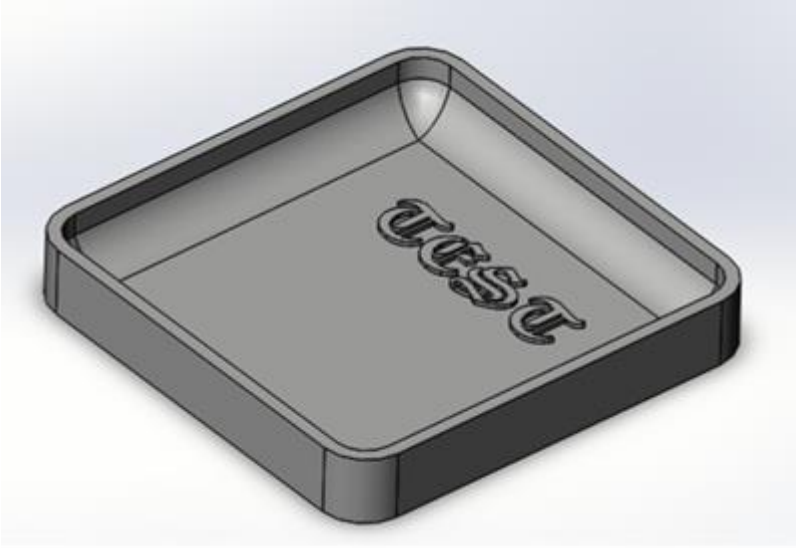
Espen Moldal
Avdelingsleder CNC

TOPRO Industri AS
Postboks 428 • Rambekkvegen 7, 2803 Gjøvik
Tlf/Phone: (+47) 908 87 740
E-post/E-mail: espen.moldal@topro.no
Web: www.topro.no
Nettbutikk: www.toproshop.no

Fra: Cato Engebakken [mailto:catoen@stud.ntnu.no]
Sendt: mandag 6. mai 2019 16.08
Til: Espen Moldal <Espen.Moldal@topro.no>
Emne: Uforpliktende prisoverslag (Bachelor oppgave NTNU Gjøvik)

Hei! Vi er midt i bachelor skrivingen. I denne sammenheng sammenlikner vi kostnader for å 3d-printe støpeformer mot for maskinerte støpeformer i metall. Hadde det vært mulig å få et prisoverslag for en cnc-maskinert «støpeform»? Denne skal altså ikke maskiners, vi er bare ute etter prisoverslaget. Formen er særdeles enkel og i bare en del. (åpen form). Hvis dette er mulig kan vi vedlegge modellen i ønsket filformat. Oversikt over beregnet maskinerings tid (bemannet/ubemannet) er ønskelig 😊

Hvis dette er mulig å få til vil det blir rettet en stor takk til Topro i vår besvarelse.



Dim: 100 * 100 * 15 mm (teksten inneholder utfordrende detaljer, men la oss si at det kan freses ut med 1mm fres eller noe da..)
Materiale: Aluminium (6061 eller noe i den duren….)

Mvh
Cato Engebakken

Vedlegg 4 – Prosjektplan

Prosjektplan for Bacheloroppgave

AddForm 2.0

NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Student:	Studentnummer:	Klasse:
Cato Engebakken	472503	16HBIMASA
Marius Gårdsrud Hole	472484	16HBIMASA

Innholdsfortegnelse

1 Tema, bakgrunn, mål, problemstilling og rammer 1
1.1 Tema 1
1.2 Bakgrunn og mål 1
1.3 Problemstilling 1
1.4 Rammer 2
2 Omfang 2
2.1 Oppgavespesifikasjon 2
3 Prosjektorganisering 2
3.1 Ansvarsforhold 2
3.2 Øvrige roller og bemanning 2
4 Planlegging, oppfølging og rapportering 3
5 Risikovurdering 3
5.1 Kritiske suksessfaktorer 3
5.2 Risikoevaluering 3
6 Kvalitetssikring 3
6.1 Organisering av kvalitetssikring 3
6.2 Kvalitetssikring av kritiske suksessfaktorer 3
7 Gjennomføring, framdrift mm 4
7.1 Hovedaktiviteter 4
7.2 Framdriftsplan med milepæler og beslutningspunkter 4
7.3 Kostnader og finansiering 4
8 Mulige etiske og miljømessige utfordringer 4
8.1 Etiske utfordringer 4
8.2 Miljømessige utfordringer 4
9 Innovasjon 4
10 Kontrakter og avtaler 5

1 Tema, bakgrunn, mål, problemstilling og rammer

1.1 Tema

Valg av bacheloroppgave falt på AddForm-prosjektet. Dette er et prosjekt som omfatter additiv tilvirkning av forminnsatser til sprøytestøping i plast, for bruk i produksjon. Det er ønskelig, for å begrense antall hoved-/moderformer, å benytte standardiserte dimensjoner på innsatsformene. Slik kan flest mulig produkter produseres i samme hovedform, for å spare tid og kostnader.

Bachelorgruppen består av to medlemmer. Begge medlemmene har stor interesse for 3D-printing, hvor 3D-printer eies privat og brukes jevnlig til hobby og prosjekter. Samlet har gruppen lang erfaring innenfor industri, maskinering og produksjon. Ingen av medlemmene har direkte arbeidet med sprøytestøping, men har arbeidet tett på plastdelproduksjon i mange år, og har gode kjennskaper innenfor faget. Dette styrkes med et fagbrev som verktøymaker, og familiemedlemmer som i mange år har jobbet med plastsprøytestøping.

1.2 Bakgrunn og mål

AddForm-prosjektet er et samarbeid mellom flere bedrifter. Her ser man på muligheten for å kunne additivt produsere støpeformer/forminnsatser i plast/plast kompositter til sprøytetstøping. Målet med AddForm-prosjektet er å lage en guide med klare muligheter og begrensinger rundt additiv tilvirkning av forminnsatser, for produksjon av prototyper i mindre antall. Guiden omfatter valg av additiv metode, maskinvalg, materialer, geometrier og dimensjoner med hensyn på lav kostnad og etterarbeid. Dette er et prosjekt som allerede har vedvart over 3 år. Flere problemstillinger er forsket på, men man er enda ikke helt i mål. Vår bacheloroppgave skal prøve å fullstendiggjøre/«tette hull» i nåværende «Guide til AddForm», og forhåpentligvis kun ta guiden et steg videre.

Prosjekter:

1. Addform
2. Rapidtooling (pågående)
3. Sintef (OMBE plast, Fredrikstad)

1.3 Problemstilling

Fullstendiggjøre og videreutvikle «Guide til AddForm» med særlig hensyn på lav kostnad, hvor etterarbeid er en viktig faktor.

1.4 Rammer

- Oppgaven vil fokusere på relativt rimelige 3D-printere og materiale.
- Støp vil gjøres uten maskinelt trykk grunnet behovet for støtte forsterkninger av forminnsatsene, samt andre faktorer som kompliserer form produksjonen.
- Kostnader tilfaller oppdragsgiver.
- Forskingsstadiet må være avsluttet innen uke 16 grunnet fullføring av rapport.

2 Omfang

2.1 Oppgavespesifikasjon

Oppgavene i prosjektet er å tilvirke innstasformer for sprøytestøping, av forskjellig størrelse og overflate struktur, med additiv metode. Gruppen skal modellere formene i SolidWorks, med forskjellig dimensjoner og kompleksitet. Deretter printes formene ut i forskjellige 3D-printere og materiale for å oppnå best resultat og egenskaper. Det vil bli gjort støpe forsøk, for å kontrollere resultatene. Forsøk og resultater skal dokumenteres.

Målet med oppgaven er å lage rimelige, fullgode innsatsformer for sprøytestøping av prototyper og liknende, i mindre antall. Som er hensiktsmessig med tanke på pris, tidsforbruk og etterarbeid, kontra former i metall.

Prosjektet skal ikke se på andre materialer enn plast/plastkompositter. Ved støping benyttes ikke maskinelt trykk for innføring av støpeplast. Dette skaper andre utfordringer som denne oppgaven ikke tar hensyn til. Det skal heller ikke ses på andre metoder enn additiv tilvirkning av produksjon av formene, da dette er hele poenget med prosjektet.

3 Prosjektorganisering

3.1 Ansvarsforhold

Vår OG er NTNU Gjøvik med Harald Bertin Jøsendal som kontaktperson. Bachelor gruppen består av bare to medlemmer og særlig organisering innad i gruppen er ikke nødvendig. Det vil jobbes parallelt og fordeling av oppgaver kan forekomme underveis. Medlemmene deler ansvarsforholdene likt.

3.2 Øvrige roller og bemanning

Det vil i utgangspunktet ikke bli utdelt egne roller for denne gruppen.

4 Planlegging, oppfølging og rapportering

Gruppen har i utgangspunktet arbeidstid fra kl. 0800 – 1600 Mandag, Tirsdag og Fredag. Jobber samlet i disse tidsrommene. Utvidet arbeidstid kan forekomme ved behov.

5 Risikovurdering

5.1 Kritiske suksessfaktorer

- Det vil være kritisk å kunne identifisere korrekte valg av materialer for innsatsformen parallelt med bruk av riktig additiv metode (SLS, SLA, FDM).
- Det er kritisk å finne et materiale som både har gode termiske egenskaper og god styrke, samt enkel bearbeiding.
- Utelukke material valg
- Utelukke additiv metode
- Begrense geometrimulighetene
- Begrense dimensjonsmulighetene

5.2 Risikoevaluering

Anser gode muligheter for å kunne besvare problemstillingen. Vi ser for oss at gode resultater vil komme i gitte materialer og additiv metode, med begrensninger på geometri og dimensjoner.

6 Kvalitetssikring

6.1 Organisering av kvalitetssikring

Avviksskjema er nødvendig for å kartlegge faktorer og parametere som ikke har gitt gode resultater. Avviksskjema fylles ut for hver print og støp. Eget skjema for print parametere (innstillinger) er hensiktsmessig for å sikre at innstillinger blir kontinuerlig forbedret.

6.2 Kvalitetssikring av kritiske suksessfaktorer

Her vil det også bli benyttet skjema for kartlegging av brukt materiale, additiv metode, geometri og dimensjoner.

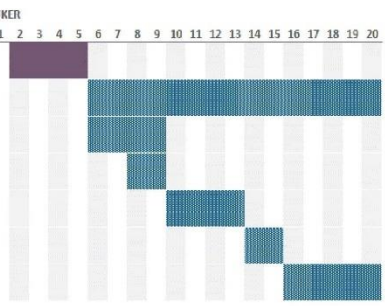
7 Gjennomføring, framdrift mm

7.1 Hovedaktiviteter

Oppgaven deles inn i tre hovedaktiviteter (HA). Første HA vil bestå av research og planlegging. Forskning og testing forekommer i andre HA. Siste HA blir sluttskriving av rapport.

7.2 Framdriftsplan med milepæler og beslutningspunkter

AKTIVITET	PLANLAGT START	PLANLAGT VARIGHET	FAKTISK START	FAKTISK VARIGHET	PROSENT FULLFØRT
Prosjektplan	2	4	2	4	100 %
Bachelorarbeid	6	15	-	-	-
Planlegging	6	4	-	-	-
Modellering (SW)	8	2	-	-	-
Forsøk (matr, print, geome.)	10	4	-	-	-
Resultat og drøft	14	2	-	-	-
Skriving og fullføring	16	5	-	-	-



7.3 Kostnader og finansiering

Det benyttes printere fra NTNU Gjøvik, og det vil ikke påløpe noen andre kostnader utover bruk av produksjonsmateriale.

8 Mulige etiske og miljømessige utfordringer

8.1 Etiske utfordringer

Vi finner ingen etiske utfordringer ved denne oppgaven.

8.2 Miljømessige utfordringer

Riktig behandling av plaster, resin og eventuelt aceton er viktig.

9 Innovasjon

Det er viktig å utnytte det nyeste innen materialteknologi, additive maskiner/metoder. 3D-printing i seg selv er en relativt ny og innovativ produksjonsmetode, som gir mange spennende muligheter innenfor industrien.

10 Kontrakter og avtaler

NTNU

Fastsatt av Rektor 20.01.2012

STANDARDAVTALE

om utføring av masteroppgave/prosjektoppgave (oppgave) i samarbeid med bedrift/ekstern virksomhet (bedrift).

Avtalen er ufravikelig for studentoppgaver ved NTNU som utføres i samarbeid med bedrift.

Partene har ansvar for å klarere eventuelle immaterielle rettigheter som tredjeperson (som ikke er part i avtalen) kan ha til prosjektbakgrunn før bruk i forbindelse med utførelse av oppgaven.

Avtale mellom

Student: Marius Gårdsrud Hole	født: 17/12 - 1989
Veileder ved NTNU: Harald Bertin Jørsendal	
Bedrift/ekstern virksomhet:	

og

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) v/instituttleder

om bruk og utnyttelse av resultater fra masteroppgave/prosjektoppgave.

1. Utførelse av oppgave

Studenten skal utføre

Masteroppgave	
Prosjektoppgave	X

(sett kryss)

i samarbeid med

bedrift/ekstern virksomhet

NTNU 2012-01-20

5

9/1 - 2019 - 15/5 - 2019

startdato – sluttdato

Oppgavens tittel er:

AddForm 2.0

Ansvarlig veileder ved NTNU har det overordnede faglige ansvaret for utforming og godkjenning av prosjektbeskrivelse og studentens læring.

2. Bedriftens plikter

Bedriften skal stille med en kontaktperson som har nødvendig veiledningskompetanse og gi studenten tilstrekkelig veiledning i samarbeid med veileder ved NTNU. Bedriftens kontaktperson er:

Formålet med oppgaven er studentarbeid. Oppgaven utføres som ledd i studiet, og studenten skal ikke motta lønn eller lignende godtgjørelse fra bedriften. Bedriften skal dekke følgende utgifter knyttet til utførelse av oppgaven:

3. Partenes rettigheter

a) Studenten

Studenten har opphavsrett til oppgaven. Alle immaterielle rettigheter til resultater av oppgaven skapt av studenten alene gjennom oppgavearbeidet, eies av studenten med de reservasjoner som følger av punktene b) og c) nedenfor.

Studenten har rett til å inngå egen avtale med NTNU om publisering av sin oppgave i NTNUs institusjonelle arkiv på internett. Studenten har også rett til å publisere oppgaven eller deler av den i andre sammenhenger dersom det ikke i denne avtalen er avtalt begrensninger i adgangen til å publisere, jf punkt 4.

b) Bedriften

Der oppgaven bygger på, eller videreutvikler materiale og/eller metoder (prosjektbakgrunn) som eies av bedriften, eies prosjektbakgrunnen fortsatt av bedriften. Eventuell utnyttelse av videreutviklingen, som inkluderer prosjektbakgrunnen, forutsetter at det inngås egen avtale om dette mellom student og bedrift.

Bedriften skal ha rett til å benytte resultatene av oppgaven i egen virksomhet dersom utnyttelsen faller innenfor bedriftens virksomhetsområde. Dette skal fortolkes i samsvar med begrepets innhold i Arbeidstakeroppfinnelsesloven[1] § 4. Retten er ikke-eksklusiv.

Bruk av resultatet av oppgaven utenfor bedriften sitt virksomhetsområde, jf avsnittet ovenfor, forutsetter at det inngås egen avtale mellom studenten og bedriften. Avtale mellom bedrift og student om rettigheter til oppgaveresultater som er skapt av studenten, skal inngås skriftlig og er ikke gyldig inngått før NTNU har mottatt skriftlig gjenpart av avtalen.

Dersom verdien av bruken av resultatene av oppgaven er betydelig, dvs overstiger NOK 100.000 (kommentert i veiledningen[2] til avtalen), er studenten berettiget til et rimelig vederlag. Arbeidstakeroppfinnelsesloven § 7 gis anvendelse på vederlagsberegningen. Denne vederlagsretten gjelder også for ikke-patenterbare resultater. Fristbestemmelsene i § 7 gis tilsvarende anvendelse.

c) NTNU
De innleverte eksemplarer/filer av oppgaven med vedlegg, som er nødvendig for sensur og arkivering ved NTNU, tilhører NTNU. NTNU får en vederlagsfri bruksrett til resultatene av oppgaven, inkludert vedlegg til denne, og kan benytte dette til undervisnings- og forskningsformål med de eventuelle begrensninger som fremgår i punkt 4.

4. Utsatt offentliggjøring

Hovedregelen er at studentoppgaver skal være offentlige. I særlige tilfeller kan partene bli enig om at hele eller deler av oppgaven skal være undergitt utsatt offentliggjøring i maksimalt 3 år, dvs. ikke tilgjengelig for andre enn student og bedrift i denne perioden.

Oppgaven skal være undergitt utsatt offentliggjøring i

ett år	
to år	
tre år	

(sett kryss bak antall år hvis dette punktet er aktuelt)

Behovet for utsatt offentliggjøring er begrunnet ut fra følgende:

De delene av oppgaven som ikke er undergitt utsatt offentliggjøring, kan publiseres i NTNUs institusjonelle arkiv, jf punkt 3 a), andre avsnitt.

Selv om oppgaven er undergitt utsatt offentliggjøring, skal bedriften legge til rette for at studenten kan benytte hele eller deler av oppgaven i forbindelse med jobbsøknader samt videreføring i et doktorgradsarbeid.

[1] Lov av 17. april 1970 om retten til oppfinnelser som er gjort av arbeidstakere
http://www.lovdata.no/all/hl-19700417-021.html
[2] Veiledning til NTNUs standardavtale om masteroppgave/prosjektoppgave i samarbeid med bedrift
http://www.ntnu.no/studier/standardavtaler

5. Generelt

Denne avtalen skal ha gyldighet foran andre avtaler som er eller blir opprettet mellom to av partene som er nevnt ovenfor. Dersom student og bedrift skal inngå avtale om konfidensialitet om det som studenten får kjennskap til i bedriften, skal NTNUs standardmal for konfidensialitetsavtale benyttes. Eventuell avtale om dette skal vedlegges denne avtalen.

Eventuell uenighet som følge av denne avtalen skal søkes løst ved forhandlinger. Hvis dette ikke fører frem, er partene enige om at tvisten avgjøres ved voldgift i henhold til norsk lov. Tvisten avgjøres av sorenskriveren ved Sør-Trøndelag tingrett eller den han/hun oppnevner.

Denne avtale er underskrevet i 4 - fire - eksemplarer hvor partene skal ha hvert sitt eksemplar. Avtalen er gyldig når den er godkjent og underskrevet av NTNU v/instituttleder.

30/1-2019	Marius G Hole	
sted, dato	student	
31/1-2019		NTNU
sted, dato	veileder ved NTNU	
GJØVIK 31/01-19		IVB.
sted, dato	instituttleder, NTNU	institutt
sted, dato	for bedriften/institusjonen stempel og signatur	

4 NTNU 2012-01-20

NTNU

Fastsatt av Rektor 20.01.2012

STANDARDAVTALE

om utføring av masteroppgave/prosjektoppgave (oppgave) i samarbeid med bedrift/ekstern virksomhet (bedrift).

Avtalen er ufravikelig for studentoppgaver ved NTNU som utføres i samarbeid med bedrift.

Partene har ansvar for å klarere eventuelle immaterielle rettigheter som tredjeperson (som ikke er part i avtalen) kan ha til prosjektbakgrunn før bruk i forbindelse med utførelse av oppgaven.

Avtale mellom

Student: CATO ENGEBAKKEN | født: 31.03.87

Veileder ved NTNU: Harald Bertin Jossendal

Bedrift/ekstern virksomhet:

og

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) v/instituttleder

om bruk og utnyttelse av resultater fra masteroppgave/prosjektoppgave.

1. Utførelse av oppgave

Studenten skal utføre

Masteroppgave	
Prosjektoppgave	X

(sett kryss)

i samarbeid med

bedrift/ekstern virksomhet

NTNU 2012-01-20

9/1-19 15/5-19

startdato – sluttdato

Oppgavens tittel er:

AddForm 2.0

Ansvarlig veileder ved NTNU har det overordnede faglige ansvaret for utforming og godkjenning av prosjektbeskrivelse og studentens læring.

2. Bedriftens plikter

Bedriften skal stille med en kontaktperson som har nødvendig veiledningskompetanse og gi studenten tilstrekkelig veiledning i samarbeid med veileder ved NTNU. Bedriftens kontaktperson er:

Formålet med oppgaven er studentarbeid. Oppgaven utføres som ledd i studiet, og studenten skal ikke motta lønn eller lignende godtgjørelse fra bedriften. Bedriften skal dekke følgende utgifter knyttet til utførelse av oppgaven:

3. Partenes rettigheter

a) Studenten

Studenten har opphavsrett til oppgaven. Alle immaterielle rettigheter til resultater av oppgaven skapt av studenten alene gjennom oppgavearbeidet, eies av studenten med de reservasjoner som følger av punktene b) og c) nedenfor.

Studenten har rett til å inngå egen avtale med NTNU om publisering av sin oppgave i NTNUs institusjonelle arkiv på internett. Studenten har også rett til å publisere oppgaven eller deler av den i andre sammenhenger dersom det ikke i denne avtalen er avtalt begrensninger i adgangen til å publisere, jf punkt 4.

b) Bedriften

Der oppgaven bygger på, eller videreutvikler materiale og/eller metoder (prosjektbakgrunn) som eies av bedriften, eies prosjektbakgrunnen fortsatt av bedriften. Eventuell utnyttelse av videreutviklingen, som inkluderer prosjektbakgrunnen, forutsetter at det inngås egen avtale om dette mellom student og bedrift.

2 NTNU 2012-01-20

Bedriften skal ha rett til å benytte resultatene av oppgaven i egen virksomhet dersom utnyttelsen faller innenfor bedriftens virksomhetsområde. Dette skal fortolkes i samsvar med begrepets innhold i Arbeidstakeroppfinnelsesloven[1] § 4. Retten er ikke-eksklusiv.

Bruk av resultatet av oppgaven utenfor bedriften sitt virksomhetsområde, jf avsnittet ovenfor, forutsetter at det inngås egen avtale mellom studenten og bedriften. Avtale mellom bedrift og student om rettigheter til oppgaveresultater som er skapt av studenten, skal inngås skriftlig og er ikke gyldig inngått før NTNU har mottatt skriftlig gjenpart av avtalen.

Dersom verdien av bruken av resultatene av oppgaven er betydelig, dvs overstiger NOK 100.000 (kommentert i veiledningen[2] til avtalen), er studenten berettiget til et rimelig vederlag. Arbeidstakeroppfinnelsesloven § 7 gis anvendelse på vederlagsberegningen. Denne vederlagsretten gjelder også for ikke-patenterbare resultater. Fristbestemmelsene i § 7 gis tilsvarende anvendelse.

c) NTNU
De innleverte eksemplarer/filer av oppgaven med vedlegg, som er nødvendig for sensur og arkivering ved NTNU, tilhører NTNU. NTNU får en vederlagsfri bruksrett til resultatene av oppgaven, inkludert vedlegg til denne, og kan benytte dette til undervisnings- og forskningsformål med de eventuelle begrensninger som fremgår i punkt 4.

4. Utsatt offentliggjøring

Hovedregelen er at studentoppgaver skal være offentlige. I særlige tilfeller kan partene bli enig om at hele eller deler av oppgaven skal være undergitt utsatt offentliggjøring i maksimalt 3 år, dvs. ikke tilgjengelig for andre enn student og bedrift i denne perioden.

Oppgaven skal være undergitt utsatt offentliggjøring i

ett år	
to år	
tre år	

(sett kryss bak antall år hvis dette punktet er aktuelt)

Behovet for utsatt offentliggjøring er begrunnet ut fra følgende:

De delene av oppgaven som ikke er undergitt utsatt offentliggjøring, kan publiseres i NTNUs institusjonelle arkiv, jf punkt 3 a), andre avsnitt.

Selv om oppgaven er undergitt utsatt offentliggjøring, skal bedriften legge til rette for at studenten kan benytte hele eller deler av oppgaven i forbindelse med jobbsøknader samt videreføring i et doktorgradsarbeid.

[1] Lov av 17. april 1970 om retten til oppfinnelser som er gjort av arbeidstakere
http://www.lovdata.no/all/hl-19700417-021.html
[2] Veiledning til NTNUs standardavtale om masteroppgave/prosjektoppgave i samarbeid med bedrift
http://www.ntnu.no/studier/standardavtaler

5. Generelt

Denne avtalen skal ha gyldighet foran andre avtaler som er eller blir opprettet mellom to av partene som er nevnt ovenfor. Dersom student og bedrift skal inngå avtale om konfidensialitet om det som studenten får kjennskap til i bedriften, skal NTNUs standardmal for konfidensialitetsavtale benyttes. Eventuell avtale om dette skal vedlegges denne avtalen.

Eventuell uenighet som følge av denne avtalen skal søkes løst ved forhandlinger. Hvis dette ikke fører frem, er partene enige om at tvisten avgjøres ved voldgift i henhold til norsk lov. Tvisten avgjøres av sorenskriveren ved Sør-Trøndelag tingrett eller den han/hun oppnevner.

Denne avtale er underskrevet i 4 - fire - eksemplarer hvor partene skal ha hvert sitt eksemplar. Avtalen er gyldig når den er godkjent og underskrevet av NTNU v/instituttleder.

30/1-19	Cato Engebretsen	
sted, dato	student	
30/1-2019		NTNU
sted, dato	veileder ved NTNU	
31/1-19 Gjøvik		IVB.
sted, dato	instituttleder, NTNU	institutt
sted, dato	for bedriften/institusjonen stempel og signatur	

4 NTNU 2012-01-20

Vedlegg 5 - Logg

Uke	Hva	Hvem
2	Utarbeidet prosjektplan og tidsplan Diskusjoner om mål og forventninger til bacheloroppgaven.	Cato og Marius
3	Undersøkt relevant teori for hvilket materiale og metode vi ønsket å benytte. Diskutert hva vi ønsket å innlemme i oppgaven og hvilken struktur vi skulle bruke.	Cato og Marius
4	Startet med innledning, herunder avgrensning av oppgaven, problemstilling, målgruppe mm.	Cato og Marius
5	Utformet støpeformer i SolidWorks.	Cato og Marius
6	Fortsatte videre med tegning av former i SolidWorks og løste utfordringer med design.	Cato og Marius
7	Forsøkte forskjellige print metoder og vurderte resultatene av disse. Gjorde forsøk på etterbehandling. Lagde disposisjon	Cato og Marius
8	Kontaktet Strukturplast og rådførte oss om hvordan vi burde gå frem. Fullførte innledning og innhentet kilder.	Cato og Marius
9	Jobbet med metode kapittelet.	Cato og Marius
10	Jobbet vider med metode og teori kapitlene	Cato og Marius
11	Jobbet med teorikapittelet og innhentet flere kilder	Cato og Marius
12	Jobbet videre med teori	Cato og Marius
13	Utarbeidet en tydeligere plan på fremgangsmetoden. Vurderte ut fra teori hvilke undersøkelser vi måtte gjennomføre.	Cato og Marius
14	Printet støpeformer. Skrev egne undersøkelser. Vurderte forskjellige metoder for etterbehandling.	Cato og Marius
15	Jobbet videre med å printet støpeformer og etterbehandlet disse. Skrev egne undersøkelser.	Cato og Marius
16	Var på Strukturplast og støpte i de additivt tilvirkede støpeformene. Tok bilder og film. Jobbet videre med analyser og inntrykk. Drøftet forskjellige teorier rundt resultatene.	Cato og Marius
17	La inn bilder og skrev resultater.	Cato og Marius
18	Jobbet med resultat og diskusjon.	Cato og Marius
19	Etterspurte tillatelser på gjengivelse av bilder og jobbet med diskusjon, konklusjon og videre arbeid.	Cato og Marius
20	Jobbet med siste finish på dokumentet.	Cato og Marius
21	Levert bacheloroppgave	Cato og Marius

NTNU

Kunnskap for en bedre verden