

Additech

Sirkulærøkonomisk kretslop i polymerproduksjon med FDM printere



Innholdsfortegnelse

1. Innledning og forprosjekt.....	6
1.1 Bakgrunn.....	6
1.2 Prosjektorganisering.....	7
1.3 Sentrale utviklingstrekk	8
1.4 Tidligere arbeid på området	10
1.5 Eksisterende løsninger	12
1.6 Markedsbehov, potensial og risiko	14
1.7 Oppdragsbeskrivelse	15
1.8 Problemstillinger og teknologiske flaskehalsar.....	15
1.8.1 Problemstillinger og fokuspunkter	15
1.8.2 Teknologiske flaskehalsar og utfordringer.....	16
2. Prosjektplanlegging.....	18
2.1 Prosjekt målsettinger.....	18
2.1.1. Hovedmål.....	18
2.1.2. Delmål.....	18
2.2 Tids- og arbeidsplan med milepælar	18
2.3 Tidlig begrensning for arbeidet.....	19
3 Metodebeskrivelse	20
3.1 Terminologi og begreper.....	20
3.2 Løsningsverktøy og metodikk.....	21
3.2.1 Programvarebruk.....	22
3.2.2 Tester.....	22
3.2.3 Løsningsverktøy.....	22
3.2.4 Metodebruk	22
3.3 Kvalitetssikring av prosjekt	25
3.4 Arbeidsmåte, prosesstrinn og trinnsesifisering	25
3.4.1 Forprosjekt	26
3.4.2 Markedsvurdering	26
3.4.3 Metodebeskrivelse	26
3.4.4 Teoriutredning.....	26
3.4.5 Valg av maskiner	26
3.4.6 Intervjuer og ekspertinnspill	26
3.4.7 Definerings av resirkuleringsystem	26
3.4.8 Utredning og gjennomføring av forsøk.....	27
3.4.9 Tolkning av resultatar	27

3.4.10	Mulighetsstudie for resirkuleringsprosjekter	27
3.4.11	Prosessevaluering og utredning av videre arbeid.....	27
4	Teori og teknologiutredning.....	28
4.1	Bakgrunnsteori for materialeegenskaper	28
4.1.1	Fysiske egenskaper	28
4.1.2	Mekaniske egenskaper	29
4.2	Teori rundt polymer	33
4.3	Teori rundt resirkulering av polymer.....	36
4.4	Identifisering og merking av polymer.....	38
4.5	Resirkulering og materialkvalitet.....	39
4.6	Generalisering av AM produksjonsprosessen.....	41
4.7	Teori rundt FDM prosessen	42
4.7.1	Lasting av materialet.....	42
4.7.2	Smelting av materiale.....	42
4.7.3	Ekstrudering.....	43
4.7.4	Solidifisering.....	45
4.7.5	Posisjonskontroll.....	45
4.7.6	Bindingsprosess	46
4.7.7	Generering av støttestruktur.....	47
4.7.8	Plotting og kontroll av veivalg.....	48
4.8	Maskineri til printeprosessen	49
4.8.1	Prusa MK3 mini	49
4.8.2	Creality CR-30	50
4.8.3	Bambu lab x1 carbon	51
5	Intervjuer og ekspertinnspill	52
5.1	Målsetning for intervjuer	52
5.2	Valg av intervjupersoner og ekspertområder	52
5.3	Resultater og resultattolkning	53
5.4	Intervjuer av personer involvert i prosessen	53
5.4.1	Intervju Anders Helland: Administrerende direktør	53
5.4.2	Intervju Kristoffer Eriksen: Kommersiell direktør.....	53
5.4.3	Intervju med Malin Sagstad: maskinoperatør	54
5.5	Utvikling av preferansesett	55
6	Valg av resirkuleringssystem	56
6.1	System for resirkulering.....	57
7	Valg av maskineri for prosess.....	59

7.1 Tidlig screening av løsninger og aktører i markedet.....	59
7.1.1 3Devo.....	59
7.1.2 ReDeTec.....	61
7.1.3 Filafab	62
7.1.4 ACC machine.....	63
7.1.5 Filabot	63
7.1.6 Noztek.....	64
7.2 Tidlig seleksjon av maskineri	65
7.3 Valg av endelig løsning.....	66
7.4 Utredning rundt produksjon av filament.....	67
7.5 Maskineri til resirkuleringsprosessen.....	69
7.5.1 3Devo GP20 Hybrid.....	69
7.5.2 3Devo Airid Polymer Dryer.....	69
7.5.3 3Devo Filament Makers.....	70
8 Produksjon av filament og prototype fra rPLA.....	71
8.1 Produksjon av filament fra pellets.....	71
8.2 Produksjon av deler.....	72
8.3 Samling av plast til resirkulering	72
8.4 Granulering av gamle deler og avfallsplast.....	73
8.5 Produksjon av filament fra resirkulerte prototyper	73
8.6 Produksjon av modell fra rPLA	73
8.7 Erfaringer fra resirkuleringsprosessen	74
9 Utvikling av forsøk	76
9.1 Produksjon av Benchy	76
9.2 Produksjon av Temp Tower	80
9.3 Produksjon av All-in-one test	80
9.4 Produksjon av stringingtest.....	81
9.5 Produksjon av Clearing test	81
10 Gjennomføring av forsøk	82
10.1 Produksjon av byggeplater.....	82
10.1.1 Byggeplater med nytt filament.....	82
10.1.2 Byggeplater etter en resirkuleringssyklus	83
10.1.3 Byggeplate etter to resirkuleringssykluser	83
10.1.4 Byggeplate etter tre resirkuleringssykluser.....	84
10.2 Resultater fra Benchy.....	88
10.2.1 Resultater fra Benchy med nytt filament.....	88

10.2.2 Resultat fra Benchy etter en resirkuleringssyklus	92
10.3 Resultater fra Temp Tower	95
10.3.1 Resultater fra Temp Tower med originalt filament.....	96
10.3.2 Resultat fra Temp Tower med rPLA.....	96
10.4 All-in-one tester	97
10.4.1. Resultater fra All-in-one test med nytt filament.....	97
10.4.2. Resultater fra All-in-one test med rPLA fra en resirkuleringssyklus	100
10.5. Stringing test	102
10.5.1. Resultater fra stringing test med nytt filament	102
10.5.2. Resultat fra stringing test etter en resirkuleringssyklus.....	102
10.6. Resultater fra clearing tester.....	103
10.6.1. Resultater fra clearing test med nytt filament	103
10.6.2. Resultat fra clearing test etter en resirkuleringssyklus.....	104
11. Tolkning av Resultater	105
11.1 Resultater fra første resirkuleringssyklus	105
11.1.1 Parametre for polymertørking	105
11.1.2 Parametre for ekstruderingsstemperatur	106
11.1.3 Produksjonsparametere for resirkulering	107
11.1.4 Erfaringer fra resirkuleringsprosessen	107
12 Muligheter og utfordringer.....	108
12.1 Prototyping.....	108
12.2 Kostnadsbesparelser.....	108
12.3 Bærekraftig filamentproduksjon	109
12.4 HMS for personell involvert i produksjon	109
12.5 Kvaliteten på filament.....	109
12.6 Mange feilkilder.....	110
13 Prosessevaluering	111
14 Videre arbeid.....	113
14.1 Testing av materialeegenskaper.....	113
14.2 Kostnadsanalyse av resirkulert filament	113
14.3 Utredning rundt flere typer polymer og materialer	113
15 Referanser	114

1. Innledning og forprosjekt

I denne delen av rapporten vil det bli presentert en innledning og bakgrunn for rapporten

1.1 Bakgrunn

Bærekraft og bærekraftsrapportering blir en større og større del av norsk industri. Kravene som stilles til produksjonsbedrifter blir strammet inn, og bærekraftige løsninger er i søkelyset hos flere store produsenter. EU produserer mer enn 2.5 billioner tonn med avfall hvert år, og jobber med lovgivningen rundt avfallshåndtering og insentivering for mer bærekraftige modeller kjent som sirkulærøkonomi. [1]

Sirkulærøkonomi er en modell som omfatter produksjon og konsum av varer og tjenester, med et endemål om å effektivisere produksjonskjeder og øke levetiden til produkter. I praksis handler dette om å redusere avfall fra et produkt eller tjeneste til et minimum, og når produktet eller tjenesten er i enden av livssyklusen iverksettes en resirkuleringsprosess. Dette gjør at produktinnsatsen kan gjenbrukes flere ganger, og i motsetning til en lineærøkonomisk modell vil avfallet fra disse prosessene reduseres mest mulig. [1]

I Norge jobbes det aktivt med å redusere utslipp assosiert med produksjon av produkter og tjenester. Den 10 november 2022 ble det vedtatt et bærekraftsdirektiv (CSRD) i EU, og fra og med 2023 er det et rapporteringskrav for større bedrifter i Norge. Hensikten med denne rapporteringen er å gi investorer og andre interessante informasjon om hvordan foretaket påvirkes av miljøendringer og klimarisiko. Rapporteringen er også ment for å gi investorer og interesseenter informasjon om hvordan foretaket påvirker klimaet, og hvordan det bidrar til mer bærekraftig utvikling. Rapporteringen i sin helhet vil gi et konsistent og fullstendig bilde på hvordan bedriften håndterer bærekraftsutfordringer, og det vil være mulig å sammenligne utvikling over tid. Sammenligning av bedrifter i investeringsanalyser vil også gjøre det mulig for produksjonsbedrifter som Additech å gjøre beviste og informasjonsbaserte valg i anskaffelsesprosesser, hvor også bærekraftperspektivet kan bli brukt som KPI indikatorer. [2]

Det finnes krav til rapportering av ikke-finansielle forhold, og mange av disse er definert i regnskapslovens tredje kapitel. For små foretak er det ikke rapporteringskrav av ikke-finansielle forhold. Hva som defineres som et lite foretak er definert i regnskapsloven §1-6. For øvrige foretak krever regnskapsloven §3-3a at opplysninger om blant annet arbeidsmiljø, iverksatte tiltak som har betydning for arbeidsmiljøloven, ulykker ect. For store selskaper krever regnskapsloven §3-3c redegjøre for sitt samfunnsansvar. Redegjøringen skal minst omhandle «*miljø, sosiale forhold, likestilling og ikke-diskriminering, overholdelse av menneskerettigheter og bekjempelse av korrupsjon og bestikkelser*». Dette gjør det sirkulærøkonomiske perspektivet mer og mer relevant for norsk næringsliv, og vil være en driver for å innføre sirkulærøkonomiske preg i selskapers operasjonelle virksomhet. [2-5]

Innen produksjon er det mange muligheter til å redusere klimavtrykket, og en av disse er additive manufacturing (AM) produksjon. Selv om disse produksjonsmetodene kan medføre et mindre klimaavtrykk vil det også være utfordringer rundt denne produksjonsmetoden. Det finnes mange forskjellige produksjonsmetoder, og en ofte brukt metode er fused deposition modeling (FDM).

Ocean Innovation Norwegian Catapult (OINC) har en strategisk satsing på 3D-printing, forankret i senterets 3-års plan. 3D printing i plast benyttes hyppig i senterets prototypelab (Makerspace), samt av bedrifter, til å lage enkle, beskrivende prototyper. Å kunne gjenvinne plastavfall «*in house*», og gjenbruke dette i senterets printere, vil være et meget godt utstillingsvindu for senterets kunder ifm. bærekraftig utnyttelse av råvarer.

Det produseres mye avfall ved alle typer FDM-printing, en typisk printerteknologi som benyttes til prototyping og enkle konstruksjoner i ulike typer plast. Dette kombinert med deler som er feilprodusert, ikke funksjonelle iht. krav, og konstruksjoner som forbedrer delens binding til print-platen og forhindrer deformering av delen under produksjon. Per dags dato kastes dette materialet, og blir senere brent sammen med restavfall. Ved riktig metode vil man kunne resirkulere store mengder av dette avfallet, noe som ikke bare vil være økonomisk gunstig, men også redusere store deler av CO₂ avtrykket knyttet til produksjon og transport av nytt filament.

Prosjektet skal gjennomføre kritiske undersøkelser for å innhente nødvendig ny kunnskap, og nye ferdigheter, som er nødvendig for å betydelig redusere CO₂ fotavtrykket fra senterets plast 3D printere. Dette tilfredsstiller kravene til industriell forskning under artikkel 25, og har i tillegg et svært viktig element knyttet til gjenbruk og sirkulærøkonomi.

1.2 Prosjektorganisering

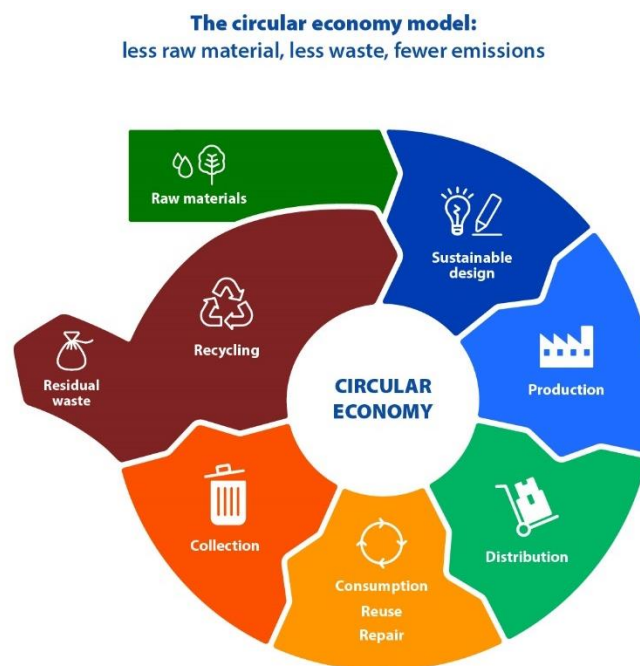
Prosjektet er organisert med OINC som prosjekteier og ansatte fra Additech som prosjektleder og teknisk personell. Aktuelle personer med tilhørende roller, er satt opp i tabellen under:

Tabell 1: Roller i prosjektet

Ansvarsområde	Part	Navn
Prosjekteier	Ocean innovation	Bjarte Horn
Prosjektleder	Additech AS	David Eltvik Groh
Teknisk personell	Additech AS	Marcus Moe Johansen
Teknisk personell	Additech AS	Roar Nelissen Leirvåg
Teknisk personell	Additech AS	Børge Falleth Høysæter
Teknisk personell	Additech AS	Malin Sagstad

1.3 Sentrale utviklingstrekk

En sirkulærøkonomisk prosess er kjennetegnet gjennom at avfallet fra en prosess kan benyttes som produksjonsinnsats i et annet produkt eller prosess. Ideelt sett vil en sirkulærøkonomisk prosess kunne bruke avfallet fra sin egen produksjonsprosess som produksjonsinnsats etter en resirkuleringsprosess. «United nation conference on trade and development» definerer sirkulærøkonomi som en prosess som gir incentiver til å gjenbruke produkter fremfor å kaste brukte komponenter og utvinne nytt produksjonsmateriale. Kort oppsummert betyr dette at produserte varer returneres til økonomien, og blir brukt mer effektivt. En sirkulærøkonomisk prosess er illustrert på figuren under. [6]



Figur 1: Eksempel på et sirkulærøkonomisk system. Hentet fra <https://www.getwalletmax.com/post/circular-economy-repair-reuse-recycle>

Som illustrert på figuren består en sirkulærøkonomisk prosess av 6 hovedfaser, en input fase og en output fase. Disse delene av prosessen er oppsummert under, og videre forklart.[1] [7-9]

Råmateriale

I denne fasen av en sirkulærøkonomisk prosess vil produktinnskuddet bli utvunnet og tilført den sirkulærøkonomiske prosessen. Her vil alt av produksjonsinnsats være nytt, og dette er råvarer hentet fra produsent eller råvareutvinning. Det nye produktinnskuddet vil ofte blandes med resirkulert produktinnskudd fra tidligere sirkulærøkonomiske kretsløp, og denne blandingen blir det endelige produktinnskuddet til det nye kretsløpet. [7-9]

Bærekraftig design

I denne delen av prosessen blir produktet designet. Her kan det tilrettelegges for bærekraftige løsninger i form av levetiden til produktet, valg av materiale og utvikling av et design som varer lengst mulig. Her vil også en sentral del være å designe produktet slik at konsumenter kan gjenbruke og reparere produktene de eier. Her vil det også være mulig å produsere produkter med hensyn til bærekrafts indikatorer, og velge produksjonsmetoder som fører til minst mulig eksternaliteter.

Videre vil dette skape muligheten for innovative produkter og tjenester som skaper verdier i en sirkulærøkonomisk prosess og samfunnsøkonomisk verdiskapning i form av eksternalitet håndtering. Mer bærekraftige produksjonsprosesser vil føre til mindre utslipp og svinn, og derfor effektivisere og forbedre eksisterende produksjonsmetoder. [7-9]

Produksjon

I denne delen prosessen blir selve produktet produsert, og her vil det kunne foretas valg rundt produksjonen som resulterer i minst mulig utslipp. Her kan det være alt fra klimagassutslipp, til andre eksternaliteter fra produksjonen.

Videre er det viktig å øke effektiviteten i produksjonsprosessen, og hvis kostandene kan reduseres gjennom billigere produksjonsmateriale og energieffektive løsninger vil innflytelsen dette punktet i prosessen har på miljøet reduseres. [7-9]

Distribusjon

Distribusjonen av varene bør skje gjennom effektive og best mulige logistiske løsninger, og løsninger som reduserer unødvendig transport vil være gunstig fra et sirkulærøkonomisk perspektiv. Valg av logistikknnettverk og transporttyper vil være en sentral driver i klimagassregnskapet, og ved forkortinger i distribusjonskjeden vil dette skape mindre behov for transport. Forkortninger i forsyningskjedene vil også potensielt kunne eliminere risiko og flaskehals i produksjonskjeden. Ved å posisjonere bedrifter slik at de er mindre eksponert for makroøkonomiske indikatorer som handelsbalanse og beskatning vil forsyningskjedene være mer robuste, og dette kan vise seg å være gunstig med tanke på leveringstid og thruput for større organisasjoner. [7-9]

Konsum, gjenbruk og reparasjon

I denne fasen av produktets livssyklus er det ute hos endebrukeren. For at endebrukerene skal kunne få mest mulig ut av produktet er det viktig at produsenten tilrettelegger for muligheten til gjenbruk og reparasjon. Dette kan gjøres gjennom muligheten til å kjøpe reservedeler fra produsent, og muligheten for videre salg mellom endebrukere.

Gjennom design som tilrettelegger for bruk og muligheten for å reparere produktet vil produktene kunne være i bruksfasen lengre. Ved å øke produktets levetid vil det føre til mindre produksjon fra flere bransjer. Dette er et politisk spørsmål, der avgrensingen mellom bedrifters ønske om salg av produkter og den samfunnsøkonomiske nytteverdien vil være to konturerende faktorer. [7-9]

Innsamling

I denne delen av den sirkulærøkonomiske prosessen har produktet nådd enden av livssyklusen sin, og konsumenten kvitter seg med produktet. Her er det viktig at det eksisterer et tilstrekkelig og brukervennlig resirkuleringssystem slik at endebrukeren faktisk bruker innsamlingssystemet.

Innsamlingspunktene vil være en sentral flaskehals for utviklingen av sirkulærøkonomiske kretsløp. Om innsamlingspunktene ikke er tilrettelagt for endebrukeren vil resirkuleringsgraden fra produktens levetid reduseres. Utbredningen av innsamlingspunkter vil være en samfunnsøkonomisk vurdering der nytteverdien av resirkulering må settes opp mot kostnadene dette påfører samfunnet. [7-9]

Resirkulering

I denne delen av den sirkulærøkonomiske prosessen vil produkter bli resirkulert, og gjenbrukes i en ny produksjonsprosess eller en annen produksjon. Denne prosessen bør være så effektiv som mulig, og det er ønskelig med en minimal produksjon av restavfall. [7-9]

Restavfall

Ingen resirkuleringsprosess vil være 100% effektiv, og dette er avfallet fra prosessen som ikke lar seg gjenvinne. Det er viktig at dette avfallet kategoriseres og loggføres slik at prosessen kan effektiviseres, og utvinningsgraden til prosessen kan kalkuleres. Effektiviteten til resirkuleringssystemet vil være en viktig KPI indikator i vurderingen av sirkulærøkonomiske systemer. [7-9]

1.4 Tidligere arbeid på området

Det har blitt gjort en undersøkelse av tidligere arbeid på området, og det har blitt lett frem flere forskningsetikker som omhandler implementering av sirkulærøkonomiske prinsipper. Dette har blitt gjort for å kunne bygge på resultatene, lærdommen og utfordringene fra tidligere forskning og arbeid på området.

Maria Barreiro-Gen og Rodrigo Lozano gjorde et studie på hvor sirkulær en sirkulærøkonomi egentlig er, og analyserte implementering av sirkulærøkonomi i organisasjoner. Prosjektet konkluderer med at sirkulærøkonomi er en av de nyeste og mest signifikante måtene og adressere bærekraft, og bærekraftstenkning. Dette studiet viste også at selskaper fokuserer mest på reduksjon av bruk, og resirkulering fra et internt synspunkt fremfor helhetsbilde. Videre ble det også funnet en dissonans mellom forståelsen av sirkulærøkonomi og bruken av sirkulærøkonomiske prinsipper. Det viste seg at bedriftene implementerte sirkulærøkonomisk metodikk, selv om de ikke visste at de fulgte sirkulærøkonomiske prinsipper.

Forskningsrapporten konkluderer med at sirkulærøkonomi må implementeres som en tankegang internt i bedriften, slik at applikasjonen involverer underleverandører og grossister. [10]

Yuliya Kalmykova, Madumita Sadagopan og Leonardo Rosado har skrevet en forskningsrapport angående et overblikk av teori og praksis rundt sirkulærøkonomi, til utvikling av implementeringsverktøy for sirkulærøkonomisk tankegang. Studiet konkluderer med at det er mange initiativer for implementering av sirkulærøkonomi, og at hoveddriverne for denne implementeringen er lovgivende organer og myndighetene. Studiet har også utviklet to verktøy for utviklet og presentert for å tilrettelegge for implementering av sirkulærøkonomisk metodikk. Studiet har også analysert strategi og punkter i verdikjedene for å se på implementeringsmulighetene. Gjenvinning, forbruk og bruksdelen av verdikjedene har fått mest oppmerksomhet. Andre deler av verdikjeden som produksjon, distribuering og salg er sjeldent involvert. [11]

Hervé Corvellec, Alison F. Stowell og Nils Johansson har gjort et studie som ser på kritikk av sirkulærøkonomi, og adresserer disse påstandene. Studiet har fokusert på den europeiske oppfatningen av sirkulærøkonomi, og korresponderende sirkulære bedriftsmodeller. Dette ble gjort for å imøtekomme uadresserte antagelser, blindsoner, motsigelser, utilsiktede konsekvenser og fordeler som har vært tatt for gitt. Vage og ukontroversiell kritikk av sirkulærøkonomi kan medføre at beslutningstakere får et forutinntatt syn på planlegging av sirkulærøkonomiske prosjekter og andre aktiviteter som omhandler sirkulærøkonomi. Studiet konkluderer med at produsenter og statelige organer bør fokusere mer på sirkulære kretsløp med designerte lukkede og størrelsesbegrensede sirkulære verdikjeder for materialer med et fokus på en rettferdig fordeling av materialer. [12]

Videre konkluderer de også at sirkulærøkonomiske prinsipper bør implementeres på en beskjedent måte slik at det løser reelle problemer, og svarer på reelle problemstillinger. Dette bør være med hensikten om at løsningen er klar på hvilke punkter det sirkulære systemet fokuserer på å løse, og at eventuelle konflikter i suksesskriteriene omfatter energi, mennesker og avfall på et globalt nivå. Samtidig må løsningene også være transparente og ansvarlige for oppnåelse av målekriterier og mangler, særlig med tanke på økonomiske, sosiale og miljømessige perspektiver. [12]

Disse punktene er viktige for å motvirke at sirkulærøkonomi blir et teoretisk utopia, og ikke motvirker faktisk arbeid med å restrukturere produksjon, konsum og bruk av sirkulærøkonomisk tankegang rundt forsyningen av produksjonsmateriell. [12]

Vanessa Prieto-Sandoval, Marta Ormazabal, Carmen Jaca og Elisabeth Viles har forsket på implementeringen av sirkulærøkonomi i små og mellomstore bedrifter. De har utviklet et teoretisk rammeverk som ser på litteratur rundt sirkulærøkonomi, og hvordan dette støtter Delphi strukturen. Delphi metoden er en interaktiv metodetilnærming der det blir jobbet gjennom flere runder med analyser og intervjuer for å skape en konsensus om dominerende eller gjennomsnittlige trender. Delphi metoden adresserte to forskningsspørsmål, og kombinasjonen av disse ga innsikt i tre aspekter som ikke har blitt sett på i kombinasjon tidligere. Disse punktene var (I) sirkulærøkonomi og en virkeplan for implementering og

adressering av sirkulærøkonomi i bedrifter. (II) Rollen til industriell symbolisme, og hvordan dette påvirker sirkulærøkonomi. (III) Miljømessige sertifiseringer for selskaper.

Resultatene fra analysen viser at ekspertene rangerte all hovedpunktene for implementeringene av sirkulærøkonomi høyt, og i snitt med 5 av 7 poeng. Dette resultatet validerte nytten og elementene for implementering av sirkulærøkonomisk tankegang i bedrifter. [13-14]

Biman Darshana Hettiarachchi, Marcus Brandenburg og Stefan Seuring har gjort et studie i å knytte AM produksjon opp mot implementeringsstrategier av sirkulærøkonomi. Studiet konkluderer med at AM er et fremvoksende område, og at fokuset begynner å flytte seg fra tekniske evalueringer til implementering og mulig gjøring av sirkulærøkonomiske tankeganger. Studiet har også undersøkt aktører i forsyningskjedene, avgjørelser rundt am teknologi, markedsdrivere, operasjonspraksis og strategier for implementering av sirkulærøkonomi. [15]

Ashish Dwivedi, Md. Abdul Moktadir, Charbel José Chiappetta Jabbour og Daniel Estima de Carvalho har forsket på integreringen av sirkulærøkonomi og industri 4.0 for bærekraftig utvikling innen produksjon av fottøy. [16-17]

Studiet konkluderer med at sirkulære forsyningskjeder består av utslipps og avfallsminimerende med en oppsynsvekkende økning i profitt, som også vil være målet til enhver bedrift som vil innarbeide sirkulærøkonomiske trekk. Avfallshåndtering er en av de mest signifikante hindringene til forsyningskjeder i overgang til bærekraftige alternativer. Dette studiet har foreslått en sirkulær, integrert bærekraftig modell innen avfallhåndtering av plast, med investeringer i am produksjon for å redusere avfall, utslipp og kostnader. [16-18]

Taksonomirapportering fra sirkulærøkonomi og produksjonsfirmaer, og har analysert 391 «cradel-to-cradle» produkter. Forskningsrapporten har forsøkt å sette søkelyset på forskjellen mellom teorien rundt sirkulærøkonomi og strategisk litteratur, og den faktiske implementeringen av sirkulærøkonomiske løsninger. Analyseringen av reelle tilfeller har vist at selskaper innebygger sirkulærøkonomi i strategien basert på graden av hvor sirkulære prosessene er. Basert på analysen av de 391 produktene fra 10 forskjellige industrier med «k-means clustering» har det vist seg at det er tre strategiske grupper som lønner seg for implementeringen av sirkulærøkonomiske prosesser. Disse er oppstarter med fokus på resirkulering, områder med mulighet for utslippsreduksjon og store institusjoner som kjemper for bærekraft og bærekrafts implementering. [16-19]

1.5 Eksisterende løsninger

TOMRA er et selskap som har opprettet et sirkulærøkonomisk system for flasker. Dette systemet er delt opp i fire prinsipper, og 12 kriterier totalt. Hvert av de fire prinsippene for resirkuleringssystemet har tre elementer som fungerer som KPI indikatorer. De fire overordnede prinsippene er som følger; [20-21]

- Performance:** Et innsamlingsmål for alle drikkevarer pluss et fornuftig depositum for plast i sirkulasjon.
- Convenience:** Et innsamlingssystem som skal være enkelt, tilgjengelig og rettferdig for alle brukere.
- Producer Responsibility:** Produsenter finansiere og investere i systemet ved hjelp av de uinnløste innskuddene, vare inntekter, og en økomodulert EPR-avgift.
- System Integrity:** Tilliten til systemets prosesser bygger på transparent ledelse, en datadrevet oppgjørssentral og en pålitelig innløsningssteknologi.

Dettes systemet bygger på tilgjengelighet og enkelhet for kunden, samtidig som det skapes et økonomisk insentiv for kunden til å levere tilbake flasker og bokser til butikken. TOMRA er en operatør som har et marked flere steder i verden, og leverer resirkuleringsløsninger i alle land de er aktive. [20-21]

En annen eksisterende løsning på plast med et sirkulærøkonomisk perspektiv er Infinitum. Dette er også en panteløsning der platen får et sirkulærøkonomisk løp. Dette løpet er illustrert på figuren under. [20-21]



Figur 2: Illustrasjon av pantesystem for plastflasker. Hentet fra: <https://infinitum.no/om-oss/>

Hendelsesforløpet er delt inn i 5 deler, og disse er som følger; [20-21]

- Forbrukeren** Tar selv tomgodset tilbake til butikken
- Panteautomaten** Komprimerer bokser og flasker slik at det tar minst mulig plass i transport.
- Transport** Godset transporteres videre i lastebiler som har levert mat til butikker, og fra grossistens lager til Infinitums sorteringslager.

Sortering	Skjer på at av Infinitums tre sorteringslagre. Her blir plast og aluminium skilt fra hverandre, og flaskene blir komprimert videre for enklere transport.
Resirkulering	Her blir plast og aluminium gjort om til nye produkter. Pantesystemet sikrer at alle materialene er av høy kvalitet i videre livssykluser

Hele dette systemet bygger på verdi i pant. Kunden betaler et depositum for flasker og bokser, og dette blir utbetalt når kunden leverer tilbake produktet. Flaskene og boksene kan leveres tilbake i alle butikker, og systemet er laget så enkelt som mulig for kunden.

1.6 Markedsbehov, potensial og risiko

Bærekraft og bærekrafts relaterte satsinger har blitt mer sentralt i selskapers strategi de siste årene. Fokus på grønne løsninger, reduksjon av klimaavtrykk og reduksjon av grønnvasking gjør at sirkulærøkonomiske prosesser kan bli mer og mer relevante i det norske markedet. [22-25]

Om klimaavtrykket relatert til aktiviteter som prototyping og AM produksjon kan reduserer ytterlig ved hjelp av sirkulærøkonomiske prinsipper vil dette være et stort potensiale for en allerede klimavennlig produksjonsprosess. [22-25]

Muligheten til å redusere prisen på produktinnsatsen samtidig som klimaavtrykket til bedriften reduseres er vil være en gunstig løsning som vil være attraktivt for de fleste bedrifter, og muligheten til å bruke en underleverandør som klassifiseres som bærekraftig vil være gunstig med tanke på CSRD. [22-25]

Styrker

- Mindre utvinning av jomfru tilsetning og redusert CO2 utslipp
- Øke den totale livssyklusen til produkter
- Mindre avfall fra produkter

Svakhet

- Mangel på kunnskap og bevissthet fra grossister og klienter
- Økonomiske utfordringer og mangel på finansiering til prosjekter
- Materialer og produkter som ikke lar seg resirkulere uten større prosesser

Muligheter

- Produksjon av materialer fra pellets og kompositt materialer
- Transportkostnader
- Panteløsninger
- Taksonomi
- Bærekraftsrapportering
- ESG investeringer

Trusler

- Mangel på villighet til å regulere markeder
- Materialkvalitet
- Eksogen påvirkning av marked
- Alternativ resirkuleringsmetode
- Mangel på system
- Tekniske utfordringer og mangel på kompetanse
- Mangel på tiltro til kvalitet fra kunder

1.7 Oppdragsbeskrivelse

Bakgrunnen for oppdraget er et samarbeid med «*Ocean Innovation Norwegian Catapult*» (OINC) og Additech AS. Additech AS har fått støtte til å gjennomføre et prosjekt på sirkulærøkonomi, og muligheten for å resirkulere polymer brukt i AM produksjon.

Muligheten til å kunne gjennomføre et grundig studie på resirkulering av filament vil gjøre det mulig å tilrettelegge for sirkulærøkonomiske løsninger i prototypingsprosesser ol.

1.8 Problemstillinger og teknologiske flaskehalser

For å skape en oversikt over problemstillinger og teknologiske flaskehalser i prosjektet har det blitt identifisert og kategorisert flere punkter for å veilede prosjektet. Problemstillingene vil forsøke å identifisere sentrale punkter som blir brukt av beslutningstakere, og de teknologiske flaskehalsene vil være med på å begrense prosjektet.

1.8.1 Problemstillinger og fokuspunkter

Materialegenskaper

For at materiale skal kunne resirkuleres og brukes i produksjonssammenhenger er det viktig at materialeegenskapene til det resirkulerte filamentet ikke er vesentlig dårligere enn nytt filament. Om produkter skal ha tilstrekkelig kvalitet og levetid vil det stilles krav til materiale som brukes, og om resirkulert materiale har signifikant lavere materialverdier vil dette være en vesentlig utfordring for bruk av resirkulert materiale i industri.

Pålitelighet og presisjon

For at resirkulert filament skal kunne brukes i industriell produksjon bør det ikke føre med seg en større sannsynlighet for feilproduksjon eller lavere presisjon. Om antall feilproduserte varer er statistisk signifikant høyere med resirkulert materiale enn med nytt vil dette påvirke kostnaden til produksjon.

Videre er det viktig at presisjonen til produksjonen ikke faller. Om et resirkulert filament har vesentlig lavere presisjon enn nye filamenter vil det kunne føre til at egenskapene til produserte produkter forsvinner.

Kostnadsanalyse

I innkjøpsprosessen vil det bli gjort en økonomisk avveining rundt alternativene i markedet. For å finne ut om resirkulert materiale har mulighet til å konkurrere med eksisterende løsninger i markedet må kostnader rundt produksjon og bruk av resirkulert filament være lavere eller lik markedsløsningene. Denne analysen bør sikte på å utrede de marginale kostnadene rundt produksjon.

Bærekraft

En sentral problemstilling i sirkulærøkonomi er hvor bærekraftige løsningene er. Hvis produksjon og bruk av resirkulert filament er assosiert med mer utslipp av klimagasser eller avfall fra produksjon vil ikke løsningen kunne ansees som bærekraftig. For å se på bærekraftigheten til resirkulering og produksjon av filament bør rammeverket til ESG og bærekraftsrapportering bli brukt. Målet med dette er at prosjektets definisjon av bærekraft samsvarer med industriens oppfatning av bærekraft.

Videre bør det også gjøres en utredning rundt eksternalitetene til produksjonen. En kartlegging av eksternaliteter vil kunne gi et bredere bilde på muligheten og risikoene til aktiviteten, sett fra et bærekraftperspektiv.

1.8.2 Teknologiske flaskehalsar og utfordringer

Kunnskap om relevante problemstillinger

Kunnskap rundt problemstillinger relaterer til resirkulering av polymer vil være en utfordring for prosjektet. Dette er et snevert område, og det vil være hensiktsmessig for prosjektet å ha en samarbeidspartner med spisskompetanse på området.

Kunnskap om polymer og resirkulering

Kunnskap rundt resirkulering av polymer, og hvordan polymer påvirkes av resirkuleringsprosessen vil være en sentral utfordring for prosjektet. For å kunne formulere hypoteser som vil være relevante for eventuelle forsøk vil det være viktig med bakgrunnsinformasjon om hvordan resirkuleringsprosessen påvirker materialeegenskapene.

Kjennskap til kjemi i resirkuleringsprosesser

For å kunne forklare de kausale effektene som påvirker polymer under resirkuleringsprosessen bør det gjøres en utredning om hvordan polymerkjemi fungerer på et grunnleggende nivå. Hvordan parametere som blir brukt i prosessen påvirker materialene, og hvordan endringene i parametere vil endre prosessen er en utfordring som bør undersøkes grundig.

Sterilt produksjonsområde og fare for krysskontaminering av materiale

For å kunne resirkulere polymerer er det viktig at arbeidsområdet er sterilt. Dette forhindrer krysskontaminering fra andre polymer, eller andre materialer som blir brukt i lokalene til Additech as.

Kunnskap om økonomi og marked

Markedet rundt resirkulert polymer er en utfordring, og hvordan resirkulert filament prises i forhold til markedsprisen til filament. Denne utfordringen vil være relevant for den økonomiske bærekraften til selskapet. Hvis det er billigere å kjøpe filament i markedet, enn å resirkulere produksjonsmateriale vil dette være en avveining som eventuelt bør forankres i selskapets strategi.

Identifisering av plast

For å forhindre krysskontaminering av polymer må det være mulig å identifisere forskjellige typer produksjonsmaterialer. Hvis det ikke finnes et system for klassifisering og identifisering av forskjellige polymer vil dette trolig ha en stor påvirkning på materialkvaliteten.

Plassbegrensninger til utstyr

Dette vil være en indirekte teknologisk flaskehals. Siden det er begrenset med plass til resirkuleringsmaskineri vil dette påvirke hvilket maskineri som kan brukes. Om plassbegrensningen går på bekostning av resirkuleringsystemet vil dette kunne ha en påvirkning på materialkvaliteten til det resirkulerte materialet.

2. Prosjektplanlegging

I denne delen av rapporten vil en overordnet planlegging av mål og fremdrift bli presentert.

2.1 Prosjektmålsettinger

Målet med prosjektet er å undersøke materialkvaliteten til filament produsert med resirkulerte materialer. Prosjektet er lagt opp til å følge en agil prosess der eventuelle oppdagelser vil være med på å pivotere og iterere prosjektet.

2.1.1. Hovedmål

Det overordnede hovedmålet for prosjektet definert i «søknad sirkulærøkonomi», og er fremstilt som følger:

« Utvikle egnet system for resirkulering, klassifisering og sortering av printer-avfall og produksjon av nytt filament »

2.1.2. Delmål

Delmålene i dette prosjektet er satt opp for å veilede arbeidet mot hovedmålet. Disse trinnene går mer inn i de konkrete arbeidsoppgavene. Delmålene er som følger;

1. Parameterutvikling (materialkvalitet, gjenvinningsegenskaper etc.) på de forskjellige typer resirkulert plast slik at man har muligheten til å redusere avfallet med 3Dprinting til tilnærmet ingenting. Avfallet vil etter denne prosessen bli brukt på nytt i samme maskinen og vi oppnår en sirkulærøkonomi/oppsirkulering av print-prosessen.
2. Strukturere en modell for å sortere plast etter faktorer som f.eks hvor mange ganger resirkulert, hvilke temperaturer og parametere plasten har vært utsatt for før, om det er brukt stoffer for å binde modellen til byggplaten (lim, acetonblanding, teip)
3. Identifiser parameter og egenskaper for de ulike gangene plasten har vært resirkulert

2.2 Tids- og arbeidsplan med milepæler

For å holde oversikt over fremgangen i prosjektet har det blitt satt opp en tabell med tiltenkte datoer for aktivitetene i prosjektet. Disse datoene vil bli etterprøvd under gjennomføringen av prosjektet, og evaluert i prosessevalueringskapittelet.

Tabell 2: Tabell med oversikt over aktivitetsplanen

Aktivitetsplan	Dato for fullføring
A1. Anskaffe testutsyr	Januar – 2023
A2. Etablere modell for sortering av restråstoff	Februar – 2023
A3. Testproduksjon av pelets	Juni – 2023
A4. Produsere den første spolen med filament fra resirkulert plastikk	Juni – 2023
A5. Utvikle parametere (Temperatur, hastighet ect. For plast materiale) for det spesifikke materialet (hver enkelt rull med filament)	Juni – 2023

Tabell 2 fortsetter

Aktivitetsplan	Dato for fullføring
A6. Verifisere parametere ved å printe forskjellige prototyper og produkter uten uønskede hendelser	Juni - 2023
A7. Utføre varierte tester med det resirkulerte filamentet for å sammenligne egenskapene med originalt filament	Juli/August - 2023
A8. Utføre opplæringsaktiviteter rettet mot brukere av Makerspace samt andre bedrifter som benytter FDM printing	Utgår som følge av at makerspacen er nedlagt

2.3 Tidlig begrensning for arbeidet

For å begrense prosjektet, og prosjektomfanget vil det bli gjort tidlige begrensninger for arbeidet. Disse blir som følger;

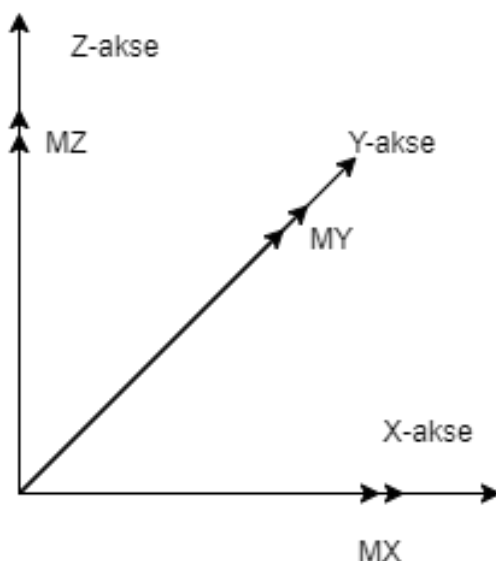
- Prosjektet vil bli begrenset til å omfatte en type polymer. Dette har blitt gjort siden noen typer filament gir fra seg avgasser under oppvarming, og PLA er dokumentert å ikke være giftig for personell.
- Det vil ikke bli gjort noen grundig undersøkelse av det juridiske perspektivet av resirkuleringsprosesser, produksjon av filament og kvalitetskrav/sertifisering av produksjon.
- Det vil ikke bli gjort noen utdypning rundt kjemisk resirkulering annet enn et mulighetsstudie.
- Testing av materialegenskaper vil bli begrenset til kvalitet av produserte figurer basert på filament.
- Det vil ikke bli utviklet en modell for å kunne ta imot materiale fra tredjeparter med unntak av makerspacet.

3 Metodebeskrivelse

For å ha en generell forståelse for metodikken i prosjektet vil dette bli fremstilt og forklart i dette avsnittet.

3.1 Terminologi og begreper

Siden prosjektet omhandler produksjon i et tredimensjonalt rom blir det definert et aksesystem som skal være gjeldende. Dette er for å enkelt kunne referere til akser gjennom forarbeidet, og skape en generell forståelse for koordinatsystemet som brukes. Dette koordinatsystemet er funnet under:



Figur 3: Definerings av koordinatsystem for rapporten

Videre vil det bli definert sentrale begreper og uttrykk som skal brukes gjennom prosjektet. Dette er gjort for å definere hva som er ment med de forskjellige uttrykkene, og hva som er gjeldende for dokumentet.

Tabell 3: Beskrivelser av forkortelser

Utrykk	Forklaring
Mex	Material extrusion: en prosess der materiale blir smeltet og dyttet ut gjennom et ekstruderingshode
FDM	Fused deposition modeling: en Mex prosess
FFF	Fused filament fabrication: Samme som FDM, men blir brukt pga opphavsrettigheter
Shredder	Maskin som kutter opp materiale til mindre biter
Filament	Produksjonsmaterialet til FDM/FFF
Bed	Byggeplattformen til en FDM printer

Fortsettelse tabell 3

Utrykk	Forklaring
CE	Circular economy / Sirkulær økonomi
rPLA	Resirkulert PLA

Videre vil det bli definert en rekke symboler som skal bli brukt til å forklare teorien bak resirkuleringsprosessen og produksjonen av prøvestaver. Disse er gitt i tabellen under med tilhørende forklaring og SI-enheter.

Tabell 4: Oversikt over grunnleggende symboler

Symbol	Forklaring
σ	Dette symbolet blir brukt i sammenheng med stress i en komponenter.
τ	Dette symbolet blir brukt i sammenheng med moment
ω	Dette symbolet vil bli brukt i sammenheng vinkelhastighet
Q	Dette symbolet vil bli brukt i sammenheng med volumstrøm
\succcurlyeq	Svak preferanse
\succ	Sterk preferanse

Det har også blitt satt opp en oversikt av kjerneformler som brukes i prosjektet. Disse formelene vil bli fremstilt, forklart og indeksert i tabellen under.

Tabell 5: Oversikt over generelle formler

Formel	Betydning/forklaring	Indeks
$\sigma = \frac{F}{A}$	Dette er formelen for stress i et gitt areal, og vil bli brukt til å kalkulere hvor mye stress som finnes i de forskjellige lagbindingene.	3-1
$A = b * h$	Dette er formelen for et areal til en firkant, og vil bli brukt til å kalkulere arealet i prøvestavene med bindingspotensiale	3-2
$\tau = F * L$	Dette er formelen for et moment, og vil bli brukt å forklare MEX prosessen	3-3
$P = \omega * \tau$	Dette er formelen for effekt utledet fra moment og vinkelhastighet. Denne formelen vil bli brukt til å forklare MEX prosessen.	3-4

3.2 Løsningsverktøy og metodikk

Programmer, tester, løsningsverktøy og diagrammer som vil bli brukt i prosjektet har blitt listet opp under, med en forklaring om hva de vil bli brukt til i prosjektet.

3.2.1 Programvarebruk

Programmene som har blitt brukt i prosjektet er listet opp under;

- **Solidworks** vil bli brukt til å klargjøre prøver til produksjon
- **Diagram.net** vil bli brukt til å lage diagrammer og figurer
- **Microsoft Excel** vil bli brukt til å lage tabeller, figurer og datasett for prosjektet
- **Microsoft Word** vil bli brukt til å fremstille prosjektet
- **Flowchart designer 3** vil bli brukt til å lage prosessdiagram og funksjonsanalyse

3.2.2 Tester

- **Benchy** vil bli brukt til å teste produksjonskvalitet
- **Clearing test** vil bli brukt til å teste presisjonen
- **All in one** vil bli brukt til å teste generelle produksjonsegenskaper

3.2.3 Løsningsverktøy

- **Pugh's metodikk** vil bli brukt til å sammenligne utstyr for resirkuleringsprosessen "
- **IPD** metodikken vil bli brukt til å utvikle et brukervennlig resirkuleringssystem
- **SCAMPER** vil bli brukt til å identifisere bruksområder for resirkulert materiale
- **Preferansesett** vil bli brukt til å parameterisere behov blant brukere og beslutningstakere

3.2.4 Metodebruk

Pugh's metodikk

Pugh's metodikk er et analyseverktøy som kan brukes til å finne en optimal løsning gitt en liste med vurderingskriterier. Disse vurderingskriteriene blir brukt til å evaluere et sett med løsninger basert på en vektning mellom de forskjellige parameterne.

Denne analysemodellen vil bli brukt til å gjøre valg av resirkuleringsutstyr og moduler i resirkuleringssystemet slik at det endelige valget av løsning svarer best mulig til behovet og krav brukeren har til systemet eller produktet. [26]

Integrated product development (IPD/IPPD)

Integrert produktutvikling er en metode som blir brukt til å innhente informasjon fra alle leddene som er involvert i utviklingsprosessen. IPD/IPPD har 11 punkter som sørger for at endeproduktet er et kvalitetsprodukt. IPD/IPPD er egnet i situasjoner hvor det opereres med tverrfaglige team, og ingeniørarbeidet skjer parallelt med annet arbeid. Hovedfokuset til IPD/IPPD er å ivareta, implementere og integrere aspekter til forbedring fra alle punkter i prosessen. Her vil synspunkt fra grossister, transport, verksted og kunder bli brukt til å iterere prosesser slik at det mest effektive og kunderettede produktet vil bli produsert. For å forklare tenkt tilbakemelding fra alle involverte ledd vil disse bli oppsummert i tabellen under; [26-29]

Tabell 6: Fokuspunkter i IPD/IPPD tankegangen

Faktorer	Beskrivelse
Tverrfaglige team	Involvering av tverrfaglig kompetanse slik at prosjektomfanget blir påvirket av flere synspunkt
Integrert prosessdesign	Involvere deltagere og aktører fra alle prosessstrinnene
Kostnadsstyring	Tidlig bestemmelse av kostnadsrammer
Involverte interessenter	Involvering av interessenter på alle nivå i prosessen. Her er det tiltenkt alt fra butikker til aksjonærer
Robust design	Det skal utvikles robuste og optimaliserte design
CAD verktøy	Design optimaliseres ved hjelp av iterasjoner i CAD
Produksjon og produkttesting	Verifisering av tiltenkte egenskaper for produkter og prosesser
Effektivisering av utviklingsprosessen	Tilrettelegge for optimalisering, effektivisering og en agil prosess
Kontinuerlig forbedring	Løsninger skal revalueres etter behov, og behovsendringer. Det skal også legges til rette for optimaliseringsmuligheter gjennom hele prosessen.

I dette prosjektet vil IPD/IPPD tankegangen blir brukt for å involvere eksperter på resirkulering, brukere av resirkuleringssystem, krav til resirkulert materiale og andre problemstillinger som kan dukke opp under prosjektet. Videre vil også IPD/IPPD metodikken bli brukt til å veilede utviklingen av et resirkuleringssystem, slik at det blir enkelt, intuitivt og tilgjengelig for brukere. [27-30]

Osbourne S.C.A.M.P.E.R

SCAMPER er en metodikk som brukes til å modifisere produkter og prosesser etter at egenskaper og behov har blitt definert. Denne metoden vil kunne eliminere, legge til og iterere egenskaper til produkter og prosesser. Selve SCAMPER prosessen er bygget opp av følgende punkter.

S - Substitute, erstatt

C - Combine, kombinere

A - Adapt, adaptere

M - Magnify/ Modify, skalere/modifisere

P - Put into use, finne bruksområde

E - Eliminate, eliminere

R - Re arrange/Reverse, endre/reversere

Gjennom å teste egenskapene til en resirkuleringsprosessen med S.C.A.M.P.E.R metoden vil det være mulig å forenkle/ modifisere prosessen gjennom kritisk tankegang. Denne metoden har blitt brukt kontinuerlig for å finne løsningsalternativer til prosessen og testene som skal gjøres. I denne oppgaven vil S.C.A.M.P.E.R også bli brukt til å se på muligheten til å kombinere produksjon med etterbehandlingsmetoder, og om dette påvirker materialeegenskapene til endeproduktet. [31-32]

Preferansesett

Dette er en måte å fremstille tilbakemeldingen fra intervjuene i en vektor. Gjennom samtaler med eksperter vil det danne seg et bilde av hva bedrifter verdsetter og har preferanser for. Dette vil også være en metode for å avdekke egenskaper kundegruppen stiller seg indifferente ovenfor, slik at disse kan elimineres ved videre arbeid. Denne metodikken vil også gjøre det lettere å koble AM-produksjon opp mot et eventuelt marked, og vil være et av de sentrale bindeleddene mellom økonomifaget og ingeniørfaget. Denne metodikken setter et par viktige punkter som må følges for at teorien skal kunne fungere, og disse er som følger:

Fullstendighet

Fullstendighet vil si at en konsument enten foretrekker, er indifferent eller ønsker minst mulig av faktoren. Et eksempel på dette vil være at konsumentene ønsker mest mulig funksjonalitet i produktet, men er indifferent ovenfor farge og ønsker et billigst mulig produkt. [33-34]

Refleksivitet

Refleksivitet vil si at konsumenten har en definert preferanse for alle vektorsettene i et utvalg. En konsument kan foretrekke et sett med faktorer over et annet, men en konsument må ha en mening om alle faktorene i preferansesettet. [33-34]

Transitivitet

Transitivitet betyr at hvis en konsument foretrekker et sett over et annet må også konsumenten foretrekke et tredje sett hvis det er bedre for konsumenten enn de to foregående settene. Et eksempel på dette vil være hvis en konsument har en avdekket preferanse for mest mulig kaffe, vil konsumenten alltid foretrekke det alternativet med mest kaffe. [33-34]

Kontinuitet

Kontinuitet betyr at indifferenskurven til konsumenten er avgrenset. Dette punktet handler om at konsumenten vil velge seg frem til den ideelle kombinerte mengden. Dette punktet er mer rettet mot økonomi, og vil ikke være like relevant for denne prosjektfasen. [33-34]

Monotonisitet

Monotonisitet betyr at hvis to faktorer i preferansesettet til konsumenten er bedre enn et annet utvalg vil konsumenten foretrekke det settet som gir konsumenten høyest nytteverdi basert på de faktorene som øker nytteverdien. Dette vil si at hvis en av faktorene i settet øker vil konsumenten ta et valg basert på preferansene. Alle disse nevnte punktene vil antas å være oppfylt siden den aggregerte konsumenten i markedet vil være å anse som rasjonell. [33-34]

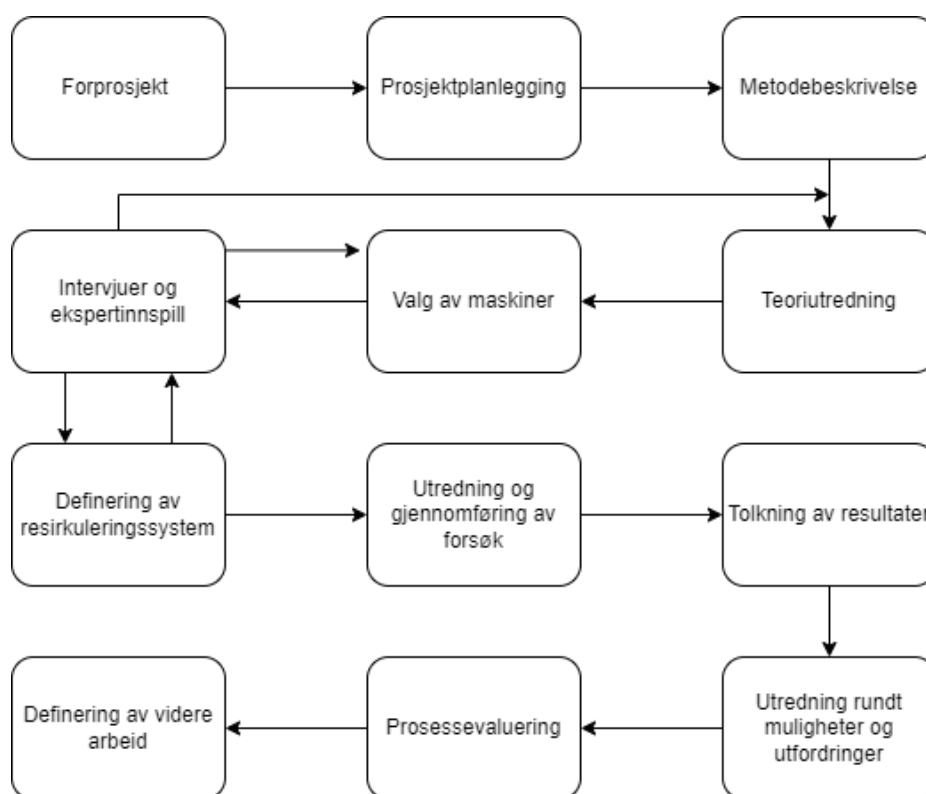
3.3 Kvalitetssikring av prosjekt

For å sikre at prosjektet har tilstrekkelig kvalitet vil fagbøker, forskningsartikler og relevante standarder bli brukt til å utrede rundt teknologi, maskineri og produksjonsprosessen. Videre vil forsøk og forsøksprosessen være utviklet i henhold til standarder slik at de vil være etterprøvbare.

- **ISO 9000** vil være begrepsapparatet til kvalitetssikring av prosjektet
- **ISO 9001:2015** vil være grunnlaget for kvalitetssikring av prosjektet
- **ISO 14001:2015** vil definere bærekraftperspektivet for prosjektet

3.4 Arbeidsmåte, prosesstrinn og trinnspefisering

For å gjøre arbeidsprosessen forståelig har det blitt satt opp en visualisert oversikt over planlagte prosesstrinn og prosjektfaser. Prosessdiagrammet er en planlagt gjennomføring, og vil være utsatt for eventuelle pivoteringer og iterasjoner om dette har muligheten til å påvirke prosjektet på en positiv måte.



Figur 4: Prosessdiagram for prosjektet

3.4.1 Forprosjekt

I denne delen av prosjektet vil prosjektet bli planlagt, og det vil bli gjort en utredning om hvordan fremgangen i prosjektet skal være. Dette blir gjort for å sikre fremgang i prosjektet, og at det skal være tydelig hvordan fremgangen i prosjektet skal være. Dette vil også være et varslingsystem for eventuelle forsinkelser. Det vil bli laget en fremdriftsplan, flaskehalser vil bli kartlagt, oppgaven vil begrenses til relevante problemstillinger og det vil bli gjort en utredning av metodene som skal brukes i forsøket.

3.4.2 Markedsvurdering

Denne delen av prosessen vil bli brukt til å gjøre en utredning om hvilke aktører som er i resirkuleringsmarkedet. Her vil det bli kartlagt hvilke produsenter som selger resirkuleringsutstyr, om det finnes aktører som selger resirkulert materiale. Det vil bli gjort en utredning om suksesskriterier som skal oppfylles for at teknologien skal kunne brukes på et industrielt nivå.

3.4.3 Metodebeskrivelse

I denne delen av prosjektet vil det bli gjort en utredning om metodikken som skal brukes. Her vil det bli kartlagt og utredet rundt de relevante metodikkene, og hvordan disse er tenkt å brukes gjennom prosjektet.

3.4.4 Teoriutredning

I denne delen av prosjektet vil det bli utredet et teoretisk grunnlag for å undersøke de kausale effektene i prosjektet. Det vil bli satt søkelys på hvordan resirkuleringsprosessen påvirker de forskjellige materialene og hvilke faktorer som påvirker materialet. Det vil bli laget en oversikt over de forskjellige materialelegenskapene, og hvordan disse måles.

Videre vil det også bli laget en oversikt over AM-prosessen som brukes i forsøket. Det vil også bli gjort en utredning over faktorer i byggeprosessen som kan påvirke materialelegenskapene.

3.4.5 Valg av maskiner

I denne delen av prosjektet vil det bli gjort en vurdering på hvilke maskiner som skal brukes i prosjektet. Her vil det bli lagt vekt på forskjellige kriterier slik at den endelige løsningen vil kunne levere mest mulig kvalitet i endeproduktet.

3.4.6 Intervjuer og ekspertinnspill

I denne delen av prosessen vil det bli gjort intervjuer med fagkyndige personer for å forme utviklingsprosessen, finne KPI indikatorer som er relevante for innkjøp av maskineri og krav til resirkuleringssystemet for endebbrukere.

3.4.7 Definerings av resirkuleringssystem

I denne delen av prosjektet vil søkelyset bli satt på å produsere et resirkuleringssystem som svarer til kravene definert i prosjektmandatet. Grunnen til at dette defineres som et eget punkt er for å kunne gjøre et grundig arbeid med dette delmålet slik at eventuelt videre arbeid kan bygge på et skalerbart system.

3.4.8 Utredning og gjennomføring av forsøk

For at forsøkene som blir gjort i prosjektet skal være hensiktsmessige, og etter standard vil det bli gjort en utredning rundt gjennomføring og definering av forsøkene. For at forskningsresultatene skal være minst mulig forutinntatt mot eksogene faktorer er det viktig at dette punktet blir grundig definert og relevante krav til metode og gjennomføring blir godt definert.

3.4.9 Tolkning av resultater

I denne delen av rapporten vil det bli lagt fokus på resultattolkning, og resultatene fra testing vil bli presentert og eventuelle funn vil bli avdekket.

3.4.10 Mulighetsstudie for resirkuleringsprosjekter

Denne delen av prosjektet vil sette søkelyset på å definere mulighetene til resirkulering, bruk av resirkuleringsutstyret og produksjon av materialer ved hjelp av resirkuleringssystemet. I denne delen av prosjektet vil også muligheter for videre arbeid bli definert, slik at senere prosjekter kan bygge på resultatene som blir funnet i dette prosjektet.

3.4.11 Prosessevaluering og utredning av videre arbeid

I denne delen av prosjektet vil gjennomføringen av prosjektet bli evaluert. Her vil det bli evaluert hvorvidt hovedmålene og delmålene i prosjektet har blitt besvart.

4 Teori og teknologiutredning

I denne delen av rapporten vil det bli presentert et teoretisk grunnlag rundt produksjonsmetodikken og resirkuleringsprosessen.

4.1 Bakgrunnsteori for materialeegenskaper

For å se på egenskapene til materialene, og hvordan dette påvirker materialeegenskapene til produkter produsert med resirkulerte materialer. For å kategorisere hvilke materialeegenskaper som bør observeres i prosjektet har disse blitt delt inn i fysiske og mekaniske egenskaper. Fysiske egenskaper vil være ting som kan observeres i materiale, og mekaniske egenskaper vil være ting som må testes for å observere. De fysiske og mekaniske egenskapene til materiale er listet opp med karakteristiske egenskaper i tabellen under. [35]

Tabell 7: Oversikt over materialeegenskaper

Egenskaper	Karakteristikk
Fysiske	<ul style="list-style-type: none">• Tetthet• Viskositet• Porøsitet• Permeabilitet• Optiske egenskaper• Krystallstruktur
Mekaniske	<ul style="list-style-type: none">• Flytegrense• Spenning-/tøyningsdiagram• Duktilitet• E-modul• Poissons ratio• Hardhet

For å finne ut hvordan resirkuleringsprosessen kan påvirke de forskjellige egenskapene vil det bli sett på forskjellige materialeegenskaper. Disse er delt inn i fysiske og mekaniske egenskaper, og disse er listet under. Videre vil underkategoriene til de fysiske og mekaniske egenskapene bli grundigere forklart i dette kapitlet.

4.1.1 Fysiske egenskaper

Tetthet

Tetthet er en materialeegenskap som bestemmer hvor tungt et material er basert på en gitt størrelse. Denne størrelsen oppgis ofte som gram per kubikkcentimeter, og er avhengig av tettpakkingen og atomene som utgjør polymerne. Tettheten til PLA er som oftest rundt 1.24 g/cc. [35, 36].

Viskositet

Viskositet defineres som en væskes evne til å motvirke strømning. Det er en viktig egenskap for væsker og semiflytende væsker. I dette prosjektet vil dette være viktig i forbindelse med ekstrudering av polymer i bygge og resirkuleringsprosessen. [35, 37]

Porøsitet

Porøsitet uttrykker hvor mange prosent hulrommene i materialet utgjør av totalvolumet. Noen porøse polymere har felles betegnelsen poromere materialer. Poromerer har egenskapen at de kan slippe gjennom gass som vanndamp, men holde igjen større molekyler som vanndråper. Et eksempel på et promer er Gore-Tex, og kanskje det mest kjente.

Permeabilitet

Permeabiliteten til et polymer er en fysisk egenskap som forteller noe om hvor lett noe kan trenge igjennom materialet. Et eksempel på dette er polymer som brukes i emballasje til mat. Her er det krav om lav permeabilitet slik at produktet beholder farge, smak og kvalitet, samt forlenger holdbarheten. Andre eksempler hvor permeabilitetene til et polymer er viktig vil være beskyttende belegg, filtre og membraner. [35]

Optiske egenskaper

Optiske egenskaper i polymer kan bli målt på mange måter. De mest kritiske egenskapene vil være tørrdis, glans, gjennomsiktighet. Dette er egenskaper som påvirker bruksområdene til polymer, og vil være en kategorisk målbar enhet. [35]

Krystallstruktur

Polymer deles ofte opp i to forskjellige strukturer. Dette er amorfe og krystallinske strukturer, og disse kjennetegnes med hvordan polymerkjedene ser ut. I amorfe polymer vil polymerkjedene være krøllede og innbundet i hverandre. Disse polymerkjedene vil kunne minne om kokt spagetti. Amorfe polymer vil ikke ha et plutselig smeltepunkt, men vil gradvis gå igjennom en glasstemperatur.

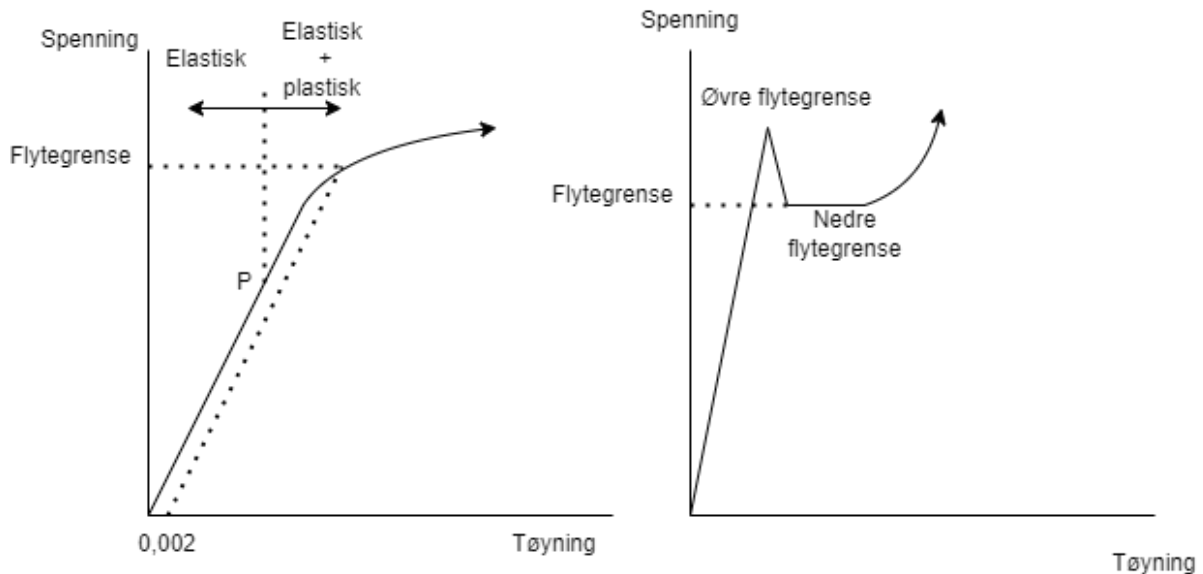
I krystallinske polymerstrukturer vil polymerkjedene være rette, på samme måte som ukokt spagetti. Krystallinske polymer vil ha amorfe områder, og graden av krystallinitet vil variere mellom 0% og 100% avhengig av de amorfe områdene. Krystallinske polymer vil ha en smeltetemperatur. Glasstemperaturen og smeltepunktet vil være påvirket av graden av krystallinitet. [35, 38]

4.1.2 Mekaniske egenskaper

I tillegg til de fysiske egenskapene til polymere vil det være en rekke mekaniske egenskaper som er målbare og kan kategoriseres. Disse vil være som følger.

Flytegrense

Flytegrensen til et material betegner hvor mye spenning et materiale kan ta opp før materialet får plastisk deformasjon. Det er tre måter som kan brukes til å bestemme flytegrensen, og bruken av disse vil påvirke flytegrensen. Metodene for å bestemme verdi for flytegrense er 0.002-forskyvnings regelen, øvre flytegrense og nedre flytegrense. Disse er illustrert i et spenning-/tøyningsdiagram på figuren under. [35]

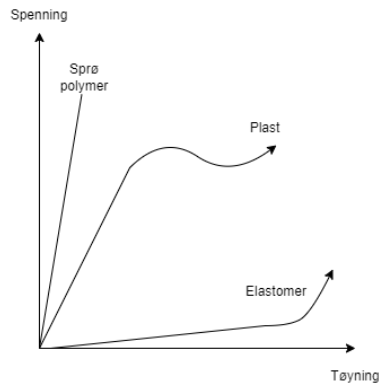


Figur 5: Beskrivelse av flytegrense

I spenning-/tøyningsdiagrammet til venstre er 0.002 regelen brukt. Her trekkes det en parallell linje til spenningskurven, og krysningpunktet mellom kurvene vil være flytegrensen. Øvre flytegrense bestemmes ved å se på knekkpunktet til spenning-/tøyningsdiagrammet, og knekkpunktet før kurven går over i det flate området vil definere øvre flytegrense. Den siste metoden er nedre flytegrense, og her vil materiale være over mot plastisk deformasjon. Denne verdien bestemmes av det flate området i spenning-/tøyningsdiagrammet, og vil være et mer konservativt estimat enn øvre flytegrense. [35]

Spenning/- Tøyningsdiagram

Spenning-/tøyningsdiagrammet til et material beskriver mange av materialets mekaniske egenskaper. I dette prosjektet er det mest relevant med spenning-/tøyningsdiagrammene til polymer, og i figuren under er det illustrert sprø polymer, plast og elastomer. [35]



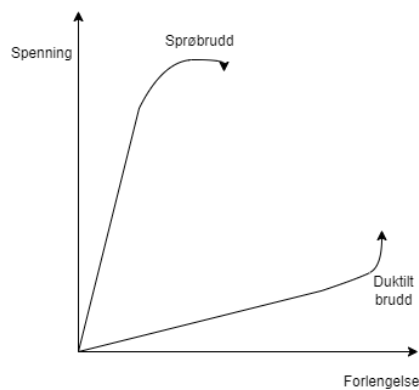
Figur 6: Illustrasjon av spennig-/Tøyningsdiagram

Duktilitet

Materialer kan deles opp i to kategorier. Disse er duktile og sprø materialer, og dette påvirker hvordan materialet går i brudd. Duktile materialer vil som regel forlenge seg før de går i brudd, men sprø materialer vil somregel gå i brudd uten at de formerer seg mye. [35]

Duktilitet måles i hvor mye forlengelse det er i materialet ved brudd. Dette blir som regel gjort i prosent forlengelse i en prøvestav, og kan beregnes med formelen under.

$$\%EL = \left(\frac{l_f - l_0}{l_0} \right) * 100 \quad (4-5)$$



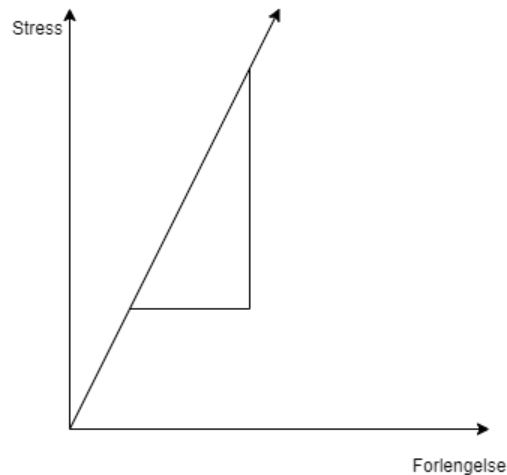
Figur 7: Sammenligning mellom bruddkarakteristikk og spennings-/ Tøyningsdiagram

E-modul

E-modul er et konstant som beskriver forholdet mellom spenning og forlengelse. Dette konstante blir omtalt som elastisitetsmodulen til et materiale, og kan tenkes på som materialets stivhet eller evnen til å motstå elastisk deformasjon. [35]

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (4-5)$$

Utregningen av elastisitetsmodulen kan gjøres med formelen over, og dette forholdet er illustrert på figuren under.



Figur 8: Illustrasjon av E-modul

Poisson's ratio

Poisson's ratio er parameter som beskriver forholdet mellom forlengelse i to dimensjoner. Når en prøvestav opplever stress, vil den forlenge seg i kraftretningen (z) og få en innsnevring i x-aksen og/eller y-aksen. Formelen for Poisson's rate er gitt i formelen under. [35]

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \quad (4-6)$$

Hardhet

En annen viktig egenskap til materiale er hardhet. Dette forteller noe om hvor resistent et materiale er til lokal plastisk deformasjon. Det er en rekke forskjellige måter å gjennomføre hardhetstester på, og de mest kjente er: [35]

- Rockwell
- Brinell
- Knoop & Vickers
- Shore

I dette prosjektet vil det i hovedsak bli sett på Shore tester, og mer spesifikt Shore D tester for å bestemme hardheten til polymer. Dette blir gjort ved å penetrere overflaten til en prøve med en nål som er koblet til et durometer. Dette vil gi en indikasjon på overflatehardheten til materialet. [35, 39]

4.2 Teori rundt polymer

For å skape et fundament og en generell forståelse for polymer og resirkuleringsprosessen blir det gjort en utredning om polymer. Her vil det bli lagt vekt på hvordan polymerene er bygget opp, og hvordan polymerstrukturen påvirker resirkuleringssevnene til polymerene. [35]

Majoriteten av polymerer er organiske, eller har utspring fra organisk kjemi. Selve begrepet polymer kommer fra sammensetningen; Poly, som betyr mange, og Mer som betyr nummer av enheter. Dette blir sammensatt til polymer, som grovt oversatt betyr «mange enheter». Disse strukturene vil bli forklart på et overordnet nivå for å få oversikt over hvordan disse kan kjennes igjen. Til å begynne med er majoriteten av organiske materialer hydrokarboner, og dette er molekyler som er bygget opp av hydrogen og oksygen. Disse molekylene er bygget opp med kovalente bånd, og hvert karbonatom har fire elektroner som kan danne kovalente bånd. Hydrogen derimot har kun et elektron som kan danne kovalente bånd, og et kovalent bånd oppstår når disse atomene binner seg sammen gjennom et elektron. Det kan også dannes dobbel og trippeltbånd der et atom binder seg med et annet gjennom flere elektroner. [35]

Disse molekylene kan deles inn i u-saturerte og saturerte, og forskjellen mellom disse er antall kovalente bånd. U-saturerte molekyler er molekyler der karbonatomet ikke er bundet til det maksimalt antall atomer, og saturerte er der alle de kovalente båndene er enkle bånd. Det kan også oppstå en situasjon der hydrokarbonene har samme komposisjon, men forskjellige atomfordeling. Denne forskjellen i atomstrukturen vil påvirke de fysiske egenskapene til polymerene, og vil påvirke ting som kokepunkt osv. Dette fenomenet kalles isomerisering. [35]

Polymer er enorme sammenlignet med hydrokarbonkjeder, og blir ofte referert til som makromolekyler. Innad i molekylene er atomene bundet sammen med kovalente interatomiske bånd, og karbonatomer oppgjør som regel kjernestrukturen i polymerkjeder. [35]

I figuren over vil karbonatomene ha to valenselektroner som kan binde seg til andre molekyler og radikaler som er i nærvær av karbonkjeden. Disse makromolekylene kan bli bygget opp av strukturelle enheter, og disse vil bli kalt repeterende struktur. [35]

Hvis denne repeterende strukturen er av samme art vil polymere være et homopolymer. Er kjeden bygget opp av flere molekyler vil det være et ko-polymer. Dette kan også påvirke funksjonaliteten til polymerkjeden. Her vil bi-funksjonelle polymerkjeder kunne binde seg gjennom to kovalente bånd, og i trifunksjonelle polymerkjeder vil de kunne forme tre kovalente bånd. [35]

Det disse molekylene er bygget sammen i polymerkjeder. Her har molekylene bundet seg sammen med en repeterende struktur, og måten disse molekylene har bunnert seg sammen på vil ha en innvirkning på materialegenskapene. Polymer vil som regel ikke være en distinkt struktur, men ofte en kombinasjon av flere. De vanligste strukturene er som følger. [35]

Lineære polymerkjeder

En type polymerkjede er lineære polymer, og her vil molekylene være linket sammen i lange lineære kjeder. Disse kjedene er fleksible, og det vil ikke være noen sammenbindinger mellom de repeterende strukturene i polymerkjedene. Det vil kunne oppstå van der Waals bindinger og hydrogenbindinger som skaper noen form for kontakt mellom polymerkjedene. [35]

Avgreinede polymerkjeder

En annen type polymerkjede er avgreinede polymerkjeder, og her vil det være avgreininger fra den lineære polymerkjeden. Disse avgreiningene er regnet for å være en del av hoved polymerkjeden, og disse avgreiningene vil føre til at pakkningsgraden går ned. [35]

Tverrbundete polymer

En tredje type polymer er tverrbundete polymerkjeder. Her vil lineære polymerkjeder være sidestilt og bundet sammen med kovalente bånd. Disse båndene oppstår som regel gjennom irreversible kjemiske reaksjoner, og blir skapt gjennom å tilsette additive atomer eller molekyler som skaper sammenbindingene mellom polymerkjedene. Mange typer gummi faller også i denne kategorien, og de kovalente båndene blir skapt i en vulkaniseringsprosess. [35]

Nettverkspolymerer

Den siste typen polymer som vil bli nevnt er nettverkspolymerkjeder. Dette er som oftest multifunksjonelle monomerer som former tre eller flere aktive kovalente bånd som skaper et tredimensjonalt nettverk. Polymerer som har en høy grad av tverrbindinger vil kunne bli klassifisert som nettverkspolymerkjeder. Nettverkspolymerkjeder kjennetegnes ved at de har distinkte mekaniske og termiske egenskaper. [35]

Det finnes to type underkategorier for polymer som beskriver de mekaniske egenskapene under høy temperaturpåvirkning, og disse er termosett og termoplast. [35]

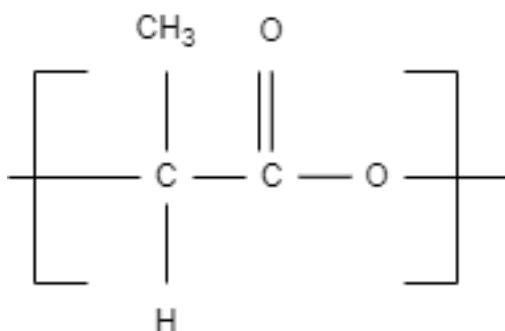
Termoplast blir mykt når det varmes opp, og vil til slutt smelte. Videre vil polymere solidifisere når materiale blir avkjølt, og denne prosessen er reversibel og repeterbar. På et molekylært nivå vil sekundærbindingene mellom polymerkjedene forsvinne med temperaturøkningen, og den relative bevegelsen mellom polymerkjedene øker når stresspåkjenningen øker. Den irreversible degraderingen av termoplastiske polymer skjer først når temperaturpåvirkningen blir for høy, og dette svekker de mekaniske egenskapene til materialet. Termoplastiske polymer er også generelt myke materialer, og majoriteten av termoplast er lineære polymerkjeder eller polymerkjeder med noen avgreininger. Disse materialene blir som oftest produsert med varme og presspåvirkning. [35]

Termosett polymer er som oftest nettverkspolymer. Denne undergruppen av polymer blir permanent harde under produksjonsprosessen, og vil ikke mykne opp ved varmpåvirkning. Nettverkspolymer har kovalente bånd mellom sidestilte molekyler, og disse båndene blir formet under varmebehandling eller herdingsprosesser. Dette gjør at polymerene er gode på å motvirke vibrasjoner og rotasjoner i polymerkjeder under høy temperatur, og denne typen polymer kan brukes i miljøer med mye varmpåvirkning. Kryssbindingene vil oppstå mellom 10-50% av de repeterende strukturene, og kun oppvarming til for høye temperaturer vil føre til

at de kovalente båndene mellom polymerkjedene oppløses, og degradering i polymere sine egenskaper. Termosett materialer er som regel hardere og sterkere enn termoplast, men disse materialene kan ikke bli mekanisk resirkulert på samme måte som termoplast. [35]

Oppbygning av PLA

Siden prosjektet er begrenset til PLA har det blitt sett nærmere på den kjemiske strukturen. PLA er en termoplast, og den repeterende strukturen til polymere er illustrert på figuren under.



Figur 9: PLA struktur

For å gi en oversikt over materialegenskapene til PLA har det blitt hentet inn informasjon om verdier som kan forventes av de forskjellige materialegenskapene. Noen av egenskapene til PLA er oppsummert i tabellen under, og det er også inkludert ekspertmeninger rundt materialets egenskaper.

Tabell 8: Oversikt over materialegenskaper for PLA. [40]

Egenskaper	Verdier
Flytegrense	65 MPa
Stivhet	7.5/10
Holdbarhet	4/10
Maks service temperatur	52 °C
Termisk ekspansjonskoeffisient	68 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$
Tetthet	1.24g/cm ³
Pris	\$10-\$40
Brukervennlighet	9/10
Ekstrudertemperatur	190-220 °C
Bed Temperatur	45-60 °C

4.3 Teori rundt resirkulering av polymer

Det finnes i utgangspunktet fire forskjellige typer resirkuleringsprosesser, og disse er som følger. Primær resirkulering, sekundær resirkulering, tertiær resirkulering og kvartær resirkulering. Primær resirkulering innebærer ekstrudering av plast som tidligere har vært i bruk. Sekundær resirkulering krever sortering, redusering i avfallsstørrelse og ekstrudering. Ved god kontroll og kvalitative prosesser kan polymer gå igjennom mange primær og sekundære resirkuleringsprosesser. [35]

Tertiær resirkulering blir brukt i situasjoner der polymerene ikke lenger er egnet til mekanisk resirkulering. Disse prosessene defineres ofte som kjemisk resirkulering, og er ofte komplementære til tradisjonelle resirkuleringsmetoder. Disse metodene har ofte et stort inntjeningspotensial, og kan returnere polymer til monomer. [35]

Kvartær resirkulering blir ofte brukt til plastikk som ikke lenger egner seg for noen annen form for resirkulering, og blir til energiutvinning via pyrolyse. Denne prosessen kan også ha utilsiktede eksternaliteter som samfunnsøkonomiske kostnader og klimagassutslipp. [41, 42]

Hvordan polymer resirkuleres varierer med hvilke typer polymer som skal resirkuleres, hvordan avfallet klassifiseres. Primær og sekundær resirkulering blir definert som mekanisk resirkulering i ISO 15270:2008, og i denne delen av prosjektet er det forutinntatt at plast er resirkulert og homogen. Den mekaniske resirkuleringsprosessen består av følgende punkter.

- Innsamling og sortering
- Vask
- Kverning
- Tørking
- Ekstrudering

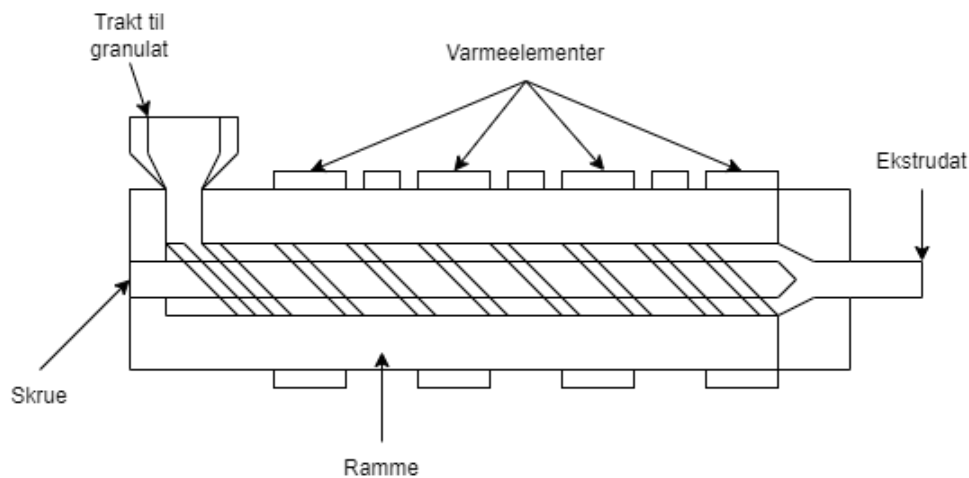
Her vil det være lagt vekt på innsamling og sortering slik at all plasten har samme innhold. I dette prosjektet blir det isolert sett på PLA, så innsamling og sorteringsprosessen vil ikke være like kritiske som i en reell situasjon. Hovedfokuset for dette avsnittet er å definere bransjestandard for kverning, vasking, tørking og ekstrudering. [43-49]

Det første steget i prosessen som skal gjøres er vasking og shredding/grinding av plastbiter. Denne delen av prosessen består av å redusere deler fra tidligere produksjon til små flak som kan brukes videre i resirkuleringsprosessen, og minimere avfallsstoffer i plast blandingene. [50]

Den neste delen av resirkuleringsprosessen vil være tørking av den kvernete massen. Dette blir gjort for å koke ut eventuell fukt i massen, og gjøres ved å varme opp den kvernete massen til en gitt temperatur over en gitt periode. [48]

Ekstruderingsprosessen består av støpning av viskøse termoplaster som blir satt under press, og ekstrudert ut gjennom en dyse. En mekanisk skrue drar granulatet gjennom rammen til ekstruderingsmaskinen, hvor det smeltede granulatet blir komprimert, smeltet og formet til en kontinuerlig strøm av viskøst materiale. Solidifiseringen av ekstrudatet skjer som regel

gjennom vifter eller vannavkjøling. Dette er en metode som er tilpasset ekstruderingen av lange staver, tuber eller filamenter. Denne prosessen er også illustrert i figuren under.



Figur 10: Illustrasjon av en ekstruderingsmaskin

Etter at polymere har blitt resirkulert et gitt antall ganger kreves det en kjemisk resirkulering vil det være flere alternativer for avfallet fra resirkuleringsprosessen. Siden PLA har en ester gruppe i seg vil det være mulig å bryte opp polymerkjeden ved hjelp av en katalysator. PLA er naturlig bionedbrytbart, men ved hjelp av en katalysator reduseres tiden som kreves for å gjennomføre prosessen drastisk.

Polymer har flere bruksområder i enden lav livssyklusen, og det er mulig å gjenbruke «avfall» fra den mekaniske resirkuleringsprosessen til oppsirkulering og kjemisk resirkulering. Dette avfallet kan oppsirkuleres til blant annet drivstoff, høyverdige kjemikalier og andre avanserte materialer. [51]

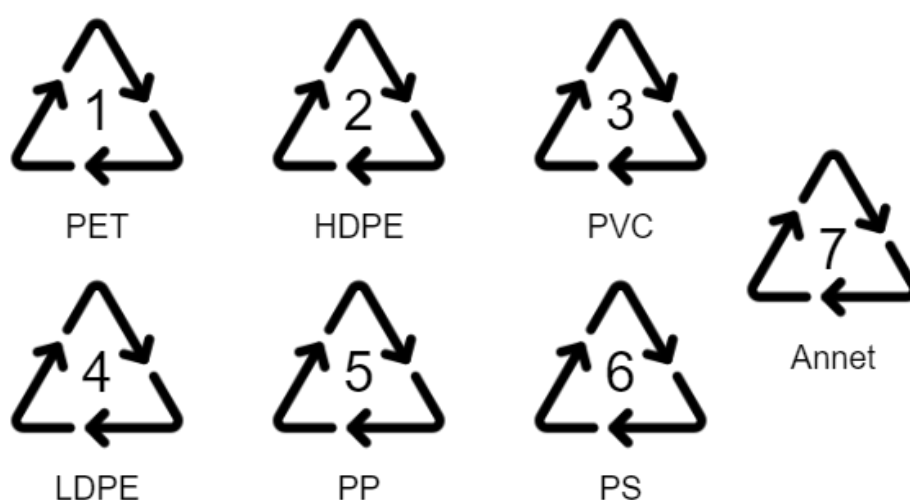
Mekanisk resirkulering er den mest utbredte resirkuleringsmetoden i industrien, og er den mest kostnadseffektive løsningen. Selv om prosessen er forholdsvis enkel vil det fremdeles være utfordringer assosiert med resirkuleringsmetoden. Blant disse problemene finnes det utfordringer rundt bruk av fargestoffer, stabilisatorer, fyllmasse ect. Dette gjør at polymer som virker forholdsvis like vil kunne bli påvirket av disse tilsetningene, samtidig som formen til polymerkjedene kan ha en stor innvirkning på de mekaniske egenskapene. Butan og isobutan inneholder de samme molekylene, men smeltetemperaturen ol. varierer med strukturen til den repeterende strukturen. [52]

Videre er det en rekke andre faktorer som kan påvirke resirkuleringsprosessen, og eksempler på dette kan være at produktet har vært utsatt for mye sollys. Et annet eksempel, og en vesentlig utfordring er at det finnes flere forskjellige typer polymer i blandingen som skal resirkuleres. Grunnen til dette er forskjellige smeltetemperaturer på forskjellige type polymer, og problemstillingen er den samme som isomerer som tidligere har blitt nevnt. Videre vil det også være problemer med materialer som inneholder tråder som karbonfibere og andre legeringer.

4.4 Identifisering og merking av polymer

For å kunne resirkulere plastavfall er det viktig at alt blir sortert basert på type polymer som inngår i plastproduktet. For å identifisere plast kan det bli brukt merking på forskjellige plastprodukter. Videre kan det testes om polymere er termosett eller termoplast, og dette kan gjøres ved en lighter. Om polymere smelter/blir mykt ved varmpåkjening er polymere termoplast, og om polymere forblir hardt vil det være en termosett. Dette kommer av kryssbindingene som ble nevnt i kapittel 4.2.

Det finnes også systemer som er laget for å kunne identifisere og kategorisere plasttyper. For at dette skal være enkelt blir mange plastprodukter merket med typen polymer som er brukt i produksjonssyklusen.



Figur 11: Oversikt over resirkuleringsmerker

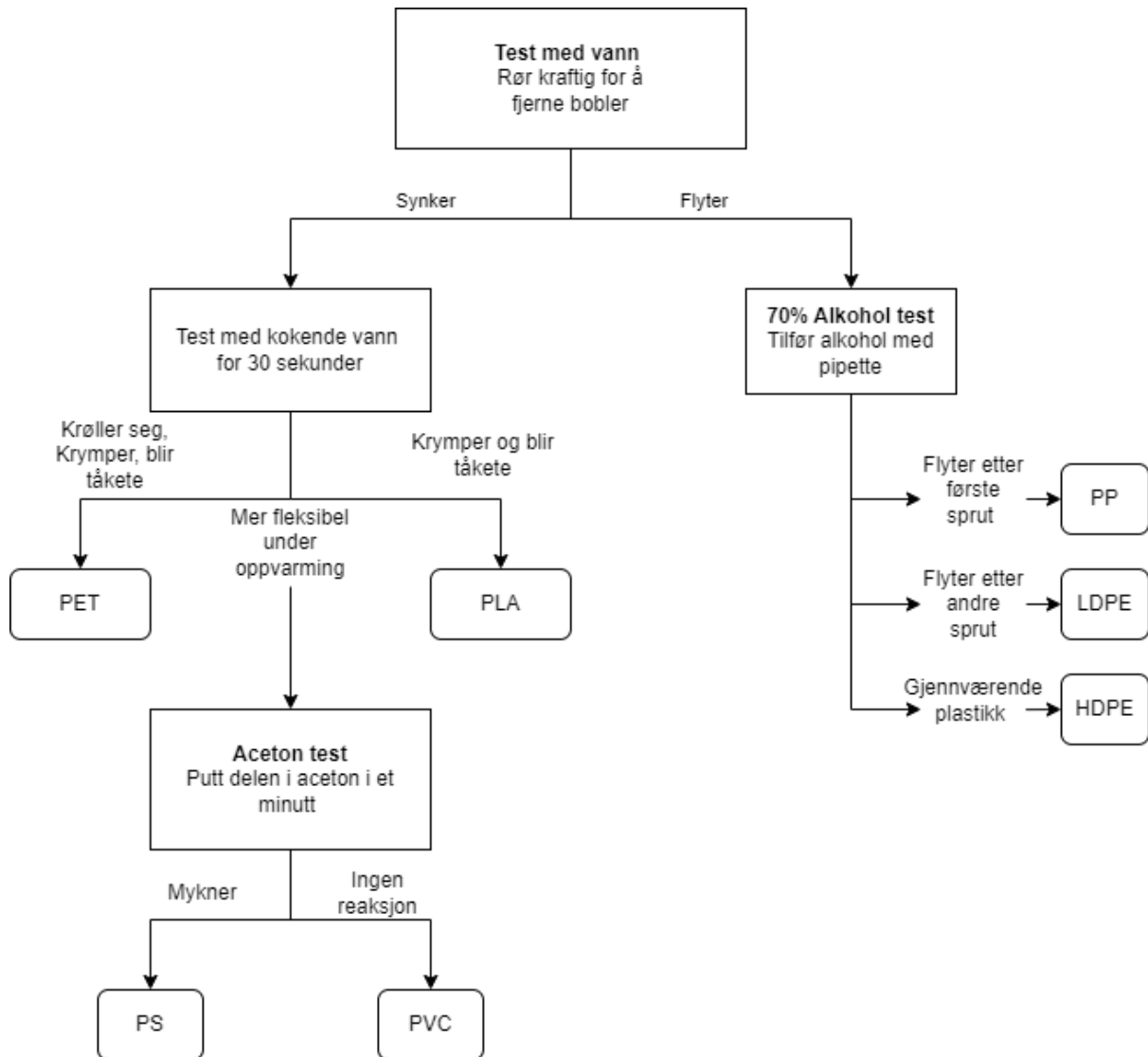
Som tidligere forklart i rapporten vil det være forskjellige egenskaper med polymer som resultat av monomeres oppbygging og sammenstillingen i polymerkjedene. Dette resulterer i fysiske egenskaper som det vil være mulig å kategorisere og identifisere polymerene. Noen av disse egenskapene er illustrert på tabellen under. [53]

Tabell 9: Fysiske egenskaper til forskjellige polymer [54]

Polymer	Tetthet (g/mL)	Glasstemperatur (C)	Smeltepunkt (C)
PET eller PETE	1.38 - 1.39	60 - 85	250 – 265
HDPE	0.95 - 0.97	~ - 125	~138
PVC	1.16 – 1.35	81 - 98	200-300
LDPE	0.92 – 0.94	-128 til -30	~ 138
PP	0.90 – 0.91	- 8	174 – 177
PS	1.05 – 1.7	80 - 100	240
PLA	1.25 – 1.26	50 - 80	173 - 178

Basert på verdiene i tabellen over har det blitt utviklet et flytdiagram som hjelper til med å klassifisere forskjellige typer resirkulerbar plast. Dette er gjort i rapporten «*A novel, simplified scheme for plastics identification*», og tabellen under er bygget ut fra denne rapporten.

Tabell 10: Flytdiagram for å identifisere resirkulerbar polymer [54]



Figur 12: Karakteriseringsdiagram for PLA

Denne identifiseringsprosessen kan brukes til å identifisere hvilke typer polymer som undersøkes, men vil ikke kunne brukes til å identifisere antall termiske sykluser polymere er utsatt for. [54]

4.5 Resirkulering og materialkvalitet

For å gi et grundigere inntrykk av hvordan materialkvalitet påvirkes av resirkulering har det blitt gjort en utredning rundt materialkvalitet og hvordan resirkulering påvirker de mekaniske og fysiske egenskapene til materiale. Denne informasjonen vil bli brukt til å veilede og utvikle resirkulering og sorteringssystemet.

For å finne en best mulig blanding mellom jomfru materiale og resirkulert materiale. Dette er for å sikre gode egenskaper i materiale som har blitt resirkulert. For blanding av resirkulert materiale og jomfru materiale har det blitt undersøkt hva andre aktører bruker som blandingsforhold. Her har det vist seg at Infinitum bruker et blandingsforhold på 80-20, der 80% er resirkulert materiale og 20% er jomfru materiale. [20, 21]

Antall resirkuleringssykluser materialet kan brukes før det må gjennom en resirkuleringsprosess vil defineres av bindingspotensialet til polymere. Etter flere ganger gjennom resirkuleres prosessen vil egenskapene og strukturen til polymerene påvirkes. Den repeterende strukturen vil være den samme, men flere aspekter ved polymerkjeden vil endres seg. For å få en oversikt over hvor mange resirkuleringssykluser som kan forventes har det blitt sett på tidligere arbeid innen område, og blitt kartlagt tidligere funn. Et ideelt antall resirkuleringsprosesser har blitt identifisert for PET, og Tomra har definert antall sykluser til 5. [20, 21]

Det har tidligere blitt gjort studier for å sammenligne jomfru og resirkulert PLA, og hvordan resirkuleringsprosessen påvirker de mekaniske egenskapene til materialet. Forsøkene viste at resirkuleringsprosessen påvirker flytegrensen til materialet negativt. Denne reduksjonen ble målt til rundt 11%. Videre viser det seg også at bruddstyrken til skjærlaster reduseres med rundt 5% som følge av resirkuleringsprosessen, og dette resultatet gjenspeiler seg i hardheten til materialet som også faller med 4%. Slagseigheten til PLA er den mekaniske egenskapen som påvirkes mest, og denne svekkes med hele 50% etter resirkulering. [55]

Et annet studie viser tilsvarende resultater, men ikke like radikale endringer. I dette studiet har det blitt testet hvordan forskjellige materialegenskaper påvirkes av resirkuleringsprosessen. Testingen av strekkeegenskapene til materiale har blitt gjort med 50 prøvestaver etter ISO 527-2, og i hver av gruppene «resirkulert» og «jomfru» har det blitt produsert 25 prøvestaver. Her kommer det frem at gjennomsnittlig flytegrense faller med ca 11%, og dette resultatet er statistisk signifikant med en p-verdi på tilnærmet lik null. Standardavviket til distribusjonen av resirkulerte prøvestaver er nesten dobbelt så stort som standardavviket til prøvestaver produsert med jomfru materiale. I dette studiet har det blitt målt høyere skjæregenskaper hos resirkulerte prøvestaver med en p-verdi nærmere null. Også i dette tilfellet er standardavviket vesentlig høyere enn hos jomfruplasten.

Den siste materialegenskapen som har blitt testet er overflatehardhet, og denne har sunket med rundt 2%. Her har det blitt testet med 32 prøvestaver i resirkulert og jomfru plast, og alle prøvene har gått igjennom en shore D test. Det viser seg å være en statistisk signifikant forskjell, og sammenligningen av fordelingene har en p-verdi på tilnærmet lik null. I likhet med alle de andre forsøkene har også de resirkulerte prøvene et vesentlig høyere standardavvik enn jomfruplasten. [56]

Et tredje studie har også undersøkt hvordan mekanisk resirkulering har påvirket de mekaniske egenskapene til PLA. Her har det blitt brukt et spesialtilpasset resirkuleringssystem, og polymere ble resirkulert opptil tre ganger. Jomfruplast hadde en flytegrense på 69,24MPa, PLA som har blitt utsatt for en termisk resirkuleringsprosess hadde en flytegrense på 57,73MPa

(17% reduksjon) og PLA som har blitt resirkulert tre ganger hadde en flytegrense på 42,41MPa (~39% reduksjon). Det var også gjort forsøk på PLA som hadde blitt resirkulert fire og fem ganger, men disse prøvene hadde store avvik i målingene. Disse prøvene viste til at materialkvaliteten falt ytterligere, og ble sprøere jo flere resirkuleringssykluser det gikk igjennom. Den nedgående trenden for flytegrensen er også påvist å være uavhengig av produksjonsorienteringen til prøvestavene. [57]

Videre har det også blitt påvist en korrelasjon mellom molekylærvekten til polymere og flytegrensen til materialet. Det kommer frem at den molekylære vekten gikk fra 175,888 g/mol ble redusert til 90,021 g/mol, og dette er en reduksjon på rundt 49%. Samtlige resultater er oppsummert under. [57]

Tabell 11: Sammenheng mellom molekylærvekt og resirkulering

Resirkuleringssykluser	Molekylærvekten (g/mol)	Reduksjon
Jomfruplast	175,888	-
1	148,095	15,9%
3	110,518	37,1%
5	90,021	48,8%

Som tabellen over viser kommer det tydelig frem at molekylærvekten reduseres med antall resirkuleringssykluser, og polymere degraderer helt ned til 51,2% av den originale vekten. [57]

Et annet studie på dette området har kommet frem til at den molekylære vekten og glasstemperaturen til PLA påvirkes av resirkuleringsprosessen. I rapporten «*Deterioration in the Physico-Mechanical and Thermal properties of biopolymers due to reprocessing*» kommer det frem at disse egenskapene henger sammen, og at om molekylærvekten til polymere reduseres vil også glasstemperaturen reduseres. I likhet med de andre studiene har også denne rapporten konkludert med at molekylærvekten faller med antall termiske sykluser.

4.6 Generalisering av AM produksjonsprosessen

Det finnes mange forskjellige former for additiv tilvirkning, og for dette prosjektet er det ekstruderingsbaserte systemer som vil være mest relevant. Ekstruderingsbaserte systemer er det mest populære produkter, og denne prosessen er hyppig brukt innen prototyping. En varmekilde blir ofte brukt til å omarbeide materiale til en halvfast tilstand slik at det kan ekstruderes ut på byggeplattformen. Etter hvert som konstruksjonen bygges opp av maskineriet vil byggeplattformen bevege seg nedover, eller ekstruderingshode bevege seg oppover slik at produktet kan bygges i 3 dimensjoner. [58]

Den ekstruderingsbaserte produksjonsmetoden har en rekke fellestrekk. Fellestrekkene til alle ekstruderingsbaserte systemer er som følger;

- Lasting av materiale
- Smelting av materiale
- Presspåvirkning for å ekstrudere materiale gjennom dysen
- Ekstrudering
- Plotting av ekstrudat basert på en predefinert bane
- Binding mellom ekstrudat og plattform, eller ekstrudat og tidligere ekstrudert materiale
- Bygging av støttestruktur slik at kompleks struktur kan bygges

4.7 Teori rundt FDM prosessen

Siden prosjektet har blitt begrenset til å omfatte polymer har det blitt valgt å bruke en ekstruderingsbasert produksjonsmetode. For å begrense prosjektet ytterligere har det blitt valgt å bruke en FDM maskin, og teorien bak byggeprosessen er forklart grundigere i dette kapitlet.

En enkel måte å forklare ekstruderingsbaserte produksjonsmetoder på er å sammenligne ekstruderingshode med en kremsprøyte. Materialet vil bli oppbevart i sprøyten, og når man presser på reservoaret vil kremen bli presset ut gjennom dysen. I ekstruderingsprosessen vil filamentet som dyttes gjennom ekstruderingshode være kraftpåvirkning som presser byggemateriale ut av dysen. [58]

Ekstrudatet som bygger opp konstruksjonen blir ofte kalt «roads», og dette er materialet som legges på byggeplattformen eller å toppen av tidligere ekstrudert materiale. Ekstruderingsystemet bør holde en konstant fart og trykk slik at tverrsnittet til ekstrudatet blir konstant. Deretter vil de ekstruderte banene binne seg sammen på tvers av lagene basert på temperatur og tverrsnitts arealet. [58]

I forklaringen av prosessen har det blitt satt søkelys på smelteprosessen til filamentet, og hvilke faktorer som påvirker denne prosessen.

4.7.1 Lasting av materialet

I den første delen av prosessen vil filamentet bli lastet inn i ekstruderingshodet. For at materiale skal kunne ekstruderes må det finnes et reservoar av tilgjengelig materiale. Materialet fra filamentrullen blir kontinuerlig foret inn i reservoaret, og her blir filamentet smeltet slik at det kan ekstruderes ut av dysen. Reservoaret blir etterfylt med byggemateriale gjennom hele prosessen, og etter påfyllingen skjer ved hjelp av ruller inne i ekstruderingshodet. Disse rullene i kombinasjon med filamentet generer som regel nok trykk til å dytte det smeltede materiale ut gjennom ekstruderingsdysen. [58]

4.7.2 Smelting av materiale

Ekstrudering baserer seg på at materiale som oppbevarer seg i reservoaret vil bli smeltet, og videre dyttet ut gjennom dysen til printerens. Dette materialet vil stivne raskt etter at det har blitt

dyttet ut på byggeplattformen, og er som regel flytende eller semi-flytende under ekstruderingsprosessen. [58]

Denne varmen blir som regel tilført av varmekabler som ligger i ekstruderingshode, og ideelt sett skal denne temperaturen være den samme gjennom hele byggeprosessen. Dette byr på utfordringer i form av størrelse på reservoaret, og jo større reservoaret er jo vanskeligere er det holde en lik temperatur på byggematerialet. Her vil det være utfordringer assosiert med varmeoverføring, termisk konduktivitet og posisjon på temperatursensoren. [58]

Filamentet i reservoaret bør holdes i en flytende fase, og ved lavest mulig temperatur. Grunnen til dette er at polymer blir ødelagt raskere ved høye temperaturer. Videre kan for høye temperaturer føre til at det smeltede filamentet brenner seg fast i reservoaret, og dette vil være vanskelig å fjerne og kan kontaminere fremtidig byggeprosesser. Høye temperaturer kan også føre til at ekstrudatet krever ekstra avkjøling når det har blitt plassert på byggeplattformen. [58]

4.7.3 Ekstrudering

I ekstruderingsprosessen vil formen og størrelsen på dysen bestemme dimensjonene på ekstrudatet. En større dyse vil gjøre ekstruderingsprosessen raskere, men vil også føre til mindre presisjon i figuren sammenlignet med CAD modellen. Denne størrelsen vil også definere minstestørrelsen på konstruksjoner som kan lages. MEX egner seg derfor best til produksjon av større deler der veggtykkelsen er minst dobbelt så stor som den nominelle diameteren på dysen. [58]

Massestrømmen i en ekstruderings prosess defineres av trykkforskjellen mellom atmosfæretrykket og trykket i reservoaret. Selv om dette er grunnprinsippet for en standard ekstruderings prosess vil det kunne variere litt med AM-produksjon. Her vil trykket som dytter materialet ut av dysen komme fra nytt materiale som føres inn i ekstruderingshode. [58]

For å definere hvor mye materiale som kommer ut av dysen kan det settes opp en forenklet uttrykk for massestrøm. Her vil massestrømmen være relatert til trykkfall, geometrien på dysen og viskositeten til materialet. I uttrykkene som beskriver vil notasjonen f være relatert til filamentet, og r vil være relatert til ekstrudat på byggeplattformen. Volumstrømmen inn i reservoaret, der hvor filamentet blir smeltet vil være definert i formelen under. [58]

$$Q = v_r \pi r_f^2 \quad [4-6]$$

Her vil G , være hastigheten filamentet blir matet inn i reservoaret, r vil være radiusen til filamentet og Q vil være volumstrømningen av filament inn i reservoaret. Ved dysen vil det også være en volumstrømning som beskriver hvor mye av det smeltete filamentet som kommer ut. Denne sammenhengen er gitt i formelen under. [58]

$$Q = v_r WH \quad [4-7]$$

Her vil G , være avsetningshastigheten, W vil være bredden på ekstrudatet som legges på plattformen og H vil være høyden på ekstrudatet. Hvis ekstrudatet er sirkulært vil W og H ha samme verdi, men det antas at ekstrudatet er mer rektangulært formet. [58]

Siden volumstrømningen inn og ut av reservoaret må være den samme kan disse uttrykkene settes lik hverandre for å finne et uttrykk for matingshastigheten av filamentet. Dette uttrykket er beskrevet under. [58]

$$v_f = \frac{v_r WH}{\pi r_f^2} \quad [4-8]$$

Videre kan matingshastigheten relateres til hastigheten på motorene som driver rullene som mater materialet inn i reservoaret.

$$v_f = \omega_p R_p \quad [4-9]$$

Her vil ω_p være vinkelhastigheten til rullene og R_p vil være radiusen til rullene. Dette uttrykket kan løses for ω_p og det er mulig å bestemme hastigheten på rullene slik at filamentet blir mateti ønsket hastighet. Denne sammenhengen er gitt under. [58]

$$\omega_p = \frac{v_f}{R_p} \quad [4-10]$$

Det er også mulig å sette opp et uttrykk som beskriver hvor mye kraft som trengs for å presse ekstrudatet gjennom dysen. Dette kan gjøres ved å bruke trykkfallet mellom reservoaret og atmosfæretrykket. Dette uttrykket er gitt under. [58]

$$F = \Delta PA \quad [4-11]$$

$$\Gamma = FR_p \quad [4-12]$$

Denne modellen er basert på antagelsen om at det kun er en motor som driver rullene gjennom et gir. Om kraften som blir generert av rullen overstiger det nødvendige trykket for å drive filamentet gjennom reservoaret vil det forekomme vipping i filamentet. Dette forutsetter at det ikke er noen utgliding mellom byggematerialet og rullene. Denne analysen indikerer at matingskraften er relatert til E-modulen, og at det er vanskelig å bruke sprø materialer fremfor mer duktile. Dette vil si at kompositt filamenter som bruker keramer ol. vil kreve høy presisjon i matningshastigheten. En økning i E-modulen vil føre til høyere trykkforskjell, og som følge av dette må det genereres en høyere kraft i rullene. Dette fører også til at det er større sjanse for at filamentet glipper, eller at det blir en forskjell i input og output som fører til at strømningen av filamentet stopper, eller at materialet vipper i inngangen til ekstruderingshode. [58]

$$P_{mot} = \omega_p \Gamma \quad [4-13]$$

Denne modellen er basert på antagelsen om at det kun er en motor som driver rullene gjennom et gir. Om kraften som blir generert av rullen overstiger det nødvendige trykket for å drive filamentet gjennom reservoaret vil det forekomme vipping i filamentet. Dette forutsetter at det ikke er noen utgliding mellom byggematerialet og rullene. Denne analysen indikerer at matingskraften er relatert til E-modulen, og at det er vanskelig å bruke sprø materialer fremfor

mer duktile. Dette vil si at kompositt filamenter som bruker keramer ol. vil kreve høy presisjon i matningshastigheten. En økning i E-modulen vil føre til høyere trykkforskjell, og som følge av dette må det genereres en høyere kraft i rullene. Dette fører også til at det er større sjans for at filamentet glipper, eller at det blir en forskjell i input og output som fører til at strømmingen av filamentet stopper, eller at materialet vipper i inngangen til ekstruderingshode. [58]

4.7.4 Solidifisering

Etter at materialet har blitt varmet opp i reservoaret vil ekstrudatet stivne. Ideelt sett skal ekstrudatet beholde form og størrelse etter at det har blitt lagt på byggeplattformen. Det er derimot faktorer som internspenninger i materialet og tyngdekraft som kan påvirke formen til ekstrudatet. Størrelsen på ekstrudatet kan også variere som følge av avkjøling og tørking av materialet. Hvis filamentet blir ekstrudert som en gel kan krympe under herdeprosessen og bli porøst. Hvis ekstrudatet blir ekstrudert i flytende form kan det også krympe når det stivner. Avkjølingen av ekstrudatet vil trolig også være ikke-lineær, og hvis denne ikke-lineære avkjølingen er signifikant vil komponenten kunne bli deformert under avkjølingsprosessen.

Denne effekten kan minimeres om temperaturforskjellen fra reservoaret og omgivelsene er minimal, og at avkjølingsprosessen er kontrollert og konstruksjonen ikke blir bråkjølt. MEX AM systemer vil som oftest ekstrudere fra et større reservoar til en mindre dyse ved hjelp av et konisk grensesnitt. Det smeltete materialet forventes å følge veggene gjennom reservoaret og dysen med null hastighet i disse områdene. Materialet blir utsatt for en skjær deformasjon under utstrømmingen. Skjærforholdet og skjærstresset er definert i formlene. [58]

$$\dot{\gamma} = -\frac{dv}{dr} \quad [4-14]$$

Skjærstress

$$\tau = \left(\frac{\dot{\gamma}}{\phi}\right)^{\frac{1}{m}} \quad [4-15]$$

I skjærforholdet vil $\dot{\gamma}$ være forholdet mellom den marginale endringen i hastigheten på filamentet og radiusen til ekstrudatet. I uttrykket for skjærstresset vil m beskrive strømningskomponenten og ϕ vil beskrive fluiditet. Kateketikken til strømmingene av materiale og avviket fra Newtonsk oppførsel. [58]

4.7.5 Posisjonskontroll

Som de fleste formene for AM-produksjon bruker MEX en plattform for å beskrive den vertikale aksene, og plattformen gjør det mulig å bygge en konstruksjon lagvis. Dysen som legger ekstrudatet på plattformen, er festet til et system som beveger seg i det vertikale planet. Bevegelsene til dette systemet må være samkjørt med ekstruderingsraten slik ekstrudatet blir lagt jevnt og konsist på byggeplattformen. [58]

Siden reservoaret og dysen utgjør en masse er det viktig at ekstruderingshode ikke har for høy hastighet når det skal bytte retning. Dette gjør at ekstruderingshode må de-akselereres printeren endrer retning, og deretter akselereres igjen. Den korresponderende matingen av filament må matche denne endringen i fart for at det ikke skal ekstruderes for mye eller for lite ekstrudat. [58]

Ekstruderingshodet blir flyttet over et 2D plan blir det ofte brukt 2 lineære drivmekanismer som er montert ortogonalt på hverandre. Disse vil representere X og Y-aksen til planet, og må være kraftige nok til å bevege ekstruderingshode i tilstrekkelig fart. Teknologien som brukes til denne delen av maskinen kan variere fra servomotorer til beltedrift avhengig av prisklassen til maskinen. [58]

For å holde tidsbruken i produksjonen nede er det vanlig å legge filament rundt omrisset til figuren først. Dette blir gjort med en lavere hastighet på ekstruderingshode for å få en konstant strømning av ekstrudat, og sørge for at geometrien til CAD modellen blir ivaretatt. De indre lagene i figuren kan bygges raskere siden dette ikke vil påvirke endeproduktets geometri i like stor grad. [58]

4.7.6 Bindingsprosess

For varmebaserte systemer kreves det en tilstrekkelig mengde varmeenergi for å binde sammen nye lag. Andre systemer vil ha egne måter å bygge opp strukturen på, og for gel baserte systemer kan dette være en form for løse-/fuktemiddel. Begge disse metodene for å binde materiale sammen kan bli betraktet som energi levert til materialet av ekstruderingshode. [58]

Mengden energi som tilføres materialet er kritisk med tanke på byggeprosessen, og hvis det ikke tilføres tilstrekkelig energi vil det bli dårlige forbindelser mellom lagene i figuren. Lagene i figuren kan fremdeles feste seg til hverandre, men det vil bli en distinkt grense mellom det gamle og nye ekstrudatet. Dette vil føre til at materialet enklere kan få sprekkdannelser og delamineringer. Videre kan også dette føre til at figuren separerer seg i lagene. [58]

For mye energi kan føre til at ekstrudatet i lagene under flyter ut, og dette kan føre til tap i presisjonen til produksjonsmetoden. Dette kan resultere i geometriske feil i endeproduktet, og dårlig definerte deler. Videre kan for mye energi også skade byggematerialet om dette er laget av et polymer. [58]

Etter at materialet har blitt ekstrudert må det stivne og binde seg til resten av figuren. Det vil være mulig å beskrive prosessen, og lage en modell som beskriver sammenbindingen mellom lagene. Denne termiske prosessen er definert som arbeider i ekstrudatet. Denne likningen blir presentert som en kontinuerlig, åpen linje i x-retning. Denne er avhengig av materialeegenskaper, og er gitt i likningen under. [58]

$$\rho \frac{\partial q}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - S_c - S_1 \quad [4-16]$$

I denne likningen vil V være materialtetthet, q vil være den spesifikke entalpi koeffisienten, k er den effektive termiske konduktiviteten, T vil være den gjennomsnittlige temperaturen i ekstrudatets tverrsnitt og W vil være et oppsamlingsbegrep for å beskrive konvektivtap. W kan også beskrives som et matematisk uttrykk, og dette er gjort i formelen under. [58]

$$S_c = \frac{h}{h_{eff}} (T - T_\infty) \quad [4-17]$$

I dette uttrykket beskriver h varmeoverføringskoeffisient for konvektiv kjøling, h_{eff} er en geometrisk uttrykk som beskriver forholdet mellom ekstrudat volumet til overflaten for den konvektive kjølingen, og vil være avhengig av diameteren på dysen. T_∞ vil beskrive steady-state temperaturen for det omgivende miljøet. h_{eff} er et synkebegrep som beskriver den termiske interaksjonen mellom de ekstruderte banene, og er beskrevet i uttrykket under. [58]

$$S_1 = \left(\frac{k}{width^2} \right) (T - T_{neigh}) \quad [4-18]$$

I dette uttrykket vil «width» være bredden på de ekstruderte banene, og T_{neigh} vil beskrive temperaturen på en aktuell nabo-bane. Dette oppsamlingsuttrykket vil øke avkjølingstiden hvis nytt materiale legges for nærme gammelt materiale. Videre vil dysen kunne nå en kritisk

temperatur T_c , og hvis denne temperaturen nåes vil bindingsprosess starte. Hvis temperaturen er under denne temperaturen, vil ikke materialet binde seg riktig. Ut fra dette kan bindingspotensialet til materialet beskrives, og dette er gjort i uttrykket under. [58]

$$\varphi = \int_0^\tau (T - T_c) d\tau \quad [4-19]$$

4.7.7 Generering av støttestruktur

Nesten alle typer AM produksjoner trenger støttestruktur for frittstående deler, eller deler med overheng, Dette er for at alle egenskapene til produktet skal bli ivaretatt gjennom produksjonsprosessen. I MEX produksjon trengs det ekstra støttestruktur i produksjonsprosessen, og støttestruktur deles normalt sett inn i to grupper. Disse er som følger. [58, 59]

- Støttestruktur av samme materiale
- Støttestruktur av annet materiale

I MEX maskiner vil typen støttestruktur variere med prisklasse. De billigste maskinene vil være bygget enklest mulig, og som oftest med en type filament. I tilfellene der maskinene kun bruker et filament vil støttestrukturen bli bygget i samme materiale som delen. Dette kan kreve at komponenten og støttestrukturen må bygges på en slik måte at de enkelt kan separeres etter produksjon. En metode å skille støttestrukturen fra komponenten er å endre på temperaturen i dysen, og dette kan resultere i sprekkdannelse rundt i overflaten av støttematerialet. En annen måte å oppnå denne effekten på er å legge ekstrudatet i støttematerialet med større avstander fra hverandre. Ved å separere ekstrudatet vil dette kunne påvirke energioverføringen mellom de ekstruderte banene, og dette kan føre til sprekkdanningsfenomenet. [58, 59]

Den andre metoden å lage støttestruktur på er et alternativt materiale. Dette krever at maskinen kan bruke to forskjellige filamenter, har to forskjellige dyser og parametere som definerer byggeprosessen til støttestrukturen. Denne metoden gjelder ofte maskiner i det høyere prissjiktet. Fordelen med to forskjellige materialer er at materialegenskaper og farge kan utnyttes, og dette kan utnyttes for enklere separasjon av støttestruktur og modell. [58, 59]

Ved å produsere støttestrukturen i en annen farge vil det være tydelig hva som inngår i selve komponenten. Videre kan det benyttes et mer porøst materiale slik at det er lettere å knekke av støttestrukturen. Det er også verdt å nevne at et sekundært materiale kan brukes til å synliggjøre forskjellige ting i modellen slik som festepunkter. I springerboken brukes det et eksempel der et sekundært materiale blir brukt til å synliggjøre en kreftsvulst på en knokkel, og dette er et godt eksempel på en designtilpasning med flere filamenter. [58, 59]

4.7.8 Plotting og kontroll av veivalg

For at MEX maskinene skal kunne bygge en figur trenger den en CAD-fil lagret som en STL-fil. Når MEX maskinene skal legge ut filamentet basert på filen blir det brukt en programvare som kontrollerer strømmingen av filamentet. Denne typen programvare er spesielt viktig i MEX prosessen siden det ekstruderes materiale på områder som ikke inneholder materiale i utgangspunktet. Det kan ikke være eksisterende materiale i området som ekstruderingshodet går over, og det nye materialet skal ikke kompromittere gammelt materiale. Videre vil materiale som ikke legges tett nok på et tidligere lag binde seg skikkelig til resten av figuren. I laserbasert AM-produksjon vil ikke dette være en like reel problemstilling siden det normalt sett vil være en grad av overlapp, og det er ingen problemer med at ekstruderingshode krasjer i ekstrudat eller overfylling av materiale. [58]

For å opprettholde presisjon blir omrisset til figuren plottet med en lav hastighet på ekstruderings hode. Veien ekstruderings hode skal gå over planet blir planlagt, og start og slutt punkt blir fastsatt. Siden dysen på ekstruderings hode har en fastsatt diameter vil startpunktet være definert i midten av dysen. Videre vil det siste punktet være satt til en diameter til dysen unna startpunktet. Grunnen til det er at det er bedre med overlapp, enn mangel på materiale. Videre er det også vanskelig å kontrollere flyten av materialet så presist at start og slutt punkt tangerer hverandre. Når start og slutt punkt blir stacket oppå hverandre vil dette fungere som en søm, og det vil være en fordel om denne sømmen ikke er synlig på figuren. På grunn av dette vil disse punktene normalt sett være plassert på forskjellige steder i figuren. Alternativt kan denne sømmen fjernes i etterbehandlingen. [58]

Programvaren som bestemmer hvordan materialet skal legges på innsiden av figuren må kalkulere en bane slik at det er offset fra omrisset til banene. Programvaren må etablere et startpunkt og et slutt punkt og kalkulere en bane for ekstruderings hode basert på allerede eksisterende materiale. Fyllmønsteret vil variere med hva som produseres, og mønster og tykkelse kan som regel bestemmes i slicing-programmet. [58]

Fyllmønsteret trenger ikke å være en kontinuerlig linje, men kan bli segmentert etter behov. Videre er det viktig og tenkte på hvordan materiale legges i høyden, og at det gjerne ikke bør legges parallelt. Hvis Materialet legges som et vevet mønster vil dette kunne forbedre materialegenskapene signifikant. Dette er også en fordel om det brukes filament med karboninnhold siden alle fiberne ikke vil ligge i samme retning. [58]

Videre vil hvert enkelt vevemønster innad i et lag skape en diskontinuitet som kan føre til svakheter i endeproduktet. Videre bør bruken av forskjellige mønstre i fyllet minimeres innad

i et lag. Det er heller ingen garanti for at et mønster kan fylle et helt lag, og det er usannsynlig at en programvare kan produsere det beste fil-mønsteret. [58]

4.8 Maskineri til printeprosessen

For å produsere prøvestaver vil det bli benyttet en FDM maskin. Denne maskinen vil være kompatibel med det produserte filamentet, og vil være en maskin som brukes i produksjon av deler Additech AS leverer til endebbrukere. Grunne til dette er at produksjonsprosessen skal minne mest mulig om en reel produksjon situasjon, og materialkvaliteten skal representere hva man reelt kan forvente av materialet.

4.8.1 Prusa MK3 mini

Prusa MK3 mini printeren er en enkel og robust 3D printer som egner seg godt til hobbybruk, og er en printer som er kjent for forholdsvis høy presisjon. Additech har også nylig anskaffet 3 av disse printerne.



Figur 13: Prusa MK3 Mini

Denne printeren har følgende spesifikasjoner og produksjonsegenskaper.

Tabell 12: Oversikt over egenskaper og dimensjoner for Prusa MK3 mini

Egenskaper	Dimensjoner
Byggevolum	18x18x18cm
Lagtykkelse	0.05-0.35mm
Dyse	0.4mm
Filamentdiameter	1.75mm
Produksjonsmaterialer	PLA, PETG, ASA, ABS, Flex ect.

Tabell 12 fortsetter

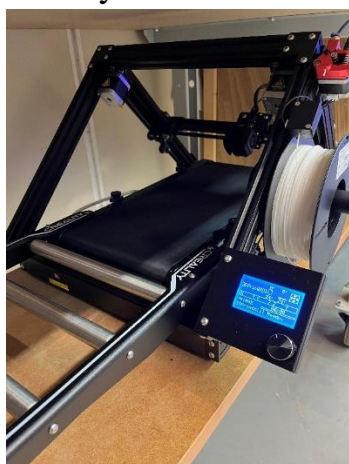
Egenskaper	Dimensjoner
Max fart på ekstruderingshode	200+ mm/s
Max temperatur på dysen	280C
Max temperatur på byggeplate	100C
Ekstruder	Bowden system med 3:1 utveksling
Overflate til byggeplattform	Avtakbare magnetiske byggeplater
Printerdimensjoner	7kg, 500x550x400mm

Ut fra spesifikasjonene vil det bli konstruert prøver som tester produksjonskvalitet, og produksjonsparametere. Disse testene vil bli laget slik at det er mulig å evaluere eventuelle egenskaper til det resirkulerte filamentet. For å få et bilde på den systematiske feilen i presisjon har det også blitt samlet inn informasjon fra en presisjonstest, og resultatene er illustrert i tabellen under.

Mål	X-akse	Feilmargin x-akse	Y-akse	Feilmargin Y-akse
25mm	24.73mm	0.27mm	24.91mm	0.09mm
20mm	19.79mm	0.21mm	19.90mm	0,10mm
15mm	14.83mm	0.17mm	14.97mm	0.03mm
10mm	9.98mm	0.02mm	10.2mm	0.02mm
5mm	5mm	0mm	5mm	0mm

Dette viser at det er en systematisk feilmargin i Prusa MK3 mini printeren. Dette vil gjøre testresultatene mindre presise, og tilføre prosjektet et usikkerhetsmoment. Dette vil kunne påvirke resultatene for testfasen til prosjektet. Denne maskinen vil uansett bli brukt til produksjon av tester. [60, 61, 62]

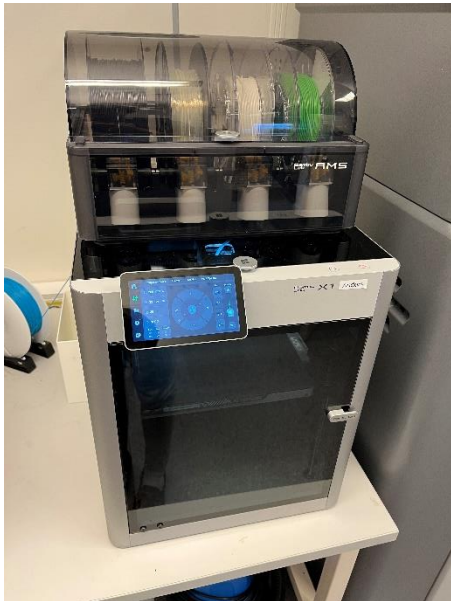
4.8.2 Creality CR-30



Figur 14: Creality CR-30 3D printer

Creality CR-30 er en printer som gjør det mulig å produsere lange objekter. Dette gjør den ideell for å kunne produsere store modeller. Dette vil gjøre at det enkelt kan produseres mye materiale som skal brukes til å teste resirkuleringssystemet. Siden alt av materiale vil være produsert med samme type PLA vil dette gjøre maskinen ideel til å produsere nok print og avfall til å kunne spole opp en ny rull med rPLA.

4.8.3 Bambu lab x1 carbon



Figur 15: Bambu lab x1 3D printer

Bambu lab x1 carbon maskinen vil bli brukt til å gjøre et «proof of concept» på bruk av rPLA. Grunnen til at det blir brukt forskjellig maskineri i «proof of concept» og produksjoner av tester kommer av opptatt kapasitet til produksjon og anskaffelse av nye maskiner.

5 Intervjuer og ekspertinnspill

For å samle eksterne innspill på anskaffelsesprosessen til maskiner, materialer, materialeegenskaper, økonomi, marked, brukervennlighet av systemet og det strategiske aspektet til prosjektet vil det bli konsultert med personer som er ansvarlig for disse prosessene i bedriften. Dette vil være med på å definere et antatt preferansesett for prosjektet, og hva de forskjellige partene som deltar i prosjektet mener er viktig for at resirkuleringssystemet skal bidra til kjernevirksomheten til Additech.

5.1 Målsetning for intervjuer

Hovedmålet for intervjuene og ekspertinnspillene er å få en forventningsavklaring for hva maskineriet og resirkuleringssystemet skal svare på internt i bedriften. Dette vil være med på å iterere kjøpsprosessen, og definere et mandat for innkjøp av maskineri.

Preferansesettet er ment å inneholde antatte faktorer bedriften vil verdsette ved innkjøp, og vil veilede vurderingen av funksjonene til aktuelle systemer. Dette vil gjøre det mulig å vurdere funksjonene til teknologien opp mot kravene fra bransjen. Kort fortalt er preferansesett en matematisk fremstilling av hva bransjen og Additech AS vektlegger. Målet med intervjuprosessen er å avklare følgende punkter.

- **Prising** Hvor mye er Additech villig til å investere?
- **Operasjonelle kostander** Hvordan vektlegges de operasjonelle kostandene?
- **Alternativkostnad** Hva vil alternativkostnaden til Additech være?
- **Marked** Hvilke krav stiller markedet til resirkulert materiale?
- **Bærekraft** Vil resirkuleringsprosessen være bærekraftig?
- **Kvalitet** Hvilke indikatorer skal brukes på kvalitet?
- **Brukerkrav** Hvilke krav stiller brukerne til resirkuleringssystemet?

5.2 Valg av intervjupersoner og ekspertområder

For å få et relevant bilde på hvordan behovet for Additech er for et resirkuleringskrav, og hvilke fokuspunkter som burde vurderes i prosess.

Tabell 13: Innspill og ansvarsområde

Navn	Bakgrunn	Ansvarsområde
Anders Helland	Administrerende direktør	Drift
Kristoffer Eriksen	Kommersiell direktør	Salg og økonomiske avveininger
Malin Sagstad	AM operatør	Bruk av resirkuleringssystem

5.3 Resultater og resultattolkning

Kommunikasjonsformen valgt for intervjuene og konsulteringsprosessen vil være basert på intervjuer. Intervjueformen vil variere mellom forhåndsbestemte spørsmål og diskusjon avhengig av hva som er hensiktsmessig. Resultatene fra intervjuet vil veies opp mot teori, og etterprøves med Anders Helland for å dobbeltsjekke at forventningene til resirkuleringssystemet stemmer overens med Additechs behov.

5.4 Intervjuer av personer involvert i prosessen

For å skape kanaler for tilbakemelding og veiledning av prosjekter har det blitt gjennomført intervjuer med relevante beslutningstakere og brukere av systemet. Denne informasjonen vil pivotere og ittere prosjektet under gjennomføringsfasen.

5.4.1 Intervju Anders Helland: Administrerende direktør

Diskusjonen med Anders Helland har vært preget av spørsmål og svar over hva som kan gjøres, og hva han godkjenner. De viktigste punktene for prosessen er oppsummert under. [63]

- Videre planer for maskineriet
- Ikke kjøpe maskineri fra Kina
- Merke er irrelevant
- Ønsker en maskin som best mulig kan gjøre jobben for å analysere resirkulering
- Ønsker en maskin som kan brukes videre i selskapet
-

5.4.2 Intervju Kristoffer Eriksen: Kommersiell direktør

Diskusjonen med Kristoffer Eriksen besto av en kort diskusjon, og en oppfølgende mail for å få avklart tanker rundt maskineri, avveininger av produksjon og eventuelle utfordringer fra et driftsperspektiv. [64]

Hvorfor vil vi ønske å produsere filament fra granulat, eller resirkulert materiale?

« Ved å produsere vårt eget filament som for eksempel PEEK ved hjelp av granulat, skrot og spon reduserer vi kostnadene til forskjell fra å kjøpe ferdig filament på spoler, samtidig som vi kan redusere miljøpåvirkningen ved å unngå unødvendig transport, bakover logistikk og avfallshåndtering. Vi vil redusere behovet for emballasjen knyttet til ferdige spoler, redusere transportkostnadene og mulig forbedre leverings hastigheten på enkelte materialekombinasjoner med høy ledetid. «

Ved videre diskusjon med Kristoffer har det også kommet til enighet om at det bør analyseres om produksjon av filament fra pellets faktisk er gunstig basert på kostnaden for personell og maskin. Videre har det også blitt enighet om at prisen på utstyr må forsvare kvaliteten, både hos maskineri og endeprodukt. Levetiden til maskineriet vil også være en vesentlig beslutningsfaktor ved innkjøp.

5.4.3 Intervju med Malin Sagstad: maskinoperatør

Malin Sagstad er maskinoperatør hos Additech, og vil være primærbrukeren av resirkuleringssystemet. For å gjøre bruken av resirkuleringssystemet enklest mulig vil Malin sine innspill vil bli brukt til å iterere systemet hvis eventuelle utfordringer skulle oppstå. Denne feedbackloopen vil fungere gjennom hele prosjektet, og vil være en kontinuerlig optimaliseringssyklus. [65]

Hva skal til for at du skal kunne bruke et resirkuleringssystem?

Til dette svarer Malin at systemet bør være enkelt å forstå. Videre bør systemet være oversiktlig, intuitivt, og bruken av systemet bør være sporbar. Videre mener Malin at det er gunstig om systemet ikke står bak andre ting slik at det blir brukt fremfor at andre kaster ting i søppelbøtten som står inne på verkstedet.

Hva legger du i sporbarhet?

Systemet bør være sporbart slik at du vet hvor mange resirkuleringssykluser polymere har vært igjennom. Videre hadde det vært gunstig om systemet er godt merket slik at det ikke er spillerom for feil. Her kan det være listet opp material og antall varmesykluser materialet har vært igjennom.

Har du noen tanker rundt plassering av komponentene i resirkuleringssystemet?

Malin svarer at alt sikkert kan stå på samme sted, men mener det er gunstig om utstyr som produserer mye bråk ikke står i nærheten av kontorlandskapet. Utover dette hadde ikke Malin noen meninger med unntak av tilgjengeligheten.

Videre har også Malin blitt informert om at dette skal være en tilbakemeldingskanal slik at hennes meninger er med på å utvikle et fungerende resirkuleringssystem.

5.5 Utvikling av preferansesett

Etter samtalen med Kristoffer Eriksen kom det frem at kostnader, videre bruk av maskineriet og bærekrafts aspektet skal bli vektlagt under innkjøpsprosessen. Videre er det et langsiktig strategisk ønske om å kunne produsere materiale billigere enn markedspris, med kortere leveringstid, mindre fastlåst kapital i lager og tilsvarende materialkvaliteter. Dette gir følgende parametere til preferansesettet:

$$\begin{aligned}X'_{Pris} &\succcurlyeq X_{Pris} \\X'_{Leveringstid} &\succcurlyeq X_{Leveringstid} \\X'_{Fastlåst\ kapital} &\succcurlyeq X_{Fastlåst\ kapital} \\X_{Materialkvalitet} &\succcurlyeq X'_{Materialkvalitet}\end{aligned}$$

Etter intervjuet med Malin Sagstad som vil bli endebrukeren av resirkuleringssystemet kom det frem flere viktige synspunkter som bør vektlegges for å lage et funksjonelt, intuitivt og brukervennlig system. Dette vil være faktorer systemet itereres etter, og dette vil være en kontinuerlig optimaliseringssyklus jamføre PDCA-systemet definert i ISO 9001:2015. De aggregerte preferansene Malin kom med etter intervjuet er som følger:

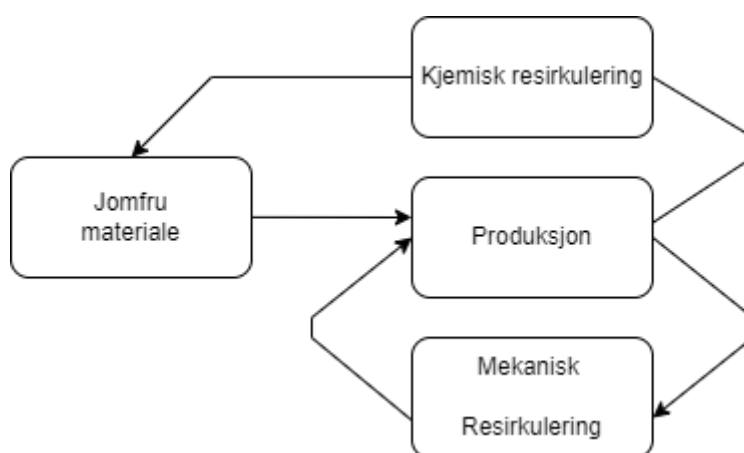
$$\begin{aligned}X_{Tilgjengelighet} &\succcurlyeq X'_{Tilgjengelighet} \\X_{Intuitivt\ design} &\succcurlyeq X'_{Intuitivt\ design} \\X_{Sporbarhet} &\succcurlyeq X'_{Sporbarhet}\end{aligned}$$

For selve utviklingsprosessen vil disse faktorene være veiledende slik at systemet som blir utviklet holder best mulig kvalitet, og sjansen for feil minimeres. I den komparative statikken vil disse preferansene bli aggregert til «Brukervennlighet».

6 Valg av resirkuleringsystem

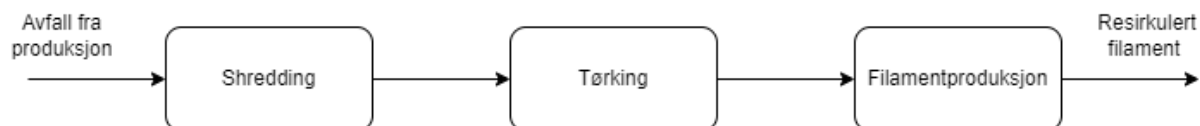
For å kunne holde oversikt over hvor mange ganger polymer har blitt resirkulert, og hvilke typer polymer som går inn i resirkuleringsprosessen må disse skilles fra hverandre slik at det ikke blir noen form for krysskontaminasjon. Hvis forskjellige typer polymer og polymer som har gått igjennom forskjellige antall reproduksjonszykluser blir blandet vil dette føre til dårligere materialkvalitet enn hva som vil kunne utvinnes. [67]

Den tiltenkte resirkuleringsprosessen for prosjektet vil bestå av mekanisk resirkulering, med en mulig tredjepart som kan resirkulere restavfall når polymere ikke kan gå igjennom flere mekaniske resirkuleringsprosesser. Den tiltenkte prosessen er illustrert i figuren under.



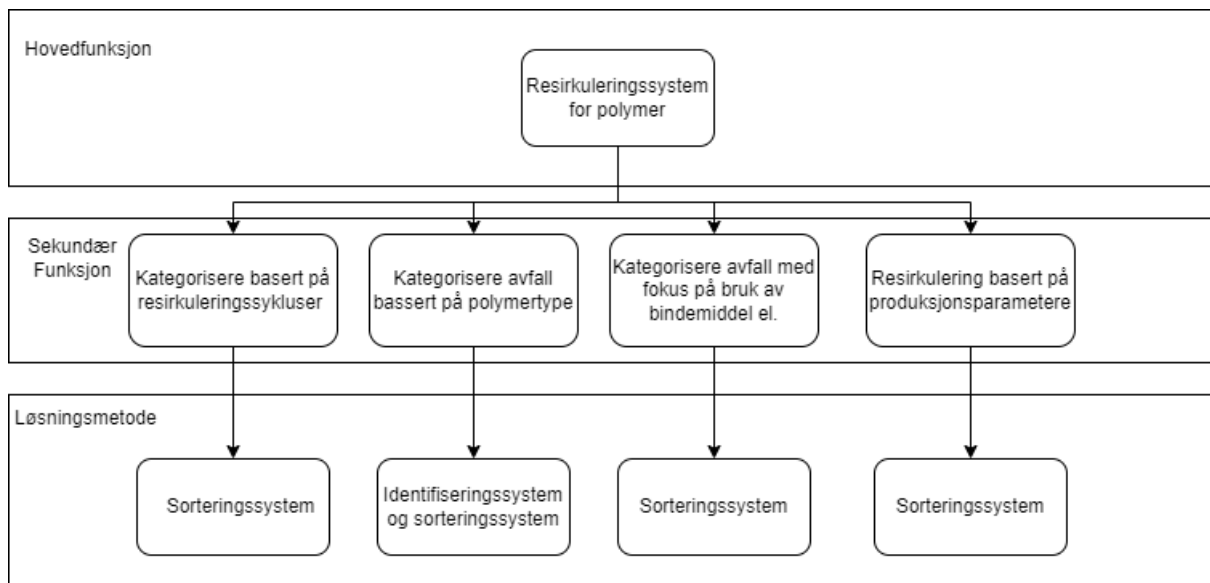
Figur 16: Illustrasjon av tiltenkt resirkuleringsprosess

I denne prosessen er den kjemiske resirkuleringen tenkte å utføres av en ekstern leverandør, men den mekaniske resirkuleringen skal skje hos Additech. Denne prosessen vil bli delt opp i flere steg, og de tiltenkte prosessen er beskrevet under.



Figur 17: Illustrasjon av resirkuleringsprosessen

For å konstruere et resirkuleringsystem som svarer til den tiltenkte prosessen som skal skje internt har det blitt konstruert et funksjonsdiagram for å identifisere egenskapene systemet må ha. Denne analysen har kommet frem til at systemet må kunne kategorisere type polymer, og sortere basert på resirkuleringssykluser, bruk av bindemiddel og produksjonsparametere. Resultatet fra analysen er illustrert i figuren under.



Figur 18: Funksjonsanalyse for resirkuleringssystem

Etter at funksjonene til resirkuleringssystemet er definert vil kravene Malin Sagstad definerte være med på å veilede utviklingsprosessen. For å kunne finne et best mulig alternativ vil det bli lagt vekt på å definere flere løsningsforslag, og funksjonskravene for prototypen til resirkuleringssystemet vil bli redusert til antall varmesykluser og bruk av bindemiddel. Dette har blitt gjort for å svare på prosjektmandatet, og de resterende funksjonene vil bli vektlagt ved videre utvikling av resirkuleringssystemet. Denne forenklingen har også blitt gjort med tanke på at det PLA som skal resirkuleres i prosjektet, og flere av funksjonene til systemet ikke vil være relevant for prosjektet. [68]

For å utvikle modulene i prosjektet har preferansesettet fra kapittel 5 blitt brukt for å evaluere løsningsforslagene. Siden det skal utvikles et system rundt arbeidsoppgavene til Malin Sagstad vil disse være sentrale utviklingstrekk. Videre vil det også være rammebetingelser fra et administrativt ståsted som vil begrense systemet, og disse har også blitt inkludert i evalueringsprosessen.

6.1 System for resirkulering

For å holde kontroll på resirkuleringen og antall resirkuleringsprosesser har det blitt dedikert 5 kasser. Siden det er en enkelt type PLA som brukes i forsøket vil alt annet bli sett på som likt, og det er antall resirkuleringsprosesser som vil skille materialene fra hverandre. Resirkuleringssystemet er illustrert på figuren under.



Figur 19: Resirkuleringssystem for resirkulering av PLA

Etter hvert som antall materialer som blir resirkulert økes vil dette systemet ekspanderes. Resirkuleringssystemet vil da kunne bli en hylleløsning der hvert nivå i hyllen representerer en type polymer, og antall resirkuleringssykluser blir kategorisert innad i hver hylle.

7 Valg av maskineri for prosess

I denne delen av rapporten vil det bli utredet en seleksjonsmodell som skal bidra til valg av maskineri til resirkuleringssystemet.

7.1 Tidlig screening av løsninger og aktører i markedet

Resirkulering av filament og plast er noe som har blitt mer og mer relevant som følge av en økt interesse for bærekraft blant større aktører i norsk industri. For å skape et bilde av hvilke løsninger som eksisterer i markedet vil noen aktører og alternativer bli produsert. Disse aktørene er som følger;


7.1.1 3Devo

3Devo er en aktør som leverer maskiner til alle deler av resirkuleringsprosessen. Her er resirkuleringsprosessen delt opp i tre deler, og disse er som følger:[69]


Tabell 14: Oversiktsbilde 3Devo

Maskin	Egenskaper
<p>GP20 Hybrid</p> 	<p>Funksjon: Shredder Pris: Fra € 13 000</p>
<p>Airid polymer dryer</p> 	<p>Funksjon: Plastic dryer Pris: Fra € 3575</p>

Tabell 14 fortsetter

Maskin	Egenskaper
<p data-bbox="461 300 655 333">Composer 350</p>  <p>The image shows a white filament extruder with a black front panel and a clear side window. It has a cylindrical extruder head on top and a large spool holder on the front.</p>	<p data-bbox="959 472 1366 506">Funksjon: Filament produksjon</p> <p data-bbox="965 510 1359 584">Materialer: PLA/ ABS / PET / PETG / TPU / TPE</p> <p data-bbox="1066 595 1259 629">Varmesoner: 4</p> <p data-bbox="1015 636 1310 669">Max temperatur: 350C</p>
<p data-bbox="461 851 655 884">Composer 450</p>  <p>The image shows a white filament extruder, similar in design to the Composer 350, but with a slightly larger extruder head and a different spool holder design.</p>	<p data-bbox="959 981 1366 1014">Funksjon: Filament produksjon</p> <p data-bbox="943 1019 1382 1137">Materialer: PLA/ ABS / PET / PETG / TPU / TPE / PA / PEEK / PEKK / PAEK / PPSU / PEI</p> <p data-bbox="1066 1149 1259 1182">Varmesoner: 4</p> <p data-bbox="1015 1189 1310 1223">Max temperatur: 450C</p>
<p data-bbox="469 1400 647 1433">Precision 350</p>  <p>The image shows a black filament extruder with a clear side window and a large spool holder on the front. It has a cylindrical extruder head on top.</p>	<p data-bbox="959 1556 1366 1590">Funksjon: Filament produksjon</p> <p data-bbox="965 1594 1359 1668">Materialer: PLA/ ABS / PET / PETG / TPU / TPE</p> <p data-bbox="1066 1680 1259 1713">Varmesoner: 4</p> <p data-bbox="1015 1720 1310 1753">Max temperatur: 350C</p>



Tabell 14 fortsetter

Maskin	Egenskaper
<p>Precision 450</p> 	<p>Funksjon: Filament produksjon Materialer: PLA/ ABS / PET / PETG / TPU / TPE / PA / PEEK / PEKK / PAEK / PPSU / PEI Varmesoner: 4 Max temperatur: 450C</p>

7.1.2 ReDeTec

ReDeTec produserer en integrert løsning med en shredder, en skrue med varmeelementer og en ekstruderingsdyse. ReDeTec leverer to alternative løsninger, en med integrert shredder og en uten. Prisen på løsningene varierer med \$2,000.00, og med unntak av shredderen er løsningene homogene. [70]


Tabell 15: Oversiktsbilde ReDeTec

Maskin	Egenskaper
<p>ProtoCycler+</p> 	<p>Funksjon: Filament produksjon Materiale: PLA / ABS / PETG / HIPS / Nylon 12 ol. Varmesoner: 1 Max temperatur: 250C Presisjon: 0.01m Annet: integrert shredder Pris: \$ 6.999.00</p>
<p>ProtoCycler+ (Grinderless)</p> 	<p>Funksjon: Filament produksjon Materiale: PLA / ABS / PETG / HIPS / Nylon 12 ol. Varmesoner: 1 Max temperatur: 250C Presisjon: 0.01m Pris: \$ 4.999.00</p>


7.1.3 Filafab

FilFab er en britisk produsent som hovedsakelig produserer ekstruderingsstasjoner. De har delt opp ekstruderingsmaskinene sine slik at du kan bestille en enkelt maskin eller ekstruderer med resterende deler som trengs for å gjennomføre ekstruderingsprosessen. For enkelhetsskyld har pakkeløsningen med alle maskiner og deler som trengs blitt brukt som sammenligningsgrunnlag for pris. [71]

Tabell 16: Oversiktsbilde av Filafab

Maskin	Funksjoner
<p>PRO 1200 EX</p> 	<p>Funksjon: Filament produksjon Materiale: PLA / ABS / LDPE / HDPE / PP / EVA / HIPS / WAX / TPU / TPE / PA6 / PETG / ULTEM / PEEK Varmesoner: ikke spesifisert Max temperatur: ikke spesifisert Presisjon: ikke spesifisert Pris: £ 7.755</p>
<p>PRO 1000 EX</p> 	<p>Funksjon: Filament produksjon Materiale: PLA / ABS / LDPE / HDPE / PP / EVA / HIPS / WAX / TPU / TPE / PA6 / PETG / ULTEM / PEEK Varmesoner: 4 Max temperatur: Ikke spesifisert Presisjon: ikke spesifisert Pris: £ 6,265</p>
<p>Pro 350 EX</p> 	<p>Funksjon: Filament produksjon Materiale: PLA / ABS / LDPE / HDPE / EVA / HIPS / WAX / TPU / TPE Varmesoner: ikke spesifisert Max temperatur: ikke spesifisert Presisjon: ikke spesifisert Pris: £ 3,485</p>


Tabell 16 fortsetter

Maskin	Funksjoner
<p>Pro 200 EX</p> 	<p>Funksjon: Filament produksjon Materiale: PLA / ABS / LDPE / HDPE / EVA / HIPS / WAX / TPU / TPE Varmesoner: ikke spesifisert Max temperatur: ikke spesifisert Presisjon: ikke spesifisert Pris: £ 3,095</p>

7.1.4 ACC machine

ACC machine er en produsent som leverer maskineri til produksjon av 3D printings filament. Disse maskinene er store, men omfatter hele resirkuleringsprosessen. Maskinene har muligheten til å produsere de fleste filamenter, på et industrielt nivå. «ACC machine» maskinene har mulighet til å levere opp til 25 kg materiale per time, med en presisjon på 0.01mm. ACC machine er en aktør som leverer maskiner til produsenter av filament. Siden dette er en profesjonell aktør har kun den mest relevante modellen for prosjektet blitt tatt med i vurderingen. [72]

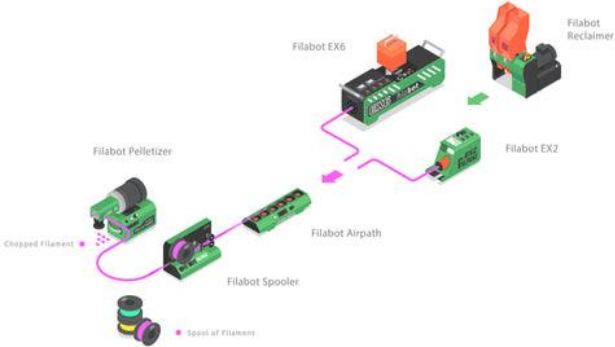
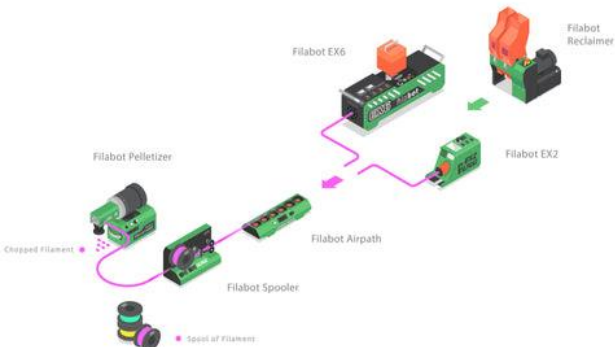
Tabell 17: Oversiktsbilde av ACC machine

Modell	Egenskaper
<p>3D printer filament ekstruder</p> 	<p>Materialer: ABS / PLA / HIPS / PETG / NYLON / PC / PEEK / PEI / carbon fiber Max temperatur: 500C Presisjon: 0.01mm Annet: Helautomatisert system Pris: \$ 30,000</p>

7.1.5 Filabot

Filabot leverer maskiner til alle deler av resirkuleringsprosessen, men leverer også to fullstendige resirkuleringssystemer. De to komplette systemene er oppsummert under; [73]


Tabell 18: Oversiktsbilde av Filabot

Maskin	Egenskaper
<p data-bbox="309 309 727 338">Full Recycling setup (Filabot EX6)</p> 	<p data-bbox="1011 472 1235 584">Varmesoner: 4 Max temperatur: Pris: \$ 22,692.00</p>
<p data-bbox="309 761 727 790">Full Recycling setup (Filabot EX2)</p> 	<p data-bbox="1000 943 1246 1055">Varmesoner: 4 Presisjon: 0.05mm Pris: \$14,399.00</p>


7.1.6 Noztek

Noztek er en leverandør som har to forskjellige, fullstendige resirkuleringssystemer. [74]

Tabell 19: Oversiktsbilde av Noztek

Maskin	Egenskaper
<p data-bbox="448 1503 639 1532">Noztek fusionX</p> 	<p data-bbox="962 1671 1337 1738">Pris: £23,400.00 Annet: Dette er kun en ekstruder</p>

Tabell 19 fortsetter

Maskin	Egenskaper
<p>Full filament ekstrusion system</p> 	<p>Pris: £15,795.00 Komplett system</p>

7.2 Tidlig seleksjon av maskineri

For å velge ut det mest gunstige maskineriet vil det først bli gjort en tidlig screening av løsningene i markedet for å eliminere de løsningene som ikke vil være kompatible med prosjektet. For å gjøre dette har det blitt utarbeidet et sett med krav som løsningene skal sammenlignes på. Alle disse kravene skal vektet på en skala fra 1-6, og målet med denne analysen er å begrense videre arbeid ned til to aktører. Kravene for analysen er gitt under;

K1: Brukergrensesnitt	Hvor enkelt er det å bruke løsningen?
K2: Funksjonalitet	Hvor funksjonelt er utstyret?
K3: Kvalitet	Hvor god kvalitet er det på maskineriet?
K4: Fleksibilitet	Hvor fleksibel er løsningene?
K5: Bærekraftighet	Hvor bærekraftig er løsningene?
K6: Pris	Hvor mye koster løsningen?
K7: Konsultering	Hvor villig er selskapet til å konsultere
K8: Selskapets troverdighet	Hvor godt inntrykk gjør selskapet?

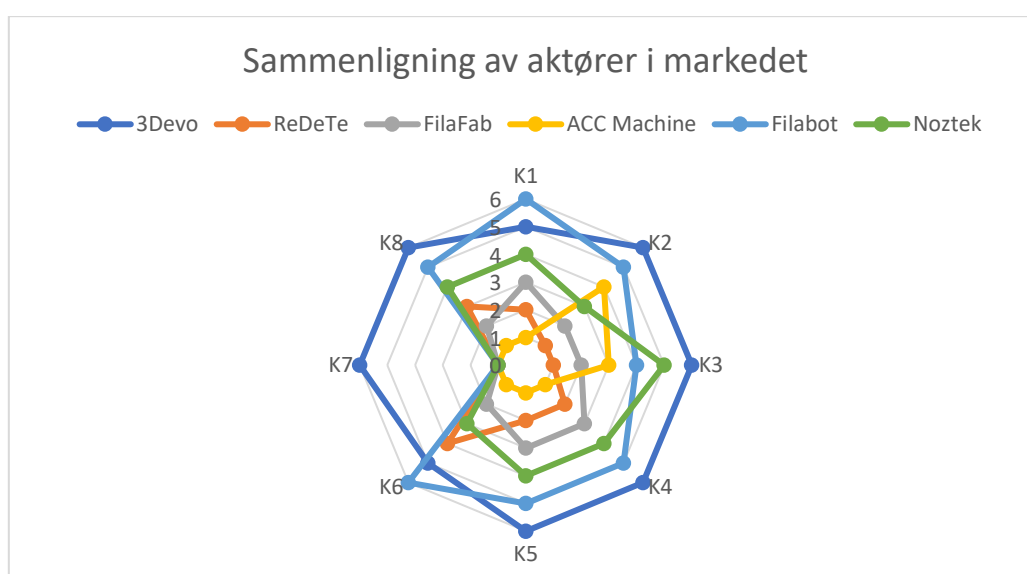
Tabell 20: Tidligseleksjon av resirkuleringsløsning

Aktører	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	Sum
3Devo	5	6	6	6	6	5	6	6	46
ReDeTe	2	1	1	2	2	4	1	3	16
FilaFab	3	2	2	3	3	2	1	2	18

Tabell 20 fortsetter

Aktører	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	Sum
ACC machine	1	4	3	1	1	1	1	1	13
Filabot	6	5	4	5	5	6	1	5	37
Noztek	4	3	5	4	4	3	1	4	28

For å illustrere hvordan de forskjellige aktørene sammenlignes med hverandre har resultatene blitt illustrert i et spyder diagram, som også vil vise hvordan løsningen svarer til de kravene som ble spesifisert for sammenligningsprosessen. Dette er illustrert i figuren under.



Figur 20: Sammenligning av aktører i marked

7.3 Valg av endelig løsning

Etter den tidlige screeningen av løsninger i markedet sitter Additech AS igjen med to alternativer. Disse er 3Devo og Filabot, og for å gjøre valg av endelig løsning vil Pugh's metodikk bli brukt. Analysen vil bygge på punktene fra den originale screeningen, men vil også bli utvidet til å inkludere flere punkter. For å kunne sammenligne de to aktuelle systemene vil de bli sammenlignet med hverandre, og evalueringen vil være binært der den beste løsningen vil bli vektet med 1 og den konkurrerende løsningen vektet med 0. Disse kriteriene er oppsummert under;

- Pris
- Kvalitet
- Skalerbarhet
- Størrelse
- Veiledning
- Funksjonalitet
- Bærekraft

Disse kriteriene vil bli vektet slik at det fremkommer hvor viktige de har vært i beslutningsprosessen.

Tabell 21: Endelig seleksjon av resirkuleringsmaskiner

Elementer		Resirkuleringssystem	
Kriterier	Vekting	3Devo	Filabot
Pris	4	0	1
Kvalitet	5	1	0
Skalerbarhet	3	1	0
Størrelse	2	1	0
Brukervennlighet	4	1	0
Veiledning	4	1	0
Funksjonalitet	4	1	0
Bærekraft	1	1	0
Sum		23	4

Gjennom bruk av Pugh's metodikk har det vist seg at systemet til 3Devo er mest aktuelt å bruke. Dettes systemet har blitt videre forklart i påfølgende delkapitler.

7.4 Utredning rundt produksjon av filament

For å produsere filament fra resirkulerte polymer med 3Devo blir det brukt en feedbackloop på 9 punkter. Disse punktene er listet og utdypet under;

1. Bestemmelse av materiale
2. Preprosessering: Vasking og tørking
3. Forberedning av ekstrudererstest
4. Overgangsmaterialer
5. Starttemperatur
6. Søke etter best mulige parametere
7. Spole opp filament
8. Rensing av maskin
9. Iterere prosessen

Bestemmelse av materiale

Siden resirkuleringssyklusen vil variere fra materiale til materiale vil det første steget i prosessen bestå av å bestemme et materiale. I dette tilfellet er prosjektet begrenset til PLA, og dette vil være det eneste materialet som vil være en del av prosessen.

Preprosessering

Preprosesseringen av materialet består av å shredde opp plastgranulatet til mindre biter slik at det lettere kan behandles gjennom resten av prosessen. I denne delen av prosessen vil det shreddede polymere bli vasket for å fjerne eventuelle forurensninger som vil påvirke materialkvaliteten. Siden en av prosjektmålene er å teste om det er en statistisk signifikant

forskjell på polymer som har blitt utsatt for forurensninger (eks lim) vil dette bli behandlet separat, og markert slik at det ikke vil bli noen forvekslinger av materiale.

Forberedning av ekstruderingsstest

For å kunne ekstrudere materialet til filament vil det først bli ekstrudert HDPE gjennom 3Devo filament makers. Dette blir gjort for å rense innsiden av ekstruderingsmaskinen slik at PLA polymere inneholder minst mulig urenheter.

Overgangsmateriale

For å kunne prosessere avanserte materialer som PEEK og PEKK i etterkant av prosjektet vil det være nødvendig med overgangsmaterialer slik at ekstruderingsmaskinen ikke får fast brent materiale i ekstruderingsmaskinen.

Starttemperatur

Etter at maskinen har blitt rensert og testet med HDPE vil ekstruderingsprosessen av PLA bli påbegynt. Denne prosessen er regulert av en feedback loop som er styrt av en laser som måler diameteren på det ekstruderte filamentet.

Utgangspunktet for temperatursyklusen til ekstrudereren vil være gitt på hjemmesiden til 3Devo, og dette vil fungere som et utgangspunkt for ekstruderingsprosessen. Disse parameterne vil bli videreutviklet for å bli tilpasset produksjonsprosessen best mulig.

Søke etter beste parametere

For å finne de optimale parameterne til produksjonsprosessen vil det bli brukt et utgangspunkt for parameterne basert på hjemmesiden til 3Devo. Det vil også bli konsultert med 3Devo angående produksjonsparametere og optimalisering av prosessen.

Spol opp filament

Ved hjelp av «3Devo filament makers» vil det bli produsert filament til AM-produksjon med rPLA. Dette systemet regulerer bredden på filamentet som blir produsert, og ruller ekstrudatet opp på en spole.

Rensing av maskin

Etter hver resirkuleringsprosess må maskinene renses på grunn av krysskontaminering og slitasje på maskinen. Det vil alltid være plast som stivner i ekstruderingsmaskinen til maskinen som produserer filament, og for at denne platen skal ha en lav smeltetemperatur ekstruderes polymere ut av skruen. Disse polymerene erstattes med HDPE som vil rense ekstruderingsmaskinen for annen plastikk når maskinen opererer mellom 180-280 grader celsius.

Iterere prosessen

Denne prosessen vil bli iterert basert på resultatene fra ekstruderingsprosessen, og resultatene fra eventuelle tester vil være med på å iterere prosessen slik at materialkvaliteten kan optimaliseres.

7.5 Maskineri til resirkuleringsprosessen

Etter seleksjonsprosessen tidligere i kapittelet ble 3Devo valgt som leverandør av alt maskineri som skal brukes i prosessen. Disse maskinene, med relevante parametere er oppsummert i dette delkapittelet.

7.5.1 3Devo GP20 Hybrid

Shredderen som blir brukt i prosjektet er en 3Devo GP20 hybrid. Denne er designet for å være modulær og tilpasningsdyktig. Dette gjør at maskinen kan tilpasses de fleste prosjekter i mange forskjellige industrier. Shredderen er et autonomt system, og shredderen reduserer materialet ned til ønsket størrelse. Dette systemet er bygget for å være enkelt og brukervennlig. [75, 76]



Figur 21: GP20 Shredder

7.5.2 3Devo Airid Polymer Dryer

3Devo Airid Polymer Dryer er den delen av 3Devo systemet som tørker polymer før det skal ekstruderes. Denne delen av prosessen er særs viktig når det kommer til hygroskopiske polymer (polymer som trekker til seg fuktighet). Produktet er designet for å være brukervennlig og effektivt. Maskinen kan operere opp til 160°C, og tilrettelegger for en uniform varmedistribusjon gjennom polymer blandingen og motvirke klumper og smeltekllynger. [75]



Figur 22: Polymer tørker

Dette er den delen av systemet som står for tørkingen av det oppkuttete materiale. I dokumentasjonen til 3Devo har det blitt anbefalt følgende parametere.

Materiale	Temperatur	Tid
PLA	80C	4 timer

7.5.3 3Devo Filament Makers

Dette er maskinen som lager filamentet etter at det granulerte materiale har blitt vasket og tørket. Additech har valgt Composer 450 maskinen, og den skal kunne produsere filament til profesjonelt bruk. Maskinen kan operere på temperaturer opp til 450°C, og er like egnet for materialer som PEEK, PETG og PEEK som til PLA, ABS og TPU. Mikseskruen i vil garantere gode resultater i blandingsforholdet mellom polymere, og eventuelt ander bindemidler eller fargestoffer i blandingen. Maskinen er også designet for å være brukervennlig, med et enkelt brukergrensesnitt. [75]



Anbefalt utgangspunkt for PLA

Parametere	H4	H3	H2	H1	Screw speed	Fan speed
PLA	170°C	185°C	190°C	180°C	4 RPM	50%

Videre har 3Devo et eget læringscenter der de tar opp fallgruver, muligheter, tips til produksjon, feilsøking osv. Dette vil være med på å veilede prosessen, og vil regelmessig bli brukt for å øke kvaliteten i resirkuleringsprosessen hos Additech As. [75]

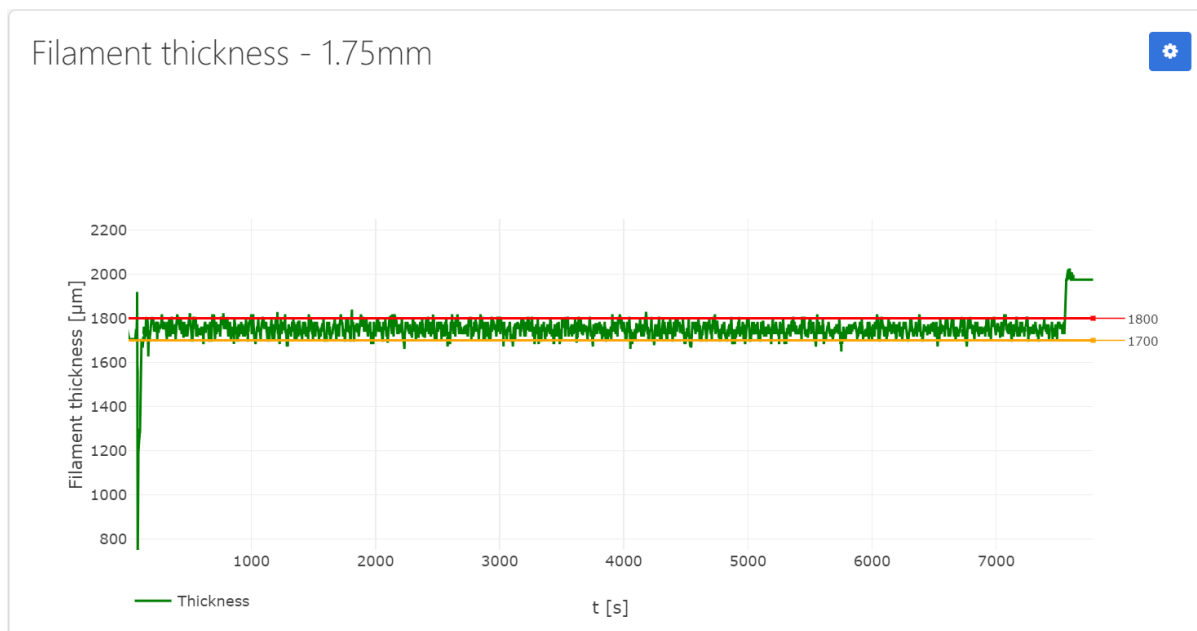
8 Produksjon av filament og prototype fra rPLA

For å teste resirkuleringssystemet har det blitt sett opp et kretsløp for å illustrere den sirkulærøkonomiske tankegangen. Denne består av følgende punkter.

- Produksjon av filament fra pellets
- Produksjon av deler
- Samling av plast til resirkulering
- Granulering av gamle deler og avfallsplast
- Produksjon av filament
- Produksjon av modell fra rPLA

8.1 Produksjon av filament fra pellets

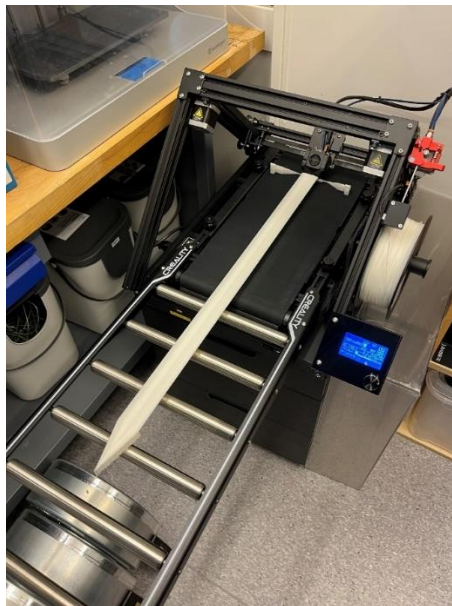
For å minimere påvirkningen fra forskjellige blandinger PLA har peletsene fra 3Devo blitt brukt til å produsere en rull med rPLA. Disse peletsene ble helt i filament makeren og ekstrudert med parameterne fra avsnitt 7.5.3. Prosessen og variasjonen i ekstruderingsdiameteren er dokumentert på figuren under.



Figur 23: Oversikt over filamenttykkelse under resirkulering

8.2 Produksjon av deler

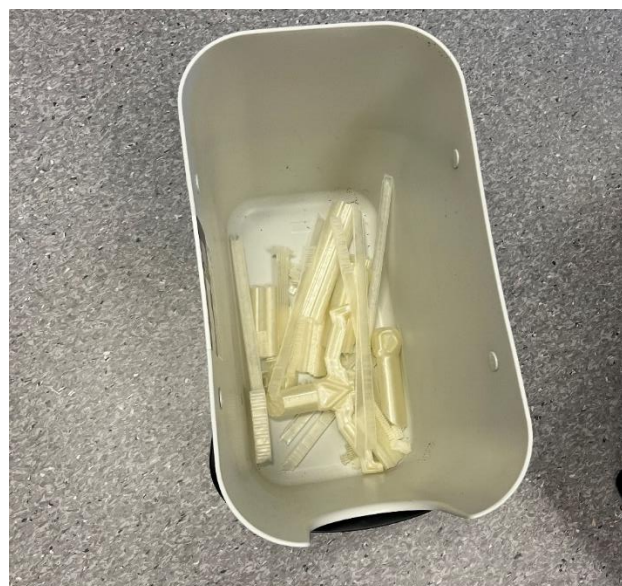
Etter at det har blitt produsert en rull med rPLA ble denne rullen brukt til å produsere deler. Dette er gjort på creality CR-30. Denne printeren har blitt brukt siden den kan produsere store deler, og det enkelt vil kunne produseres nok modeller til å resirkulere materialet til en full spole. Dette er illustrert på figuren under.



Figur 24: Produksjon av figur med PLA fra granulat

8.3 Samling av plast til resirkulering

Etter at modellene har blitt produsert, ble de brutt ned til mindre deler og sortert i en bøtte for senere bruk. Dette er for å holde rPLA'en separat fra resten av polymerene som blir brukt i kjernevirksomheten til Additech.



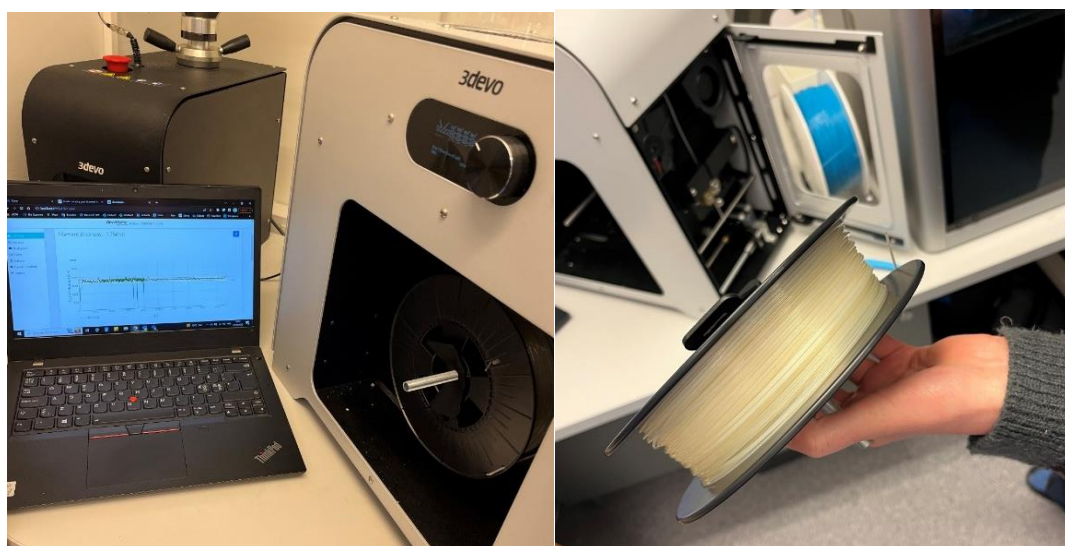
Figur 25: Sortering av avfall fra produksjon

8.4 Granulering av gamle deler og avfallsplast

Etter at modellene har blitt printet, delt opp i mindre deler og sortert har dette blitt kjørt gjennom en shredder. Dette reduserer modellene til små flak som senere kan brukes i produksjonen av filament.

8.5 Produksjon av filament fra resirkulerte prototyper

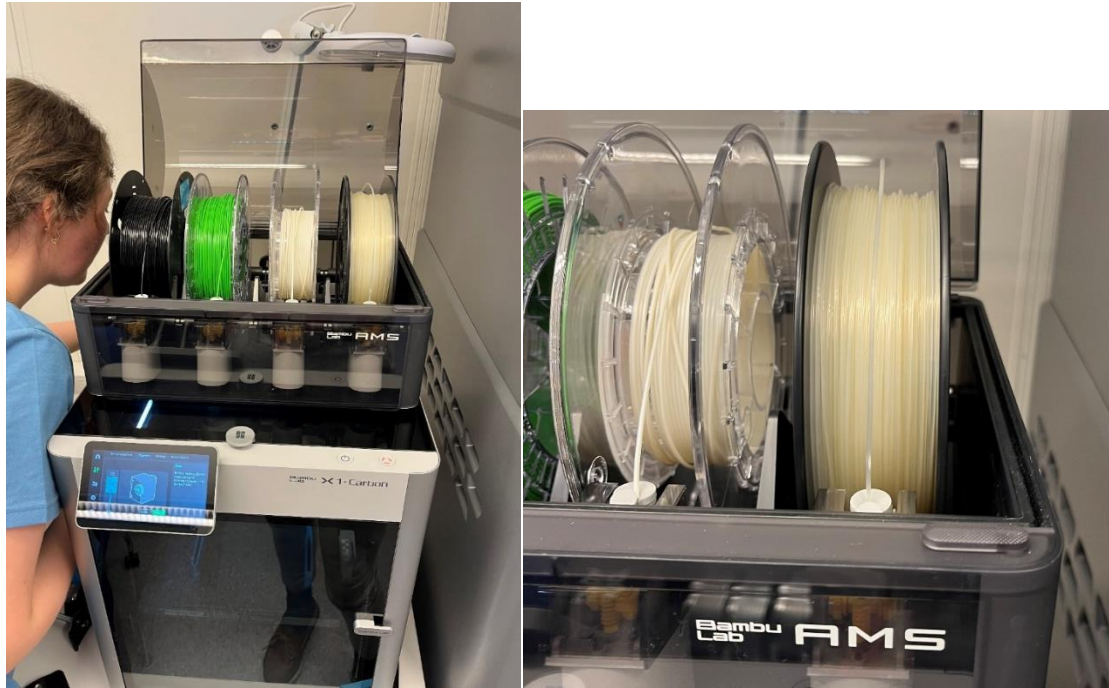
Etter at granuleringsprosessen har blitt gjennomført blir granulatet brukt til produksjonen av filament. I denne prosessen blir produksjonsmaskinen koblet til en PC for å overvåke prosessen, og kvalitetssikre det produserte filamentet. Her blir temperaturpåvirkningen og diameteren på filamentet overvåket gjennom hele prosessen. Produksjonsprosessen og resultatet er illustrert på bildene under.



Figur 26: Produksjon av filament fra granulerte deler

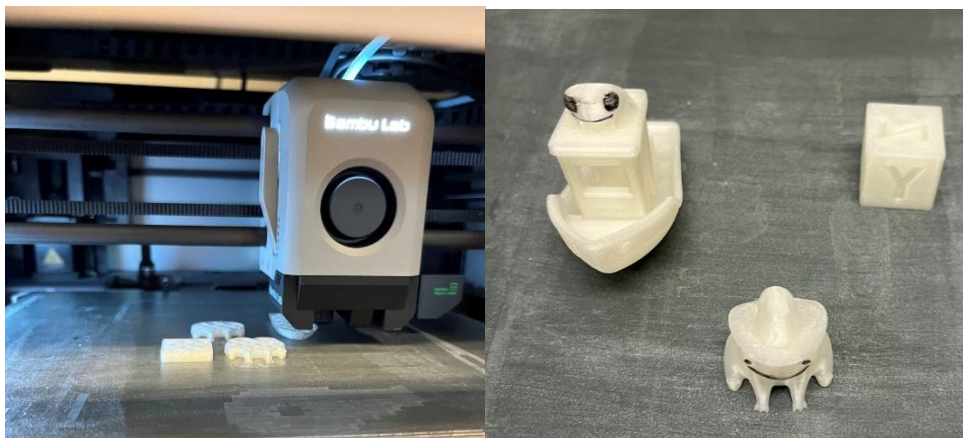
8.6 Produksjon av modell fra rPLA

Det siste steget i det sirkulærøkonomiske løpet har vært å produsere deler med det resirkulerte filamentet. På bildene under er det illustrert at det resirkulerte filamentet har blitt brukt i produksjonen på en Bambu Lab 3D printer.



Figur 27: Produksjon med rPLA

Videre har det blitt produsert tre komponenter for å teste presisjon, overheng ect. i printingen av nytt materiale. For å teste dette har det blitt printet en Benchy, en kalibrerings kube og en frosk med cowboyhatt. Resultatet fra denne produksjonen er illustrert på figuren under, og figurene har blitt plassert på platen for bilde etter inspeksjon (bilde til høyre).



Figur 28: Produserte deler med rPLA

8.7 Erfaringer fra resirkuleringsprosessen

Gjennom produksjonen fra pellets har det kommet frem en par utfordringer. Disse utfordringene ble håndtert etter hvert som de oppsto slik at det var mulig å produsere filament fra pellets.

Den første utfordringen som ble observert var at polymer som ble shreddet klebet seg sammen under polymertørkingen. Dette førte til at maskinen stoppet på grunn av et for stort motstandsmoment i skruen i «hopperen». Etter å ha sjekket egenskapene til PLA i tabell 9 ble temperaturen senket til 55°C. Dette gjorde at polymeret sluttet å klebe seg sammen, med unntak av enkelttilfeller der maskinen stoppet.

Den neste utfordringen som oppsto, var at shreddet materiale ikke falt ned i ekstruderingskruen med et jevnt volum. Dette førte trolig til en stor variasjon i filamenttykkelsen som følge av mangel på materiale gjennom ekstruderingskruen. Løsningen på dette problemet ble at beskyttelsesgitteret i åpningen til ekstruderingskruen ble fjernet, og en vibrator som fulgte med maskinene ble plassert i inngangen. Dette førte til at filamenttykkelsen til ekstruderingen jevnet seg ut, og kvaliteten til filamentet forbedret seg.

Ekstruderingsmaskinen har hatt en tendens til å ekstrudere filament med stor variasjon i tykkelsen, og har også på et punkt ekstrudert større mengde rPLA mens en ekstruderingsprosess har pågått. Dette ble trolig forårsaket av at filamentet klebet seg til en av veggene i tykkelsesmåleren, og deretter skapte en større oppsamling av materiale rundt ekstruderingsdysen.

9 Utvikling av forsøk

I denne delen av rapporten vil det bli presentert en rekke tester for å dokumentere kvaliteten på resirkulert filament

9.1 Produksjon av Benchy

For å undersøke hvordan resirkulert materiale påvirker produksjonsegenskapene vil det bli produsert Benchy'er. Dette er en test som vil gi en visuell indikasjon på kvalitet basert på antall resirkuleringsssykluser produksjonsmaterialet har vært igjennom.

Benchy'er kan brukes til å identifisere en rekke feil og ufullstendigheter i printe-prosessen, og skal produseres uten støttestruktur. En Benchy kan brukes til å finne følgende feil [77]

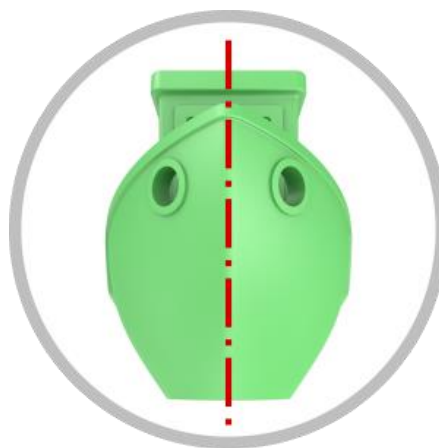
Skroget brukes til å teste kurvet overheng, og kan avsløre avvik i overflaten.

Overhenget i skroget er varierende, og dette vil skape en god indikator på hvor mye overheng diverse prototyper kan bygges med uten support. Om polymere blir for viskøst vil det bli utfordringer med overheng.



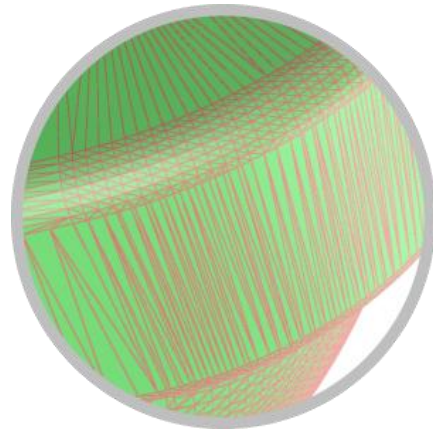
Figur 29: Tester i skroget til Benchy

Symmetri brukes til å avdekke «skewness» eller «warping» i bygget. Dette skaper et inntrykk av kvaliteten til printereren, og om det vil være større variasjoner som følge av kvaliteten til filamentet. Om størrelsen til filamentet varierer i større grad vil denne testen kunne avdekke dette.



Figur 30: Symmetritest med Benchy

STL-filen har et maksimalt avvik på 0.001mm, og vil teste printerens egenskap til å produsere en CAD-modell. Større avvik vil da komme som følge av printeprosessen og ikke som følge av feil i produksjons-filen.



Figur 31: Presisjonstest med Benchy

Horisontale plan er brukt flere steder i modellen som på dekk, lasteplanet og toppen av pipen, og kan brukes til å avdekke skjevheter i figuren.



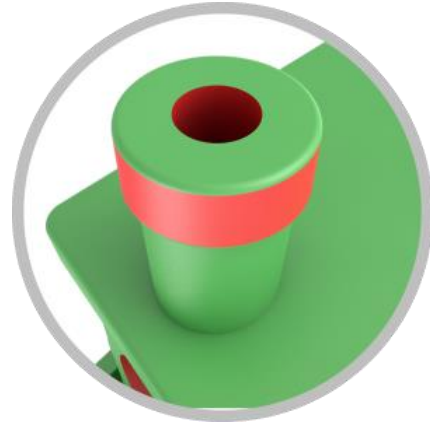
Figur 32: Testing av horisontale plan med Benchy

Overflate detaljer finnes flere steder på modellen, og detaljnivået til skiltet akter på båten er 2mm med en tykkelse på 0.1mm.



Figur 33 Testing av overflatedetaljer med Benchy

Sylindriske former finnes blant annet i pipen til Benchyen, og både indre og ytre diameter er konsentriske.



Figur 34: Testing av sylindriske former med Benchy

Overheng finnes i styrhuset til Benchy'en og her er det flere punkter med varierende grad av overheng.



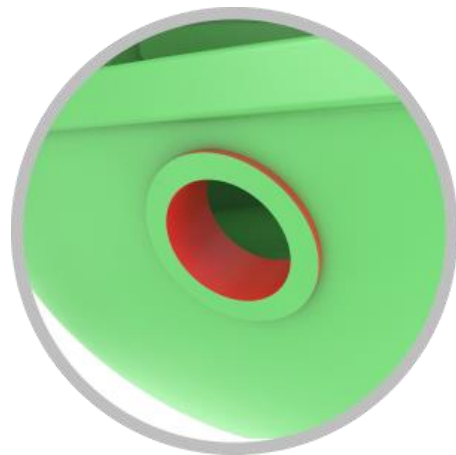
Figur 35: Testing av overheng med Benchy

Store horisontale hull finnes i vinduet bak styrhuset og på skipsrattet. Dette gjør det mulig å sammenligne presisjonen til maskineriet, og hvor stort Ø-mål som kan bygges uten overheng.



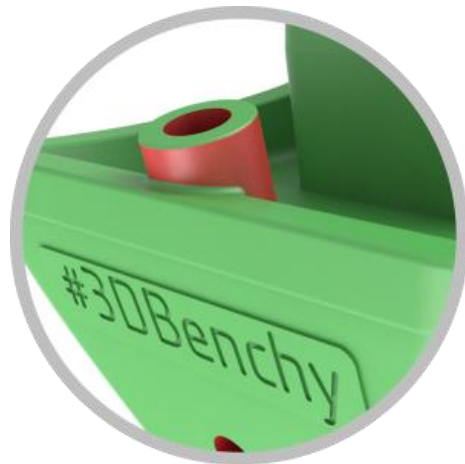
Figur 36: Test av presisjon på store hull

Små horisontale hull finnes i klyset til båten, og her finnes det også en tynn flens.



Figur 37: Test av presisjon på små hull

Små skråstilte hull kan undersøkes i «fiskestang holderen» bakerst i båten, og her er det to konsentriske sirkler som kan brukes til å se på ujevnheter i produksjonen



Figur 38: Testing av små detaljer

Detaljer i første lag gjør det mulig å undersøke feil som «first-layer-squashing»



Figur 39: Test av detaljer i første lag

9.2 Produksjon av Temp Tower

For å skape et oversiktsbilde av optimale temperaturer for printing vil det bli produsert Temp Tower for hver resirkuleringssyklus. Temp tower er bygget slik at en rekke homogene enheter er stablet i høyden, og temperaturen endrer seg gjennom byggeprosessen. Eventuelle forskjeller som kommer av endringer i ekstruderings temperaturen vil bli synliggjort når temp tower er ferdig bygget, og det vil være mulig å bruke dette som en indikasjon på hva de optimale produksjonstemperaturene for resirkulert filament vil være. Hensikten med testen er å avdekke hvordan optimale prosessparametere endrer seg med resirkuleringssykluser. [78]

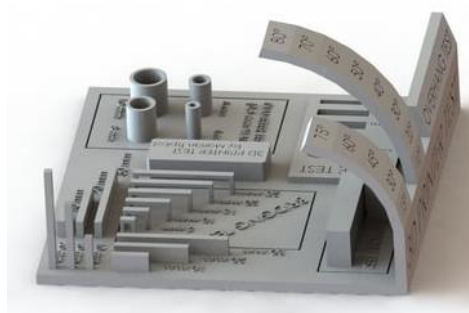


Figur 40: Temp Tower

9.3 Produksjon av All-in-one test

Her vil det produseres flere forskjellige tester. Dette blir gjort for å avdekke egenskaper til materialet i produksjonsprosessen. Her vil det bli testet overheng, presisjon/toleranser og en rekke andre punkter. Her vil det bli produsert forskjellige typer tester, og resultatene vil sammenlignes med de andre prøvene. Denne testen er illustrert på figuren under. [79]

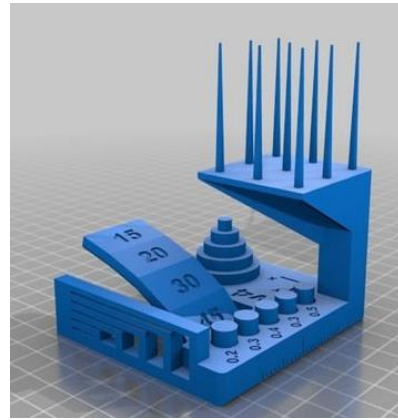
Denne testen er ganske grundig og inneholder majoriteten av testene for produksjonsegenskapene. En av egenskapene som mangler er tolleransetester, men disse vil bli dokumentert gjennom resten av de tiltenkte testene.



Figur 41: Illustrasjon av en All-in-one test

9.4 Produksjon av stringingtest

En av testene som har blitt produsert er en all-in-one test som også har en stringing-test. Denne testen vil bli produsert gjennom flere resirkuleringscykluser, og inneholder også mange av faktorene som blir testet i All-in-one testen fra delkapittelet over. En av grunnene til at denne testen har blitt valgt er for å se presisjonen til testresultatene, og skape et større sammenligningsgrunnlag av produksjonsegenskapene. Denne testen er illustrert på figuren under. [80]



Figur 42: illustrasjon av Stringing og all-in-one test

9.5 Produksjon av Clearing test

Clearingtesten er en test som gir en indikator på hvor presise 3D printerne er. Her varierer klaringen fra hovedkonstruksjonene og ut til de roterende objektene med 0.35mm til 0.1mm. Dette vil gi en indikasjon på hvordan varmestrømningene i materialet forplanter seg under produksjon. [81, 82]



Figur 43: Illustrasjon av clearing test

10 Gjennomføring av forsøk

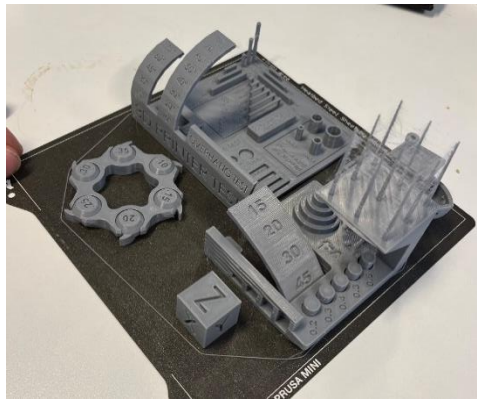
I denne delen av rapporten vil prøvene og resultater bli dokumentert og presentert.

10.1 Produksjon av byggeplater

For å se på hvordan kvaliteten til byggeplatene utviklet seg gjennom resirkuleringssyklusene har disse blitt dokumentert. Ved eventuelle avvik i resirkuleringsprosessen vil dette bli dokumentert.

10.1.1 Byggeplater med nytt filament

For å skape en baseline for prøvene ble det først printet en plate med originalt filament. Dette ble med samme fil som alle andre prøver, så eventuelle avvik vil være som følge av kvaliteten til filamentet. Denne produksjonsprosessen er dokumentert under.



Figur 44: Produsert plate fra nytt filament før plate ble byttet

Deler av modelene hadde også warpet og sluppet tak i platen. Dette er illustrert i figuren under.



Figur 45: Dokumentasjon på at test har løsnet fra platen

Etter at det ble oppdaget at byggeplaten gjorde det umulig å produsere med rPLA ble det produsert en ny benchmark med nytt filament. Etter at produksjonsprosessen ble endret forsvant alle feilene på prøvene.

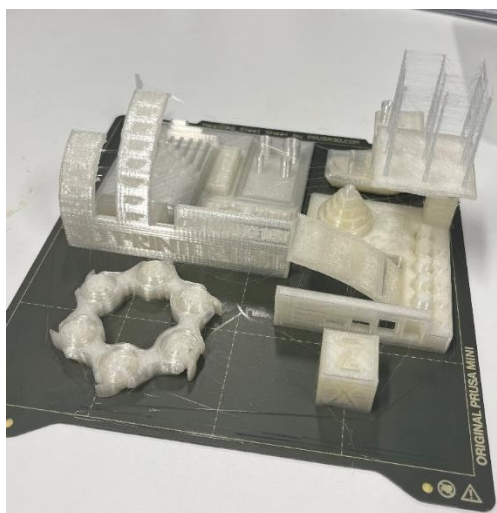
10.1.2 Byggeplater etter en resirkuleringssyklus

Produksjonen av prøver med rPLA har kommet med flere utfordringer. I første forsøk med prøve produksjon stoppet printeren med en «*Thermal runaway*» feil. Denne feilen har vært gjengående, og har skjedd på flere av printene. Dette kom etter et «layer shift» i printeren, og resultatet av dette produksjonsforsøket er dokumentert under.



Figur 46: Dokumentasjon av feilproduksjon av prøver

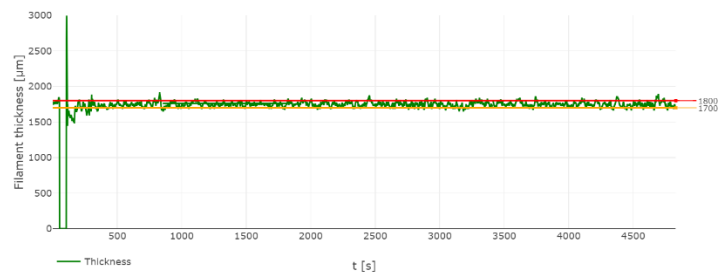
Etter dette forsøket har Roar Leirvåg hjulpet til med oppsettet av printeren for å se om dette gir bedre resultater i produksjonsprosessen. Roar oppdaget at innstillingene på maskinen var feil, og endret innstillingene. Byggeplaten ble endret fra en teksturert plate til en smooth plate. Resultatet etter at oppsettet på printeren ble endret er dokumentert under.



Figur 47: Dokumentasjon av testplate med rPLA etter endringer av byggeplate og kalibrering

10.1.3 Byggeplate etter to resirkuleringssykluser

Filament thickness - 1.75mm

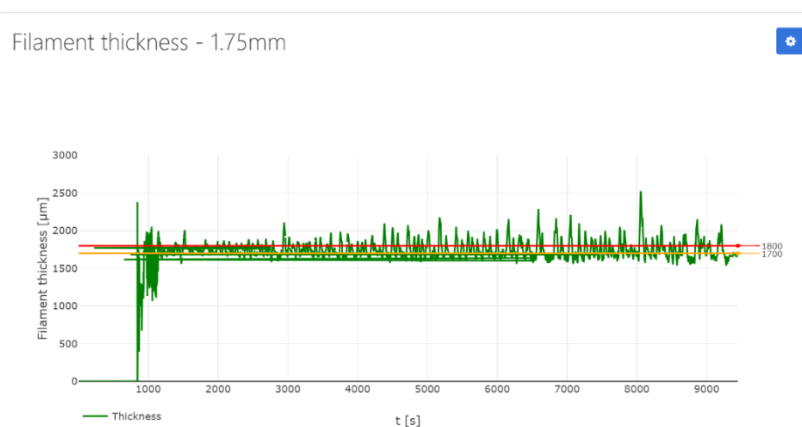


Figur 48: Ekstruderingslog for andre resirkuleringsprosess

Etter to resirkuleringsbegynner det å bli ujevnheter i det produserte filamentet, og tykkelsen begynner å variere så mye at Prusa printeren får problemer med å produsere figurer med det resirkulerte filamentet. Her var det kun mulig å produsere et temp tower før filamentet ble for ujevnt. Dette førte til at printeren stoppet flere ganger, og det ble gjort tre forsøk på å skape en plate med filament som hadde blitt resirkulert to ganger. Dette førte til at Malin Sagstad måtte demontere maskinen og fjerne materiale fra lasteskruen til printeren. Etter tre forsøk ble det besluttet å stoppe forsøket med filament som hadde blitt resirkulert to ganger.

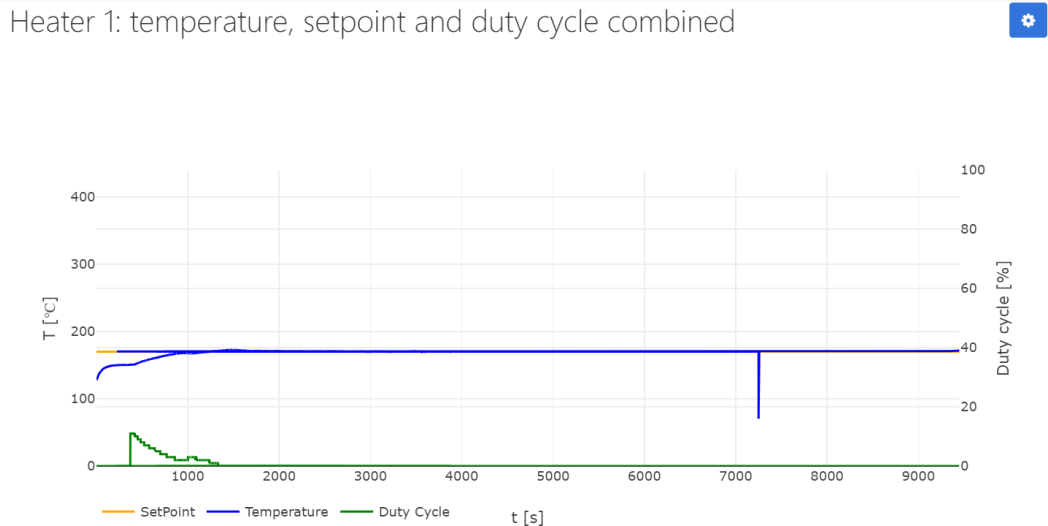
10.1.4 Byggeplate etter tre resirkuleringssykluser

Under produksjonsprosessen av filament etter tre resirkuleringsprosesser ble det større problemer med produksjonsprosessen, og resultatene fra to resirkuleringssykluser ble forverret etter en resirkuleringssyklus til. Som illustrert på figuren under blir det større ujevnheter i tykkelsen på filamentet, og diameteren er systematisk utenfor de ideelle produksjons tykkelsen. Variasjonen til bredden er dokumentert på figuren under.



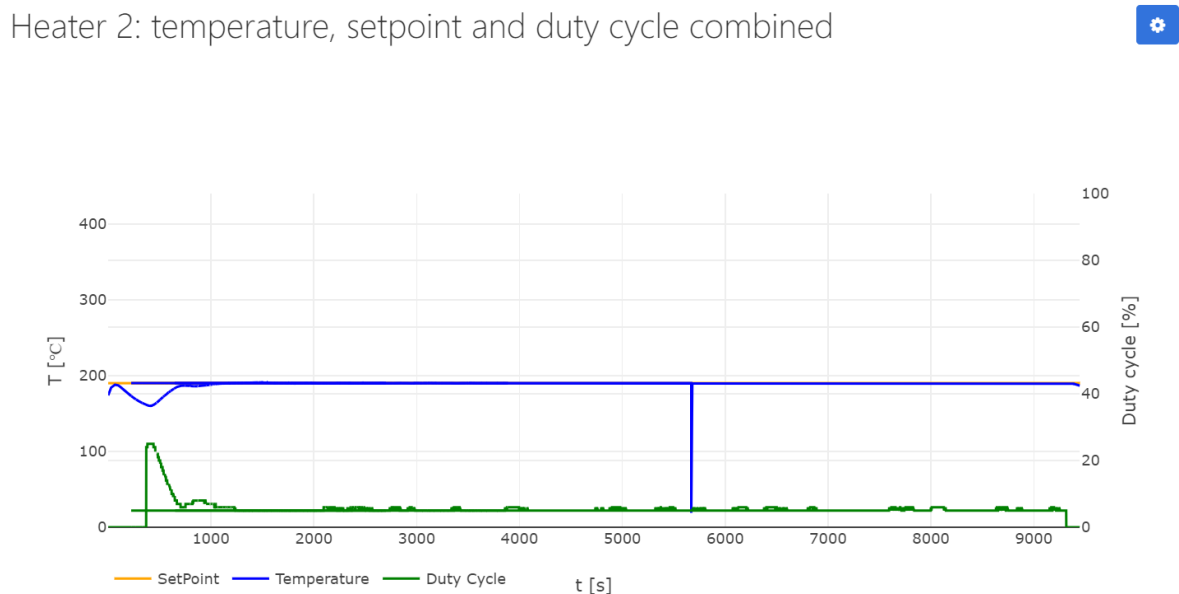
Figur 49: Oversikt over filamenttykkelse under produksjon

Siden tykkelsen på filamentet varierte så mye under produksjonsprosessen ble det undersøkt hvordan temperatuere på de forskjellige varmeelementene i ekstruderingsmaskinen har vært gjennom prosessen.



Figur 50: Oversikt over temperaturen på heater 1

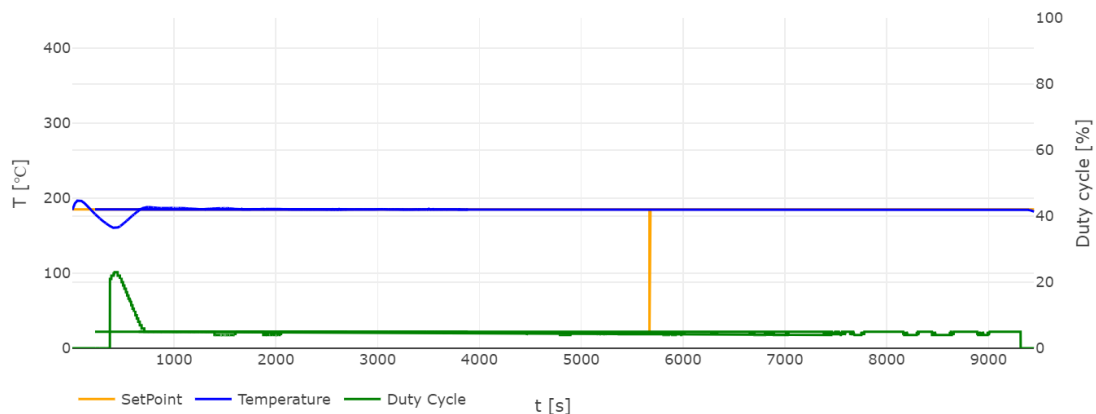
Temperaturen til ekstruderingsprosessen på heater 2 var også veldig stabil under hele prosessen. Litt før 6000s punktet har det vært et dropp i temperaturen, men dette kan trolig forsvares med en signalfeil. Dette er illustrert på figuren under.



Figur 51: Oversikt over temperatur på heater 2 under produksjonsprosessen

Heater 3 har også vært stabil under hele prosessen, og det eneste endringen er på grafen er at setpointet til kontrolleren har endret seg. Utover dette har det ikke vært noen store endringer i produksjonsprosessen.

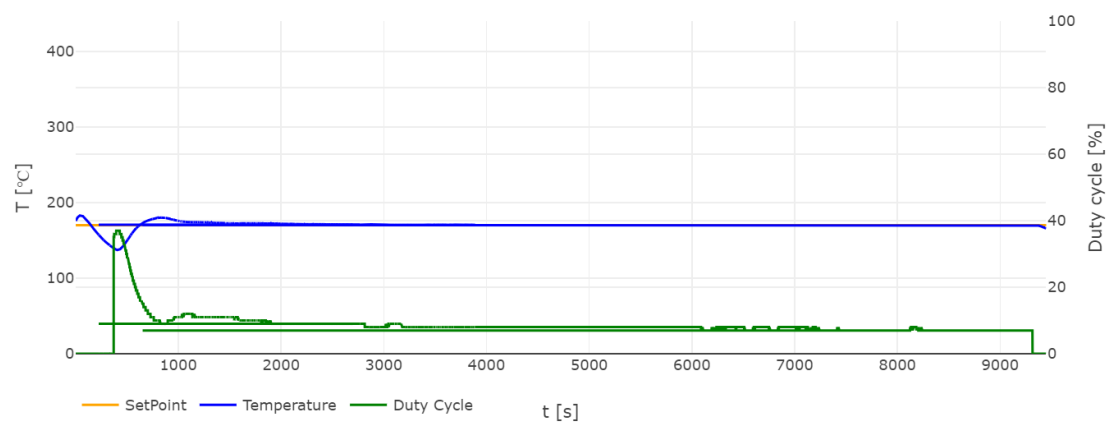
Heater 3: temperature, setpoint and duty cycle combined



Figur 52: Oversikt over temperatur på heater 3 under produksjonsprosessen

Temperaturen i heater 4 har vært stabil gjennom hele produksjonsprosessen, og her har det ikke vært noen endringer i grafen. Dette er illustrert på figuren under

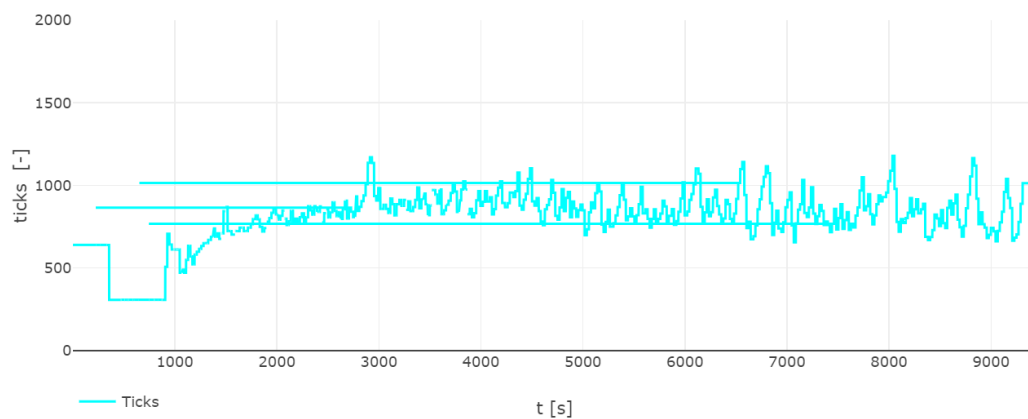
Heater 4: temperature, setpoint and duty cycle combined



Figur 53: Oversikt over temperaturen på heater 4 under produksjonsprosessen

«Puller ticks» er den variabelen som har endret seg mest under produksjonsprosessen. Dette er hastigheten til hjulene som drar filamentet gjennom måleren. Dette henger sammen med tykkelsen, og trolig viskositeten til polymeret som ekstruderes gjennom ekstruderingskruen. Puller hjulene prøver å kompensere for tykkelsen til filamentet, og dette skaper trolig syklusen som varierer tykkelsen til filamentet.

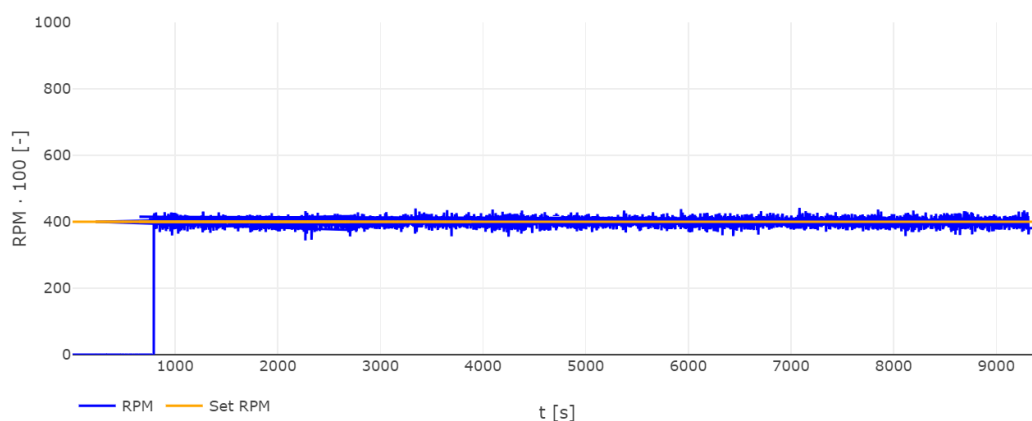
Puller ticks



Figur 54: Oversikt over puller ticks under produksjonsprosessen

Ekstruderings RPM'en holder seg ca på target verdien gjennom hele prosessen. Dette er illustrert på figuren under.

Extruder RPM



Figur 55: Oversikt over RPM på ekstruderingskruen under produksjonsprosess

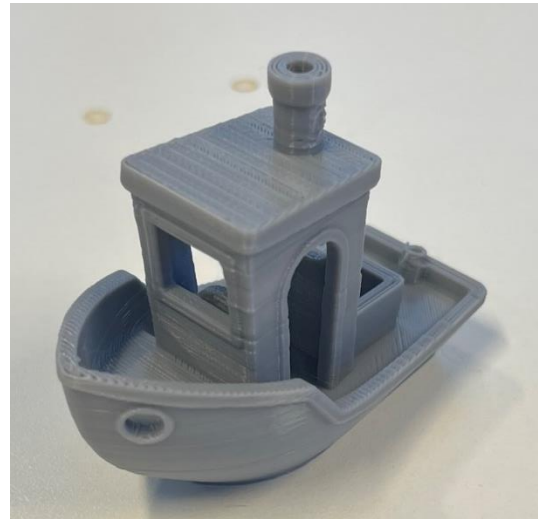
10.2 Resultater fra Benchy

Resultatene fra Benchyene har blitt presentert i dette delkapittelet sammen med eventuelle feil.

10.2.1 Resultater fra Benchy med nytt filament

Nøyaktighet I modell

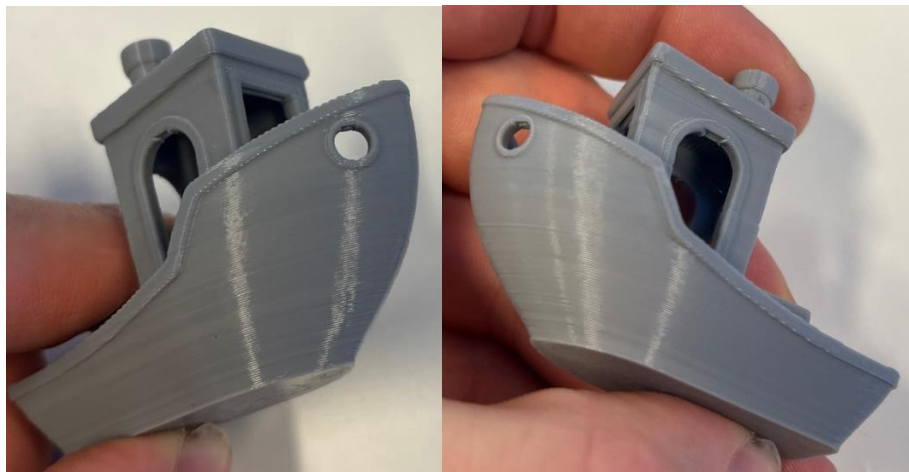
Benchyen som har blitt produsert med nytt filament har totalt sett en god geometri, og det er ingen større feil i Benchyen. Denne Benchyen er vist på figuren under.



Figur 56: Benchy med orginalt filament

Skrog

Skroget til Benchy'en er greit produsert, og det er ingen større feil i overhenget.



Figur 57: Dokumentering av skrog med dokumentert filament

Symmetri

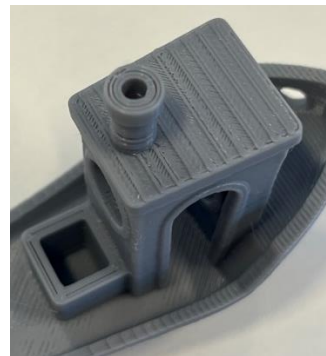
Benchyen er symmetrisk, og det er ingen store forskjeller mellom sidene.



Figur 58: Dokumentasjon av symetri med orginalt filament

Horisontale plan og layer steps

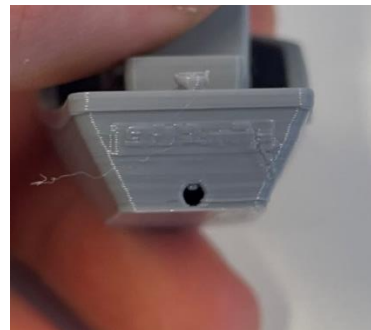
De horisontale planene til rekken og taket til Benchyen har synlige layersteps. Disse prøvene har blitt bra produsert, og det er ingen større feil i delen.



Figur 59: Dokumentasjon av horisontale plan med oiriginalt filament

Overflate detaljer

Overflate detaljene har forsvunnet i produksjonen, og dette viser at det ikke er god nok presisjon i filamentet og printeprosessen.



Figur 60: Dokumentasjon av overflate detaljer med originalt filament

Store hull

Det store hullet har også blitt produsert med god kvalitet, men også her har toppen av hullet fått samme feil som det lille i skroget. På toppen av hullet har filamentet blitt lagt som en linje, og ikke som en sirkulær form.



Figur 61: Dokumentasjon av store hull med originalt filament

Små hull

Kvaliteten til de små hullene i skroget er god og det eneste stedet det er antydning til feil er i den øvre delen av hullet. Her er ikke hullet rundt, men det er lagt en linje med filament.



Figur 62: Dokumentasjon av små hull med originalt filament

Små skråstilte hull

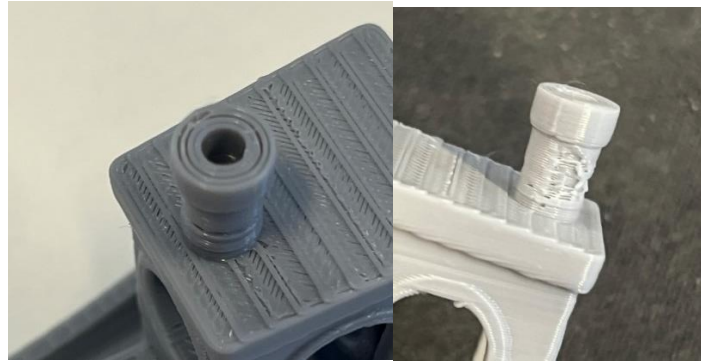
De små skråstilte hullene til Benchyen har blitt greit produsert med noe feil og overekstrudering i overflaten til hullene. I det nedre hullet har det blitt en feil i overhenget, der det har formet seg en klump.



Figur 63: Dokumentasjon av små skråstilte hull med originalt filament

Sylindriske former

Den sylindriske formen har blitt produsert tilstrekkelig godt, men har to feil. Den første er at toppen av pipen ikke er 100% fylt inn. Denne feilen har også oppstått i lasterommet til Benchyen. Videre har det også kommet en feil på siden av pipen.



Figur 64: Dokumentasjon av sylindriske former med originalt filament

Overheng

Overhengen har blitt produsert med god kvalitet, og det fremkommer ingen feil med unntak av toppen til døren. Denne har samme feil som de andre hullene, og er en systematisk feil i produksjonen.



Figur 65: Dokumentasjon av overheng med originalt filament

Første Lag

Det første laget som har blitt lagt viser noe «*first layer squishing*», og alle detaljene i teksten kommer ikke helt frem.



Figur 66: Dokumentasjon første lag med originalt filament

10.2.2 Resultat fra Benchy etter en resirkuleringscyklus

Nøyaktighet I modell

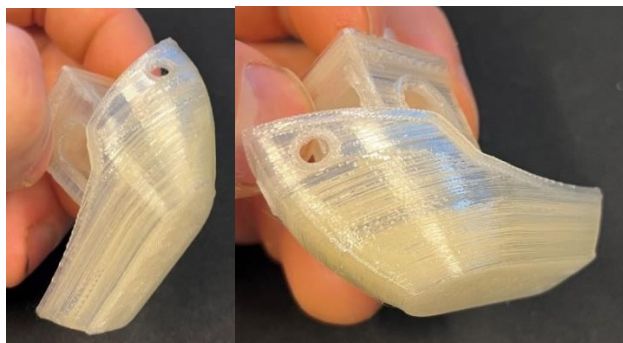
Førsteintrykket av modellen fra rPLA har ingen store feil, og det er ingen store produksjonsfeil. Modellen er illustrert på modellen under.



Figur 67: Dokumentasjon av figur med rPLA

Skrog

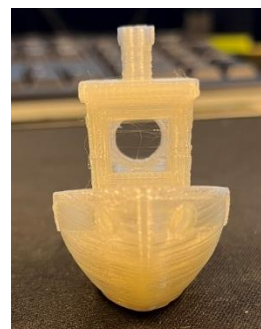
Skroget har ingen store feil, men det er noen layer-lines i produksjonen. Disse er negelesjerbare i forhold til den tiltenkte bruken av det resirkulerte materialet.



Figur 68: Dokumentasjon av skrog med rPLA

Symmetri

Modellen har også tilfresstillende symmetrisk. Det er ingen store feil der modellen ikke er symmetrisk, og for en rapid prototyping prosess vil disse resultatene være tilfresstillende.



Figur 69: Dokumentasjon av symetri med rPL

Horisontale plan og layer steps

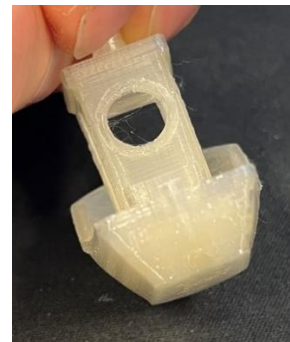
Modellen som har blitt produsert med rPLA har synlige layer steps, og disse kan lett kjennes hvis man skraper en negl over planene.



Figur 70: Dokumentasjon av horisontale plan med rPLA

Overflate detaljer

Skiltet til Benchy'en har forsvunnet under produksjon, og det er ikke mulig å lese skriften som skal være på skiltet bak.



Figur 71: Dokumentasjon av overflatedetaljer med rPLA

Store hull

Vinduet bak på modellen har ingen store feil, men det er noen små feil rundt toppen av hullet. Her finnes det litt stringing, og to små stalaktitter.



Figur 72: Dokumentasjon av store hull med rPLA

Små hull

De små hullene på modellen har også noe stringing i hullene, men her er det ingen stalaktitter. Det er derimot en sammensmelting i den øverste delen som gjør hullet mindre sylindrisk.



Figur 73: Dokumentasjon av små hull med rPLA

Små skråstilte hull

De to små skråstilte hullene bakerst i båten har ingen store feil.



Figur 74: Dokumentasjon av små skråstilte hull med rPLA

Sylindriske former

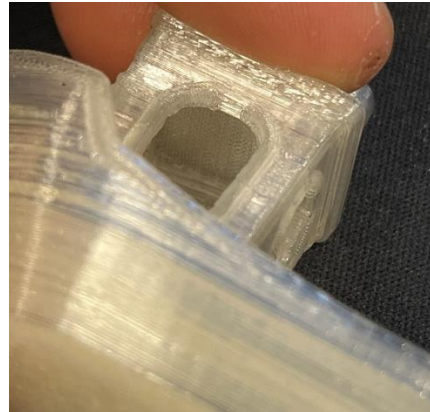
Pipen til benchyen er også greit produsert, og den har ingen store feil.



Figur 75: Dokumentasjon av sylindriske former med rPLA

Overheng

Overhengen i styrhuset og dørene har blitt produsert uten større feil. Den mest synlige feilen er i det øverste laget der geometrien til døren har fått en liten feil i overgangen mellom dørkarmen og godset.



Figur 76: Dokumentasjon av overheng med rPLA

Detaljer i første lag

Detaljene I det første laget er gode og teksten i Benchyen kommer tydelig frem til tross for fargen til filamentet. Merk, at her er bildet noe missvisende og teksten kommer ikke like tydelig frem som følge av gjennskinn.

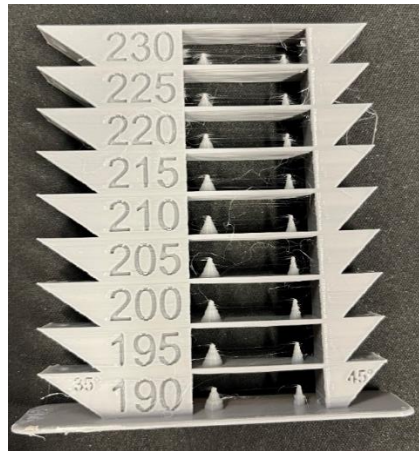


Figur 77: Dokumentasjon av første lag med rPLA

10.3 Resultater fra Temp Tower

I denne delen av rapporten vil det bli dokumentert og kommentert Temp Tower med forskjellige antall resirkuleringsprosessen. Her vil det også bli dokumentert hva som ser ut som en optimal printe-temperatur for produksjonsprosessen.

10.3.1 Resultater fra Temp Tower med originalt filament



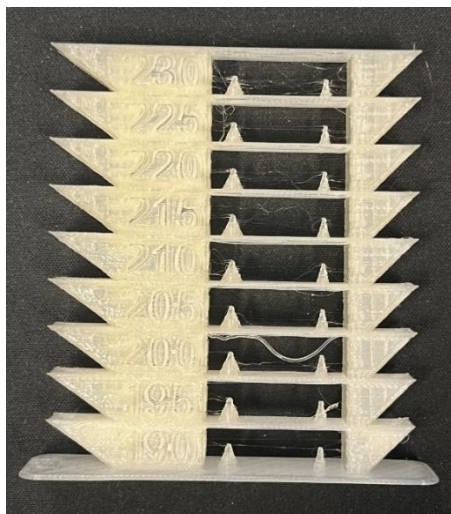
Figur 78: Temp tower med orginalt filament

Fra temptoweret kommer det frem at optimal printetemperatur for nytt filament er 210-215°C.

10.3.2 Resultat fra Temp Tower med rPLA

For å identifisere optimale produksjonsparametere har det hovedsakelig blitt undersøkt hvordan temperaturen påvirker produksjonsegenskapene.

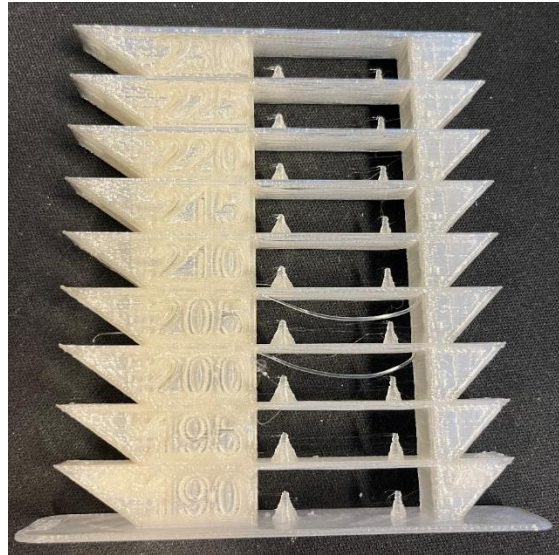
10.3.2.1 Resultat etter en resirkuleringssyklus



Figur 79: Temp Tower etter en resirkuleringssyklus

Fra dette temp toweret kommer det frem at optimal produksjonstemperatur ligger mellom 210-215°C.

10.3.2.2 Resultat etter to resirkulerings sykluser



Figur 80: Temp Tower etter 3 resirkuleringssykluser

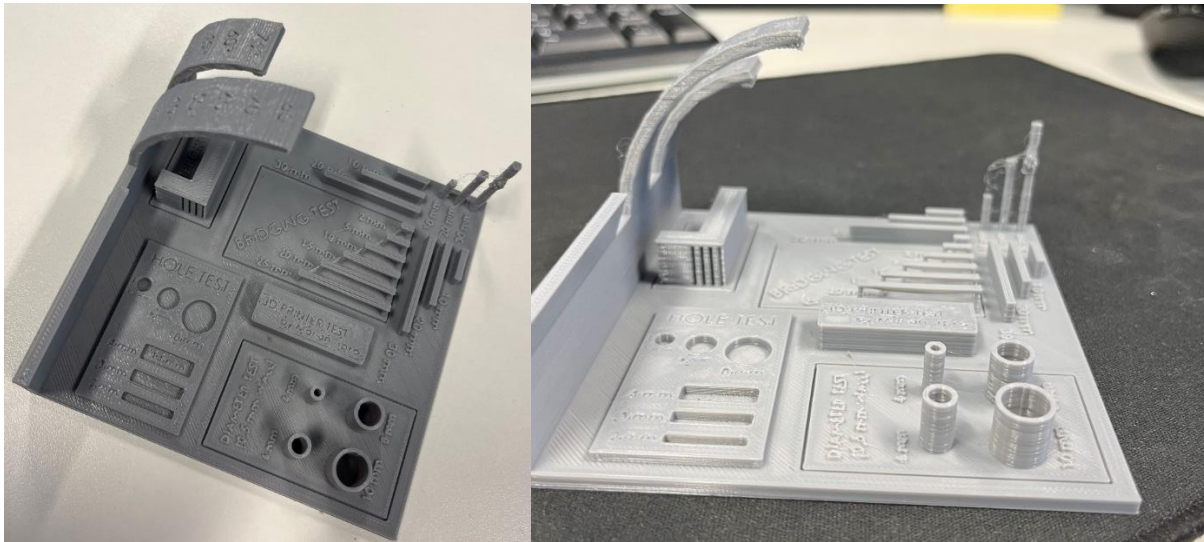
Fra temp tower testen kommer det frem at den optimale temperaturen er 210. Her er det minst bridging, og temperaturen gir best kvalitet i bygget. Teksten på bygget er fremdeles noe uklar, men er tilsynelatende mest leselig på en temperatur på 205°C.

10.4 All-in-one tester

All-in-one testene har blitt produsert for å få et innblikk i de generelle produksjonsegenskapene til filamentet, og se på hvordan eventuelle prototyper kan produseres med gjenvunnet materiale.

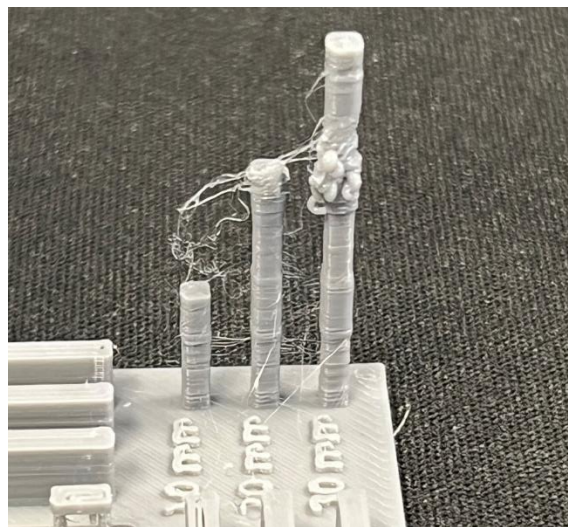
10.4.1. Resultater fra All-in-one test med nytt filament

Etter at printen ble tatt av platen ble de undersøkt og dokumentert for å lete etter grove feil eller andre bemerkningsverdige detaljer. Prøven som ble produsert med orginalt filament hadde ingen store feil, og hadde et godt detaljenivå både med tanke på skriften på prøven, og kvaliteten til prøven generelt. Dette er dokumentert på figuren under.



Figur 81: Oversiktsbilde av All-in-one tester med originalt filament

Fra de tynne sylindrene kommer det frem en produksjonsfeil i den høyeste sylindren. Her har det kommet en klumpdannelse og stringing mellom sylindrene. Det er også ujevnheter i sylindrene, og det er tydelig at diameteren varierer gjennom printeprosessen. Dette er illustrert på figuren under.



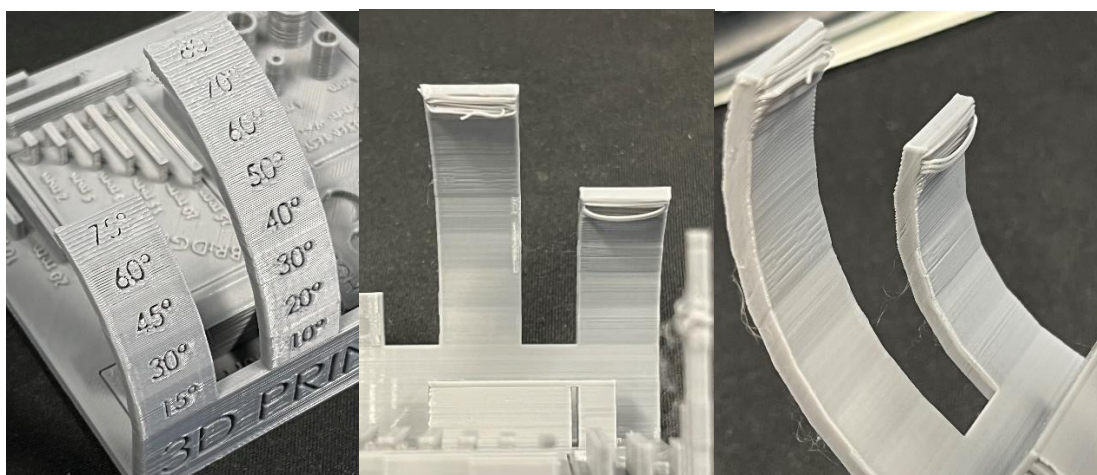
Figur 82: Dokumentasjon av sylindere med originalt filament

I prøvene som tester «*bridging*» og «*Thin walls*» har det kommet noen feil. «*Bridgingen*» har gått greit, men de tynne veggene har blitt produsert med noen feil. Hovedsakelig er disse ujevnheter rundt veggene. Selve veggene har blitt produsert tilstrekkelig tynne, men helheten av prøvene fremstår med feil. Dette kommer tydelig frem på det venstre bildet på figuren under.



Figur 83: Dokumentasjon av tynne vegger og overheng med originalt filament

Overhenget har blitt produsert bra, og det er ingen store feil før prøven når 70 grader overheng. Her klarer ikke filamentet å sveise seg godt nok sammen til å holde egenvekten av materialet oppe.



Figur 84: Dokumentasjon av overheng med originalt filament

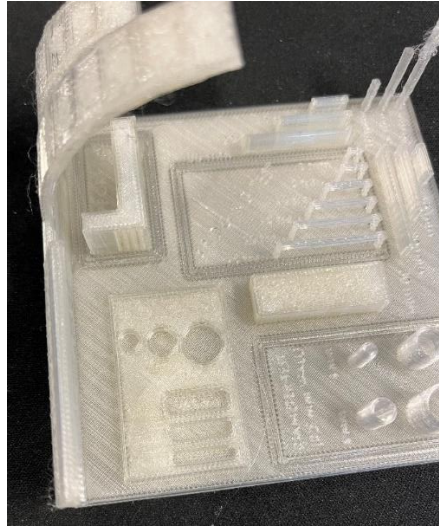
Hullprøvene fremkommer også godt, og til prototyping produserer dette tilstrekkelig god kvalitet-



Figur 85: Dokumentasjon av hullstørrelser med originalt filament

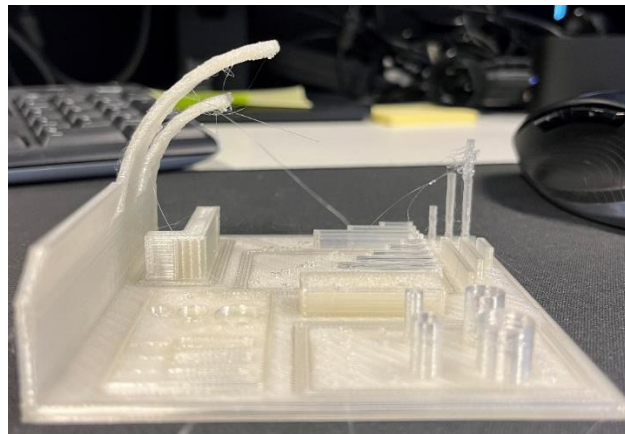
10.4.2. Resultater fra All-in-one test med rPLA fra en resirkuleringssyklus

Resultatene fra prøvene med rPLA er tilsynelatende gode, og et oversiktsbilde har blitt dokumentert under.



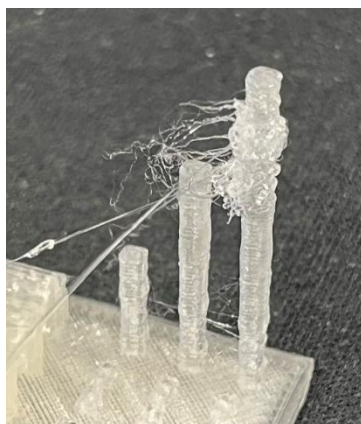
Figur 86: All-in-One test produsert med rPLA

Førsteintrykket av All-in-one testene er at det er relativt godt produsert. Den mest åpenbare feilen med prøven er stringing mellom mange av delen i printen, og dette kommer tydelig frem på finishen.



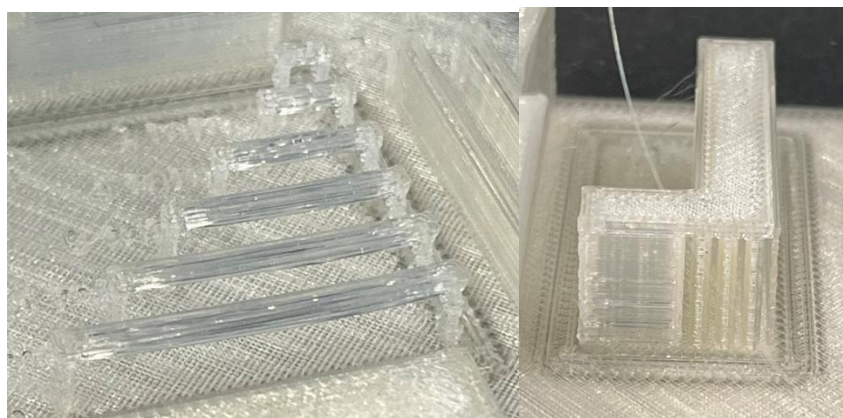
Figur 87: Dokumentasjon av stringing på All-in-one test med rPLA

Videre har det også kommet noen produksjonsfeil på en av de tynne sylindere. Her har det dannet seg klumer, og stringing på prøven. Dette vil påvirke kvaliteten og estetikken til prøvene, og vil begrense kvaliteten til prototypene.



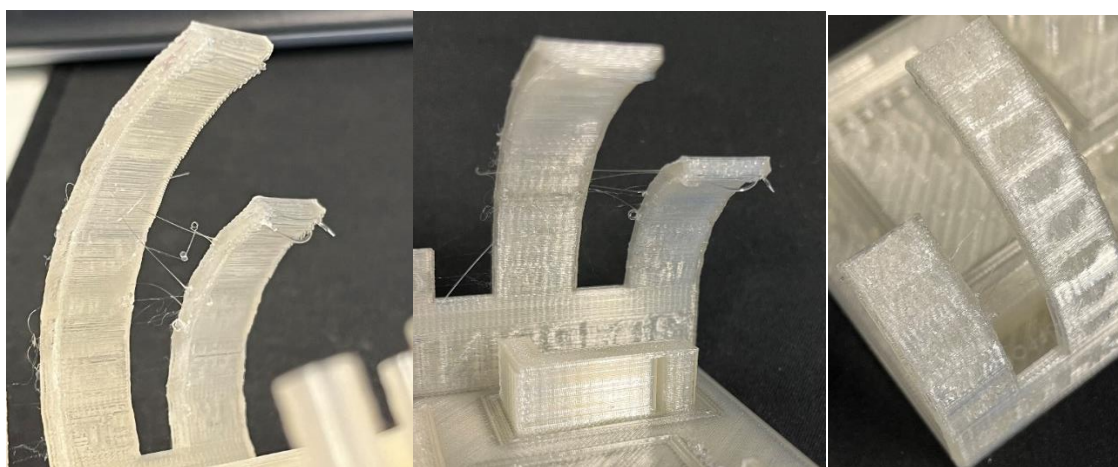
Figur 88: Dokumentasjon av sylindere produsert med rPLA

Bridgingen på prøvene har gått greit, og det fremkommer ingen feil på prøven.



Figur 89: Dokumentasjon av Bridging og tynne vegger med rPLA

Overhenget har også blitt veldig bra, og det fremkommer ikke noen større feil før 60 grader. Her blir det noen feil på undersiden av prøven, og teksten på prøven har blitt noe vanskeligere å lese.



Figur 90: Dokumentasjon av overheng med rPLA

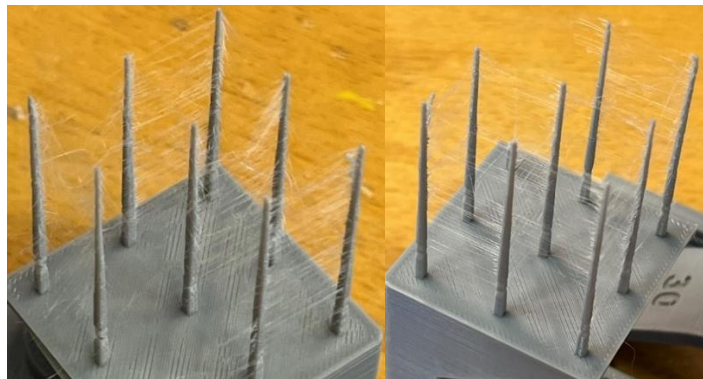
Hulltesten til prøven har også gitt gode resultater, og målene for hullene er tilstrekkelig gode for prototypeproduksjon.



Figur 91: Dokumentasjon av hull-test med rPLA

10.5. Stringing test

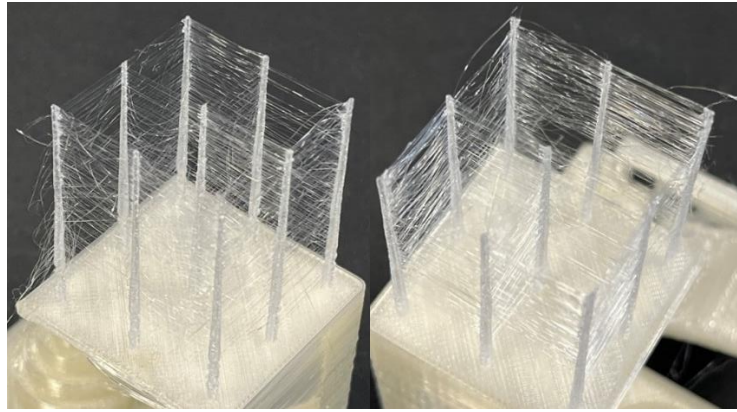
10.5.1. Resultater fra stringing test med nytt filament



Figur 92: Resultater fra stringing test med rPLA

Det er en del stringing på testene som er produsert med orginalt filament. Merk at den ene delen falt av etter at produksjonen var ferdig, og ikke under produksjon.

10.5.2. Resultat fra stringing test etter en resirkuleringsyklus



Figur 93: Stringing test med rPLA

Stringingen på prøvene mer rPLA har merkbart mye mer stringing enn referanseprøven. Roar Leirvåg mente at dette kunne komme av mangel på tørking av filamentet under produksjon.

10.6. Resultater fra clearing tester

10.6.1. Resultater fra clearing test med nytt filament



Figur 94: Dokumentasjon av clearing test med orginalt filament

Clearing testen som er produsert med orginalt filament har gode optiske egenskaper, og det kommer tydelig frem hvilke deler av testen som har forskjellige tolleranser. Alle delene kan roteres med unntak av testen med 0.1mm tolleranse. Etter litt post prosessering ble også denne delen bevegelig, og det er med andre ord klaring ned til 0.1mm

10.6.2. Resultat fra clearing test etter en resirkuleringsyklus



Figur 95: Resultat fra clearing test med rPLA

I clearing testene med rPLA som har blitt resirkulert en gang kommer det frem at alle delene kan roteres, og at det ikke er noen sammensmeltning mellom de roterende delene og rammen.

11. Tolkning av Resultater

I denne delen av rapporten vil forskningsresultatene bli presentert sammen med parameterne fra produksjonsprosessen.

11.1 Resultater fra første resirkuleringssyklus

Fra første resirkuleringssyklus fremkommer det lite feil fra prøvene. En gjengående trend er mye stringing i prøvene.

- Det har blitt utviklet et system for resirkulering, klassifisering og sortering av printer avfall
- Det har blitt produsert nytt filament fra deler
- Det har blitt anskaffet testutstyr for resirkulering
- Det har blitt etablert en modell for sortering av råstoffer
- Det har blitt gjennomført en testproduksjon fra pellets
- Det har blitt produsert spoler med filament fra resirkulert plastikk
- Det har blitt utviklet parametere for resirkuleringsprosessen
- Det har blitt printet forskjellige prototyper uten uønskede hendelser
- Det har blitt utført varierte tester med resirkulert filament, og egenskapene har blitt testet sammenlignet med orginalt filament

11.1.1 Parametre for polymertørking

For å få en oversikt over parametere som er brukt i produksjonsprosessen har alle variablene blitt listet opp under. De originale parameterne for produksjonsprosessen er som følger.

Tabell 22: Originale parametere for Polymertørkeren

Parametere	Verdier
Vifte	17%
Varme	80°C
Rotasjon	10rpm
Tid	4 timer

Disse parameteren ble endret litt på siden polymere klumpet seg sammen, og dette gjorde det vanskelig å bruke materialet i produksjonsprosessen. Parameterne fra produksjonsprosessen er listet i tabellen under.

Tabell 23: Modifiserte parametere for polymertørkeren

Parametere	Verdier
Vifte	20%
Varme	55°C
Rotasjon	10rpm
Tid	4 timer

Fra prøveresultatene viser det seg at polymere burde tørkes ytterligere, men de brukte parametere gjør det mulig å produsere filament fra resirkulert PLA.

11.1.2 Parametre for ekstruderingsstemperatur

For selve ekstruderingsprosessen ble det først brukt de originale produksjonsparametere for PLA. Disse er listet opp under.

Tabell 24: Originale parametere for ekstruderings-maskinen

Parametere	Verdier
H4	170°C
H3	185°C
H2	190°C
H1	170°C
Ekstruderings skrue	4rpm
Target	1.75mm

Etter en liten prøveprosess ble parametere i produksjonsprosessen endret til verdiene i tabellen under. Dette ga mer konsekvente resultater. Her ble det også installert en vibrator i hopperen slik at polymere ble mer jevnt matet inn i ekstruderingsmaskinen.

Tabell 25: Modifiserte parametere for ekstruderings-maskinen

Parametere	Verdier
H4	175°C
H3	185°C
H2	190°C
H1	170°C
Ekstruderings skrue	4rpm
Target	1.75mm

Etter endringen i parametere og installasjonen av vibratoren ga dette gode resultater for første resirkuleringssyklus, og det var mulig å produsere en prototype med tilstrekkelige kvalitet.

11.1.3 Produksjonsparametere for resirkulering

For enkelhetsskyld har det blitt brukt standard innstillinger for PRUSA mk3 mini printeren. Disse innstillingene og parameterne er som følger.

Tabell 26: Optimale parametere for produksjon av PLA gjennom resirkuleringssyklusene

Ekstruderingsstemperatur	Temperatur
Nytt filament	210-215
rPLA etter en resirkuleringssyklus	210-215
rPLA etter to resirkuleringssyklus	210

Siden tykkelsen på filamentet ble for ustabil med ytterligere resirkulering ble antall resirkuleringssykluser kuttet etter tre.

11.1.4 Erfaringer fra resirkuleringsprosessen

Erfaringer som har blitt ervervet gjennom resirkuleringsprosessene er at dette er mer komplisert arbeide enn det først fremkommer som. Det har blitt oppdaget en rekke fallgruver gjennom prosjektet, og ikke alle er like åpenbare.

Den første fallgruven som ble oppdaget var hvor stor påvirkning filamentene hadde på resirkuleringsprosessen. Ved å blande polymer med forskjellige farger vil det resirkulerte filamentet få en mindre tilfredsstillende farge. Dette ble oppdaget under det første forsøket på å resirkulere PLA fra avfall på verkstedet.

Videre har det også blitt oppdaget at polymerproduksjonen kan skape en del avgasser som kan være farlige. Dette førte til at det ble kjøpt inn et avgass-skap når makerspacet ved siden av Additech ble oppløst. Hvis det skal produseres filament på et senere tidspunkt kan dette skje i avtrekksskapet.

Shreddet materiale har også en tendens til å klebe seg sammen før det når ekstruderingskruen. Etter at sikkerhetsgitteret til ekstruderingskruen ble fjernet, og en vibrator ble plassert i det shreddede polymere ble resultatene fra ekstruderingen mye jevnere.

Temperaturen i polymertørkeren var også høyere enn hva som var hensiktsmessig. Dette gjorde at det shredde polymere klebet seg sammen i tørkeprosessen, og skapte nok motstand inne i maskinen til at den stoppet ved flere ganger. Dette ble løst ved å senke tørketemperaturen til under glassifiseringstemperaturen. Dette gjorde at maskinen gikk smertefritt, men polymeret ble mer stringy som følge av dette.

12 Muligheter og utfordringer

I denne delen av rapporten har det blitt dokumentert muligheter og utfordringer rundt resirkulering av polymer.

12.1 Prototyping

3D printing er et ekstremt tilpasningsdyktig produksjonsverktøy, og en enkel modell for å verifisere funksjonene til objektet vil i mange tilfeller være en gunstig merverdi i produktutviklingsprosessen. Ved å produsere disse prototypene med rPLA el. vil det være et neglisjerbart utslipp assosiert med prototype produksjonen. Videre vil dette også være en garanti på at materiale er tilgjengelig, og produksjonsprosessen vil gå på en dag om alt funker som det skal.

Forsøkene har vist at det går an å bruke resirkulert materiale som produksjonsinnskudd i produksjon av prototyper. Det resirkulerte filamentet gir tilstrekkelig kvalitet opp til en resirkuleringssyklus og det vil være mulig å verifisere funksjoner og illustrere ideer med tilstrekkelig kvalitet. Dette kan muligens bli forbedret ved å bruke et blandingsforhold mellom rPLA og pellets. Her vil det være gunstig å utforske om blandingsforholdene TOMRA bruker også vil fungere i filamentproduksjonen.

12.2 Kostnadsbesparelser

Gjennom produksjon av filament fra produksjonsavfall og feilproduksjon vil det være muligheter for kostnadsbesparelser. Med produksjonsutstyret til Additech vil det være mulig å produsere filament fra granulat.

Fellestrekket for begge disse produksjonsmetodene er at det kreves en del produksjonsinnsats av timebruk fra personell. Avveiningen er da om det er mest fornuftig å kjøpe filament i markedet, eller produsere filament fra granulat. Dette skaper en vesentlig problemstilling der det bør undersøkes om egenprodusert filament gir mening fra et økonomisk ståsted, og hvor dyrt må filamentet være før det er fornuftig å produsere selv.

Videre skaper dette også et par utfordringer rundt LOT og BATCH nummer på filamentet. Hvis det skulle skje en kritisk feil når en del fra Additech er i drift vil det være vanskelig å kunne dokumentere hvor filamentet kommer fra. Dette vil også skape utfordringer der kunden må godta at filamentet som bli brukt er egenprodusert, og at ansvaret for denne produksjonen faller på Additech AS.

Her kan det også oppstå potensielle utfordringer rundt sertifisering, og produksjon av filament. Additech AS har per dags dato liten oversikt over kriterier til produksjonsprosessen, og hvilke kostnader som kommer av å kvalitetssikre denne prosessen.

12.3 Bærekraftig filamentproduksjon

Gjennom produksjonen av rPLA vil det oppstå et sirkulærøkonomisk løp i produksjonsprosessen. Dette illustreres veldig tydelig med at produksjonsresultatet fra prototypningen brukes som produktinnskudd i produksjon.

I likhet med kostnadsanalysene bør det gjøres en nullpunktsanalyse i forhold til klimagassutslippet og eksternaliteter fra produksjonen. Her bør det også bli gjort en vurdering på CO₂-utslipp assosiert med produksjonsmaskinene, og hvor mye filament som må resirkuleres før produksjonsprosessen totalt slipper ut mindre klimagasser enn kjøp fra en ekstern leverandør.

12.4 HMS for personell involvert i produksjon

PLA ble valgt i dette prosjektet siden det ikke er assosiert med gasser som kan være skadelig for personellet som opererer maskineriet. Det er derimot dokumentert at produksjon med filamenter som ASA er anbefalt å gjøre med tilstrekkelig avtrekk slik at det ikke kan forekomme noen form for senskader fra produksjonen.

Om det skal resirkuleres eller produseres filament fra noen form for andre materialer må det gjøres en utredning rundt avgasser og potensielle negative eksternaliteter som kan påvirke ansatte hos Additech AS.

12.5 Kvaliteten på filament

Materialeegenskapene til det produserte filamentet vil også være et viktig synspunkt i vurderingen av resirkulert filament. Som det fremkommer i rapporten vil det skje ting med produksjonsmaterialet som redusert flytegrense og redusert molekylærvækt. Selv om dette kun er dokumentert for PLA i denne rapporten vil dette høyst sannsynlig være gjeldende for andre materialer. For å undersøke dette må det gjennomføres tester og utredning av et teoretisk grunnlag for å kunne drive produksjon. Kritiske produksjonsfeil som følge av feil i materialproduksjonen vil trolig falle på Additech AS. Dette vil være en viktig vurdering i forsøk på resirkulering av høygrads polymerer som PEEK og PEKK.

For å kunne si noe om kvaliteten av filament som skal brukes i en produksjonsprosess er det også viktig å ha god oversikt over materialeegenskapene. Det bør derfor gjøres en grundig testing med et statistisk signifikant grunnlag for å kunne definere produksjonsegenskaper.

Filamentet som ble produsert gjennom resirkulering hadde også større avvik i diameteren. Dette kommer trolig fra varierende grad av foring inn til ekstruderingskruen under produksjon, og vil ha en innvirkning på kvaliteten.

For å kunne produsere resirkulert filament for bruk i produksjon, og ikke til enkel prototypning må det stilles strenge kvalitetskrav til produksjonsprosessen. Hensikten med dette er for å kunne garantere kvaliteten til produserte deler, og garantere for repeterbare resultater.

12.6 Mange feilkilder

I gjennomføringen av dette forsøket har det vært mange feilkilder som kan påvirke kvaliteten av resultatene. Resirkuleringssystemet står i samme rom som en annen printer som gir fra seg mye varme under bruk. Dette kan ha en påvirkning på resultatene.

Videre ble resirkuleringssystemet flyttet inn på det gamle makerspace, og det er mange andre maskiner som en båndsliper, et bor ol. Dette kan skape partikler i luften som påvirker resultatene til prøvene. Denne påvirkningen vil trolig være minimal, men blir tatt opp som en potensiell feilkilde for eventuelt senere arbeid.

Utstyret ble også brukt som «rotestasjon» av en ansatt, og dette kan ha tilført uønskede partikler ol. til prosessen. Denne påvirkningen vil trolig være minimal, men bør vektlegges om det skal produseres filament til industrielt bruk.

13 Prosessevaluering

I denne delen av rapporten vil det bli gjort en evaluering av gjennomføringen av prosjektet og utfordringer som har ført til flyt i milepæledatoer.

Prosjektet har vært preget av flere pågående prosesser i Additech AS, og en av de mest sentrale utfordringene rundt fremdrift har vært sertifiseringsprosessen med DNV. Arbeidet med DNV sertifiseringen knyttet til DNV-ST-B203 krevde mye tid, og dette prosjektet ble til tider satt på vent. DNV-ST-B203 ble vurdert til en kritisk prosess i forhold til Additech's strategiske utvikling. Videre ble det også satt av tid til å starte prosessen rundt ISO 9001:2015 sertifisering av bedriften. Dette er også en sentral del for Additech's videre utvikling, og flere kunder i markedet krever en ISO 9001 sertifisering for å kunne bruke Additech som en leverandør av deler.

Informasjonsflyt angående bruk av maskin, og planlegging av produksjonsprosesser har også vært en utfordring rundt produksjon av prøver. Så sent som de siste 30 dagene i prosjektet ble det tatt en avgjørelse om å endre produksjonsmaskineri for testene, etter at testingen hadde begynt. Mangel på planlegging i bedriften har ført til at produksjon til prosjektet har blitt satt på vent flere ganger, og har vært en utfordring i forhold til tester og analysing av produksjonsresultater. Dette har også ført til at prosjektet har fått iterasjoner rundt produksjonsutstyr, og dokumentasjon av produksjonsutstyr relativt sent i gjennomføringen av prosjektet.

Når det kommer til oppfyllingen av alle aktivitetsmålene har disse blitt oppfylt med unntak av A8. Makerspacen knyttet til prosjektet ble lagt ned i 2023, og aktiviteten knyttet til opplæring i bruk av resirkuleringssystemet utgår.

En oppsummering av fremdriften i prosjektet, og når aktivitetene i aktivitetsplanen er gjennomført er å finne i tabellen under.

Tabell 27: Oversikt over fremdrift i prosjektet

Aktivitetsplan	Dato for fullføring	Fullført
A1. Anskaffe testutstyr	Oktober – 2022	Oktober – 2022
A2. Etablere modell for sortering av restråstoff	Februar – 2023	Februar – 2023
A3. Testproduksjon av pelets	Juni – 2023	Mai – 2023
A4. Produsere den første spolen med filament fra resirkulert plastikk	Juni – 2023	Juni – 2023

Tabell 27 fortsetter

Aktivitetsplan	Dato for fullføring	Fullført
A5. Utvikle parametere (Temperatur, hastighet ect. For plast materiale) for det spesifikke materialet (hver enkelt rull med filament)	Juni – 2023	Juni – 2023
A6. Verifisere parametere ved å printe forskjellige prototyper og produkter uten uønskede hendelser	Juni - 2023	Juni – 2023
A7. Utføre varierte tester med det resirkulerte filamentet for å sammenligne egenskapene med originalt filament	Juli/August - 2023	August 2023
A8. Utføre opplæringsaktiviteter rettet mot brukere av Makerspace samt andre bedrifter som benytter FDM printing	August - 2023	Utgår som følge av at makerspacen er nedlagt

14 Videre arbeid

I dette kapitlet vil det bli utredet om anbefaling av videre arbeid som vil være relevant for kvalitetssikring av produksjon med resirkulert filament.

14.1 Testing av materialeegenskaper

For å kunne produsere filament til bruk i produksjon bør det utredes og testes hvordan resirkuleringsprosessen påvirker materialeegenskapene til filamentene som er relevante for produksjon. Her må det legges til rette for et tilstrekkelig antall tester, og den nedre kritiske verdien i fordelingen til disse verdiene kan brukes som en antatte verdier for materialkvalitet. En anbefalt fremgangsmåte for denne prosessen er dokumentert i Geir Terjesen sin bok «*Dimensjonsteknikk for ingeniører*». Her anbefales det å teste alle mekaniske egenskaper.

14.2 Kostnadsanalyse av resirkulert filament

Som tidligere nevnt bør det gjøres en grundig kostnadsvurdering av produksjonsprosessen, og hvordan dette ser ut. Her bør det gjøres en grundig analyse av bedriftens alternativkostnader, og ledig produksjonskapasitet.

Resultatene fra disse undersøkelsene bør brukes til å utrede en kostandsfunksjon for filamentproduksjonen der alle direkte og indirekte kostnader er inkludert sammen med anskaffelseskostnadene.

Videre bør det også gjøres en nåverdiundersøkelse for å se på hvordan kostnadsbesparelsene og kontantstrømbilde ser ut. Dette ble ikke gjort i anskaffelsen av maskineriet, og vil være en relevant faktor i beslutningen om videre resirkulering og intern produksjon av filament.

14.3 Utredning rundt flere typer polymer og materialer

For å kunne minimere avfall på produksjon, og implementere et sirkulærøkonomisk system i Additech anbefales det å teste flere typer polymer. Dette gjør at flere materialer kan resirkuleres, og en mer utbredt bruk av resirkulert materiale i produksjonen til Additech.

Ved utviding av antall polymer som resirkuleres anbefales det også å undersøke muligheten til å produsere filament fra granulat. Her bør det undersøkes muligheten til å produsere materialer som PEEK, PEKK og diverse filament som inneholder fiber. Disse materialene brukes mye, og vil potensielt være store kostnadsbesparelser for Additech.

15 Referanser

- [1] Parliament, E. (2023, 05 24). *Circular economy: Definition, importance and benefits* . Retrieved from News European Parliament : <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits>
- [2] Langli, John Christian. 2022, Fra bilag til bruk 2. utgave. Oslo. Gyldendal
- [3] PWC, EUs klassifiseringssystem for bærekraftige aktiviteter. <https://www.pwc.no/no/pwc-aktuelt/baerekraftsrapportering/taksonomien.html>
- [4] Truyen, Filip (11.10.2021) *Tileggsmandat – Nye regler om bærekraftsrapportering*. <https://www.regjeringen.no/contentassets/827e85ab40994aa6b66761732a4bbd7a/2021-11-10-tileggsmandat.pdf>
- [5] Kristiansen, Simen Kjøsnes (14.11.2022) EU parlamentet vedtar nytt direktiv om bærekraftsrapportering. Finans Norge. <https://www.finansnorge.no/artikler/2022/q4/eu-parlamentet-vedtar-nytt-direktiv-om-baerekraftsrapportering/>
- [6] UNCTAD, *Circular economy*, <https://unctad.org/topic/trade-and-environment/circular-economy>
- [7] Julius Baer Foundation, (09.06.2022) *The seven steps of a circular economy* <https://www.juliusbaer.com/en/insights/julius-baer-foundation/the-7-steps-of-a-circular-economy/>
- [8] Gendre, Ines (04.03.23) *Circular economy: Definition and principles* <https://greenly.earth/en-us/blog/company-guide/circular-economy-definition-and-principles>
- [9] King, Sarah. Locock, Katherine E.S (17.06.2022) *A Circular economy framework for plastics: A semi-systematic review* <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622021047>
- [10] Barreiro-gen, Maria. Lozano, Rodrigo. (16.06.2020) *How circular is the circular economy? Analysing the implementation of circular economy in organisations*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/bse.2590>
- [11] Kalmykova, Yuliya. Sadagopan, Madumita. Rosado, Leonardo. (17.05.2018) *Circular economy - From review of theories and practices to development of implementation tools*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917303701>

- [12] Corcellec, Hervé. Stowell, Alison F. Johansson, Nils. (17.08.2021) *Critiques of the circular economy*.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jiec.13187>
- [13] Sander, Kjetil. (04.02.2023) *DELPHI – metoden*
<https://estudie.no/delphi-metoden/>
- [14] Prieto-Sandoval, Vanessa. Ormazabal, Marta. Jaca, Carmen. Viles, Elisabeth (06.08.2018) *Key elements in assessing circular economy implementation in small and medium-sized enterprises*.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/bse.2210>
- [15] Hettiarachchi, Biman Darshana. Brandenburg, Marcus. Seuring, Stefan. *Connecting additive manufacturing to circular economy implementation strategies: Links, Contingencies and causal loops*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092552732200007X>
- [16] Dwivedi, Ashish. Muktadir, Md. Abdul. Jabbour, Charbel José Chiappetta, De Carvalho, Daniel Estima. (19.01.2022) *Integrating the circular economy and industry 4.0 for sustainable development: Implications for responsible footwear production in a big data-driven world*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040162521007666>
- [17] Bag, Surajit. Sahu, Atul Kumar. Kilbourn, Peter, Pisa, Noleen. Dhamija, Pavitra. Sahu, Anoop Kumar. *Modelling barriers of digital manufacturing in a circular economy for enhancing sustainability*.
<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/IJPPM-12-2020-0637/full/html>
- [18] Abin, Thomas. Mishra, Umakanta. (15.04.2022) *A sustainable circular economic supply chain system with waste minimization using 3D printing and emissions reduction in plastic reforming industry*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652622007600>
- [19] Enes, Ünal, Shao, Jing. (01.03.2019) *A taxonomy of circular economy implementation strategies for manufacturing firms: Analysis of 319 cradle-to-cradle products*
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618336941>
- [20] Tomra, *Rewarding recycling: Learning from the world's highest performing deposit return system*.
<https://circular-economy.tomra.com/resources/drs-white-paper>
- [21] Tomra (2021) *Annual report: Form into Transformation*
https://www.tomra.com/-/media/project/tomra/tomra/investor-relations/annual-reports/tomra-annual-report-2021_double-page.pdf

- [22] Gil, Karla García (14.05.2021) *Advantages and disadvantages of the circular economy*
<https://www.bbva.ch/en/news/advantages-and-disadvantages-of-the-circular-economy/>
- [23] Pommer, Alexander. Tranco, Amaia Iraeta. San Martin, Bixente Gonzalez. Breyer, Franz. Areizaga, Imanol Guerra. Gezalaga, Ion Etxezarreta. Zubia, Irati Abuaunz. Marquez, Josu Salazar. Vanlooveren, Leone. Fernandez, Oihane. (15.12.2017) *Benchmark analysis for circular economy hub 's*.
<https://circhubs.fi/wp-content/uploads/2018/01/Final-Report-for-REHA-CE.pdf>
- [24] Boshnjaku, Anila. Dafa, Juna. *Circular economy for a sustainable growth: Albanian case*.
<https://eprints.uklo.edu.mk/id/eprint/7727/1/cei%20proceedings.pdf#page=190>
- [25] Vildåsen, Sigurd (19.05.2022) *Hva er sirkulær økonomi?*
<https://blogg.sintef.no/vareproduksjon-nb/hva-er-sirkular-okonomi/>
- [26] Hessing, Ted. *Pugh Analysis*.
<https://sixsigmastudyguide.com/pugh-analysis/>
- [27] Hunt, D. V.: *Reengineering: Leveraging the Power of Integrated Product Development (Executive Breakthrough Series)*, Wight (Oliver) Publications Inc., Sacramento, California, USA, 1993, 256 s.
- [28] Magrab, Edward B: *Integrated Product and Process Design and Development: The Product Realization Process, Second Edition (Environmental & Energy Engineering)*, 2nd Edition, CRC Press, New York, USA, 2009, 304 s.
- [29] Eversheim, W.: *Innovation Management for Technical Products: Systematic and Integrated Product Development and Production Planning (RWTH-edition)*, 1st edition, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Tyskland, 2009, 444 s.
- [30] Simple PDH [internett]. (Oppdatert 07.05-15; Hentet 12 Mai 2022) *Principles of integrated product development*.
- [31] Serrat, Olivier (2017). *The SCAMPER technique*. Chicago School of professional psychology
- [32] Baxter, M: *Product Design (Design Toolkits)*, 2nd Reprint, CRC Press, (1995)/ Nelson Thorne Ltd, Cheltenham, United Kingdom, 2001, 308 s.
- [33] Varian, Hal R. (2014). *Intermediat microeconomics (Ninth edition)* W. W. Norton & Company, New York. 758 Sider.
- [34] Cowell, Frank. (2005) *Microeconomics principles and analysis*. Oxford university press, United Kingdom, 628 sider

- [35] William D. Callister, JR. David G. Rethwisch . (2015) Material Science and engineering (Ninth edition). John Wiley & Sons, Singapore 905 sider.
- [36] 3D4Makers “*Filament engineers*” Hentet: 24-08-2023.
<https://www.3d4makers.com/products/pla-filament>
- [37] AIChE “*The global home of chemical engineers*” Viscosity Basics: What every engineer should know. Hentet 24-08-2023
<https://www.aiche.org/resources/publications/cep/editorial-calendar/viscosity-basics-what-every-engineer-should-know>
- [38] MCP “*Amorphous vs. Crystalline polymers*” (10,07-2023) Hentet fra:
<https://www.mcpolymers.com/library/amorphous-vs-crystalline-polymers>
- [39] Substech “*Substances & Technologies*” Shore (Durometer) Hardness test. Hentet (24-08-23)
https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=shore_durometer_hardness_test
- [40] Simplify3D “*Filament Properties Table*” Hentet: (24/08/2023)
<https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/properties-table/>
- [41] Schyns, Zoé O. G. Shaver, Michael P (30.09.20) *Mechanical Recycling of packaging plastics: A review*
- [42] Babagowda, R.S Kadadevara Math. Goutham R, Srinivas Prasad K.R (2017) *Study of effects on mechanical properties of PLA filament which is blended with recycled PLA materials.*
- [43] STENA recycling (Hentet: 24-08-2023) *7 utfordringer ved gjenvinning av plast.*
<https://www.stenarecycling.com/no/nyheter-innsikt/insights--inspiration/veiledninger-artikler/7-utfordringer-ved-gjenvinning-av-plast/>
- [44] BEFORM (Hentet 24-08-2023) *Resirkulering*
<https://beform.no/baerekraft/resirkulering/>
- [45] Kubowicz, Stephan (14.10.2021) *Resirkulerer vi virkelig ikke alle typer plast, Sintef*
<https://blogg.sintef.no/sintefocean-nb/resirkulerer-vi-virkelig-ikke-alle-typer-plast/>
- [46] Plastics Europe *Enabling a sustainable future* (Hentet 24-08-2023) *Recycling technologies*
<https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/recycling/recycling-technologies/>
- [47] Vikan, Tor Erik (24.03.2022) *Gjenvinning av plast*
<https://www.tottem.no/gjenvinningsbloggen/gjenvinningavplast>

- [48] TWI Global (Hentet: 24-08-2023) *What is Mechanical recycling*
<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-mechanical-recycling#WhataretheStepsofMechanicalRecycling>
- [49] RTS (12.09.2020) *The complete Plastic recycling process*
<https://www.rts.com/blog/the-complete-plastics-recycling-process-rts/>
- [50] Shred-Tech (Hentet: 24/08/2023) *Plastic shredders for plastic recycling*
<https://shred-tech.com/plastic-shredder/>
- [51] Zhang, Fan. Wang, Fang. Wei, Xiangyue. Yang, Yang. Xu, Shimei. Deng, Dehui. Wang, Yu-Zhong. (04.03.2023) *From trash to treasure: Chemical recycling and upcycling of commodity plastic waste to fuels, high-valued chemicals and advanced materials.*
- [52] Circular Economy Asia (Hentet: 24/08-2023) *Mechanical recycling.*
 Hentet fra: <https://www.circulareconomyasia.org/mechanical-recycling/>
- [53] 2ea (30.01.2018) *Plastic – Resin Codes. What do they mean?*
 Hentet fra: <https://2ea.co.uk/plastics-resin-codes-what-do-they-mean/>
- [54] Jacobsen, Erica K. (2008) *A Novel, Simplified scheme for plastics identification*
- [55] Budin, Salina. Maideen, Normariah, Cge Maideen. (2019) *A comparison study on mechanical properties of virgin and recycled polylactic acid (PLA)*
- [56] Anderson, Isabelle (2017) *Mechanical properties of specimens 3D printed with Virgin and recycled polylactic acid*
- [57] Lanzottie, Antonio. Martorelli, Massimo. Maietta, Saverio. Gerbino, Salvatore. Penta, Francesco. Gloria, Antonio. (13.05.2019) *A Comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA.*
- [58] Gibson, Ian. Rosen, David. Stucker, Brent. Khorasani, Mahyar. (2021) *Additive manufacturing technologies (Third edition)* Springer. 675 sider
- [59] i Gao, Yunbo Zhang, Devarajan Ramanujan, Karthik Ramani, Yong Chen, Christopher B. Williams, Charlie C.L. Wang, Yung C. Shin, Song Zhang, Pablo D. Zavattieri,(2015) *The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering,*
- [60] Prusa Research *Original prusa mini+ kit* (Hentet: 24-08-2023)
 Hentet fra: <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-mini-kit-2/#features>

- [61] Prusa, Josef. (12.10.2019) *Original Prusa MINI is here: Smart and compact 3D printer for everyone!* Hentet fra: https://blog.prusa3d.com/original-prusa-mini-is-here-smart-and-compact-3d-printer_30887/
- [62] Hoffman, Tony (12.11.2020) *Original prusa mini: Great-quality objects from a small, open-framed 3D printer.* Hentet fra: <https://uk.pcmag.com/3d-printers/129929/original-prusa-mini>
- [64] Administrerende direktør Anders Helland, Additech AS
- [65] Komersiell direktør Kristoffer Eriksen, Additech AS
- [66] Additive Manufacturing Operator Malin Sagstad, Additech AS
- [67] PWC, (Hentet 24-08-2023) *Taksonomien.* Hentet fra: <https://www.pwc.no/no/pwc-aktuelt/baerekraftsrapportering/taksonomien.html>
- [68] Rahimi, AliReza. García, Jeannette M. (2017) *Chemical recycling of waste plastics for new materials production.*
- [69] 3Devo, (Hentet 24-08-2023) *Research you own 3D printing materials.* Hentet fra: <https://www.3devo.com/>
- [70] ReDeTec (Hentet 28.08.2023). Hentet fra: <https://redetec.com/>
- [71] Filafab (Hentet 28.08.2023) Hentet fra: <https://www.filafab.co.uk/>
- [72] Alibaba (Hentet 25.08.2023) *FLD-45A 3D printing filament extruder machine.* Hentet fra: https://www.alibaba.com/product-detail/FLD-45A-3D-printing-filament-extruder_62106168587.html
- [73] Filabot (Hentet 25.08.2023) Hentet fra: <https://www.filabot.com/>
- [74] Felfil (Hentet: 25.08.2023) Hentet fra: <https://felfil.com/full-extrusion-system/?v=5ea34fa833a1>
- [75] 3Devo (Hentet fra: 25.08.2023) *3Devo shop.* Hentet fra: <https://www.3devo.com/shop>
- [76] 3Devo (Hentet fra: 25.08.2023) *GP20 Plastic Shredder Hybrid.*
Hentet fra: <https://www.3devo.com/gp20-plastic-shredder>
- [77] #3Dbenchy (Hentet: 25.08.2023) *Features.*
Hentet fra <https://www.3dbenchy.com/features/>
- [78] All3Dp (Hentet: 25.08.2023) *TempTower Cura Tutorial.* Hentet fra: <https://all3dp.com/2/temp-tower-cura-tutorial/>
- [79] Thingiverse (Hentet 25.08.2023) *All in one 3D printer test.*

- Hentet fra: <https://www.thingiverse.com/thing:2656594>
- [80] Thingiverse (Hentet 25.08.2023) Ultimate torture test.
Hentet fra: <https://www.thingiverse.com/thing:3158705>
- [81] Galiki, Ofir. Kondo, Hironori. Wilson, Zachary. (08.04.2023) *3D printing Tolerances: How to test & improve them*. Hentet fra:
<https://www.printables.com/model/116911-clearance-tolerance-test>
- [82] *Printables by Josef Prusa* (Hentet: 25.08.2023) *Clearance tolerance test*.
Hentet fra: <https://all3dp.com/2/3d-printing-tolerances-test-fdm/>