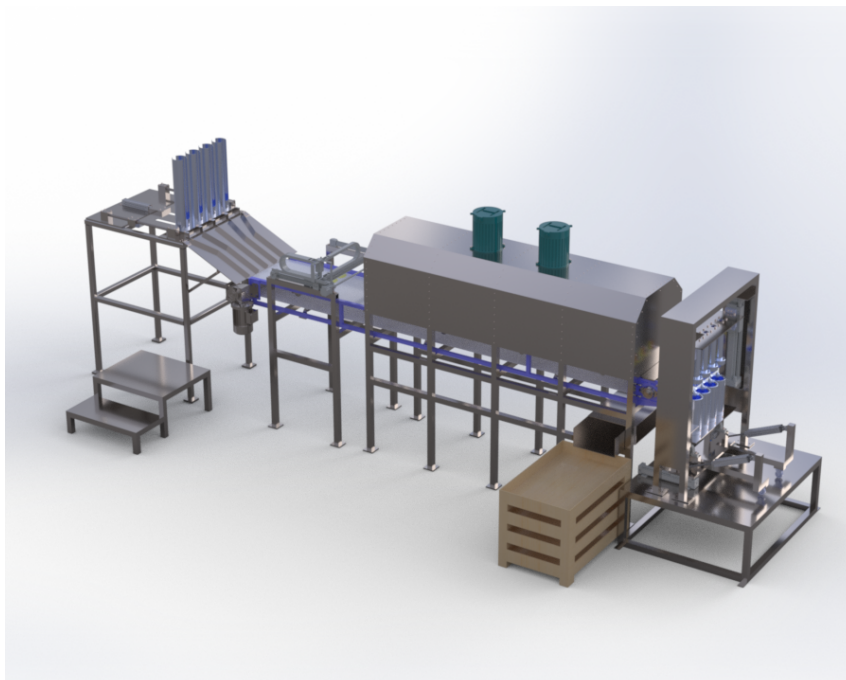


Andrea Gløtheim
Daniel Hystad
Jørgen Ninive Pettersen

Prosessutvikling og automatisering av silica-phenolic forpressemaskin

I samarbeid med Nammo Raufoss AS

Bacheloroppgave i ingeniørfag - maskin
Veileder: Stergios Goutianos
Mai 2024



Andrea Gløtheim
Daniel Hystad
Jørgen Ninive Pettersen

Prosessutvikling og automatisering av silica-phenolic forpressemaskin

I samarbeid med Nammo Raufoss AS

Bacheloroppgave i ingeniørfag - maskin
Veileder: Stergios Goutianos
Mai 2024

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for vareproduksjon og byggingsteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Oppgavens tittel: «Prosessutvikling og automatisering av silica-phenolic forpressemaskin»	Dato: 21.05.2024		
	Antall sider: 77 (87)		
Gradering: Åpen	Masteroppgave:	Bacheloroppgave	X
Navn: Andrea Gløtheim, Daniel Hystad og Jørgen Ninive Pettersen			
Veileder fra NTNU: Stergios Goutianos			
Eksterne faglige kontakter/veiledere: Magne Koren og Dag Ottar Huseby (Nammo Raufoss AS)			

Sammendrag:

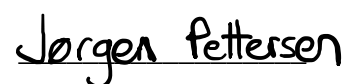
Det er utviklet et løsningsforslag for automatisering av en produksjonsprosess hos Nammo Raufoss AS, som omfatter pressing av silica-phenolic rondeller. I løpet av prosessen er det benyttet relevant faglitteratur og designmetodikk, i tillegg til simuleringer, analyser og dataassistert konstruksjon. Det er også gjennomført beregninger angående materialeegenskaper for silica-phenolic rondeller, samt utført fysiske tester og prototyping for å validere resultatene underveis. Den automatiserte produksjonsprosessen muliggjør økt effektivitet, kontinuitet og produktkvalitet, basert på et solid design og funn av gode prosessparametere, inkludert temperatur, holdetid og pressekraft. Prosessen involverer utmating fra magasin, orientering av rondell, oppvarming, mekanisk pressing og til slutt utmating av det ferdige produktet. Løsningsforslaget gir et solid utgangspunkt og legger til rette for videre utvikling. Gruppen har stor tillit til at løsningsforslaget vil bidra svært positivt til utviklingen av den automatiserte forpressemaskinen.

Stikkord:

- Prosessutvikling
- Automatisering
- Silica-phenolic
- Oppvarming
- Pressing



(sign.)

Forord

Det er med stor glede og en følelse av stolthet at vi presenterer denne bacheloroppgaven som representerer avslutningen på vår treårige utdanning, maskiningeniør, ved NTNU Gjøvik. Denne oppgaven representerer ikke bare et akademisk krav, men også et resultat av dedikasjon, hardt arbeid og samarbeid våren 2024.

Vi, Andrea, Daniel og Jørgen, har gått sammen som et team gjennom dette prosjektet med oppgaven angående prosessutvikling og automatisering av en silica-phenolic forpressemaskin. Vår interesse for oppgaven har vært drevet av et ønske om å utvide faglig kunnskap og utforske mulighetene innenfor prosessutvikling, simulering og konstruksjon.

Vi vil gjerne rette en hjertelig takk til alle våre trofaste medhjelpere og veiledere. En spesiell takk sendes til professor Stergios Goutianos fra NTNU for sin inspirerende veiledning og tilstedeværelse. Gruppen setter stor pris på alle samtaler, møter og de konstruktive tilbakemeldingene underveis i prosjektet. Vi ønsker også å sende en stor takk til Magne Koren og Dag Ottar Huseby fra Nammo Raufoss AS for deres verdifulle veiledning og støtte gjennom hele oppgaven. Deres innsikt, erfaring og ekspertise har vært svært nyttig under alle faglige diskusjoner og ikke minst for fremdriften av denne oppgaven.

Gjennom dette prosjektet har vi ikke bare utvidet vår faglige kompetanse, men også styrket vårt samarbeid og problemløsningsferdigheter. Det har vært en ekstrem lærerik prosess å jobbe med denne oppgaven, og vi håper at løsningsforslaget vil være til nytte og inspirerende for Nammo Raufoss AS og deres utvikling av produksjonsprosesser. Vi ser virkelig frem til å se hvordan prosjektet vårt vil påvirke fremtidens automatiserte forpressemaskin.

Abstract

Purpose

Nammo Raufoss AS has multiple production processes that require continuous improvement and maintenance. One of the processes contains pressing a composite disc using layup method, including heating, and pressing. The component is done when 180 discs are pressed together, and this result is referred to as a composite “tower”. Currently, this pre-pressing procedure is manual, requiring one or two operators.

Manual pre-pressing is time and resource consuming, leading to variations in layup, temperature and pressing force. Nammo wants a proposed solution to automate this work process, along with defining the relevant process parameters. The automated machine should be operable by a maximum of one person, and there should be no need for continuously surveillance and work. Hence the objective is formulated as follows:

“Construct a proposed solution of an automated production process for pre-pressing of silica-phenolic discs. The automated process should have predetermined process parameters, increase production speed, and maintain consistent product quality and continuity.”

Method

The assignment's scope revolves around effectively addressing the objective statement. This primarily involves identifying good process parameters and subsequently devising a proposed solution for the production process. Establishing optimal process parameters and a sound design necessitates thorough utilization of scientific theory, conducting tests, analyses, simulations, and mathematical calculations, as well as computer-aided design and construction. Therefore, the project objective is to create a computer-aided design for a proposed solution for the automated pre-press machine. This involves documenting various choices, methods, simulations, and calculations, which will be delivered to the client upon project completion.

Conclusion

The group has collectively arrived a proposed solution for an automated production process, achieving significant progress in terms of increased efficiency, quality, and continuity. By

integrating relevant literature, design methodology, simulations, analyses, and computer-aided construction, an automated production process has been developed, enabling significant streamlining and improvement. Through the execution of calculations, physical tests, and prototyping, we have validated our findings of good process parameters, including a required pressing force of approximately 70N per disc and a heating temperature of 120°C with a holding time of 5 minutes. These process parameters and the automated process thus form the basis for increased efficiency in the process with good quality and continuity in the product. The report provides a comprehensive understanding of various choices, methods, and designs, along with their strengths and weaknesses, as well as recommendations for further work. By reading Chapter 5.3, the client can see deeper into the group recommendations for further investigation or ongoing work. The group have great confidence that the proposed solution will contribute positively towards the automated pre-pressing machine.

Innholdsfortegnelse

Forord	iii
Abstract	iv
Innholdsfortegnelse	vi
Figurliste.....	viii
Tabelliste	x
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	1
1.3 Omfang og avgrensninger	2
1.4 Kravspesifikasjoner	3
1.5 Informasjonssøk og metoder	5
1.6 Disposisjon og rapportstruktur	5
2 Teoretisk grunnlag.....	6
2.1 Silica-phenolic kompositt.....	6
2.2 Design og idémyldring	7
2.3 Programvarer	7
2.3.1 SolidWorks.....	8
2.3.2 Abaqus.....	8
2.4 Varmeroverføringsanalyse.....	10
2.5 Beregninger	11
3 Metode.....	17
3.1 Valg av prosessparametere	17
3.1.1 Beregning av materialeegenskaper	17
3.1.2 Fysisk test: Oppvarming av rondeller i ovn	21
3.1.3 Simuleringer i Abaqus.....	26
3.2 Konstruksjon	37
3.2.1 Idémyldring	37
3.2.2 Vurderingsmatrise og konseptutvalg.....	40
3.2.3 Helse, miljø og sikkerhet (HMS)	42
3.2.4 Bærekraft og materialvalg.....	43

3.2.5	Innmater	43
3.2.6	Orienteringsmodul.....	46
3.2.7	Ovn.....	47
3.2.8	Mekanisk presse	50
3.2.9	Utmater.....	51
3.2.10	Importerte deler fra Internett	52
4	Sluttresultat.....	54
4.1	Hele maskinen	54
4.2	Delprosesser	55
4.2.1	Innmater	55
4.2.2	Orienteringsmodul.....	57
4.2.3	Ovn.....	59
4.2.4	Mekanisk presse	62
4.2.5	Utmater.....	63
4.3	Prosessrekkefølge på maskin	64
5	Diskusjon og analyse av resultater	67
5.1	Diskusjon av delresultater	67
5.2	Diskusjon av sluttresultat	68
5.3	Anbefalinger for videre arbeid	70
6	Konklusjon	72
7	Litteraturliste	73

Figurliste

<i>Figur 1 Visualisering av manuell forpressing, Ø100mm rondeller</i>	1
<i>Figur 2 Visualisering av en rondell i komposittmateriale, Ø100mm</i>	3
<i>Figur 3 Tre typer vevinger (Shadanov, 2022)</i>	7
<i>Figur 4 Inndeling av oppbygningsmoduler i Abaqus</i>	8
<i>Figur 5 Forskjellige typer varmeoverføring (Simscale, 2023)</i>	10
<i>Figur 6 Nødvendig materialdata for å legge inn elastisk oppførsel til materiale i Abaqus</i>	12
<i>Figur 7 Elastisitetmodul</i>	12
<i>Figur 8 Skjærmodul</i>	13
<i>Figur 9 Poisson rate (Geeksforgeeks, 2024) (Engineersedge, u.d.)</i>	14
<i>Figur 10 Lamina og laminat (Bezzie, et al., 2021)</i>	16
<i>Figur 11 Flytskjema for materialberegninger</i>	18
<i>Figur 12 Symbolbetydning flytskjema</i>	18
<i>Figur 13 Ferdige materialegenskaper som input til simulering i Abaqus</i>	21
<i>Figur 14 Legge rondell inn og ut av ovn</i>	23
<i>Figur 15 Temperaturmåling med IR-termometer</i>	23
<i>Figur 16 Testverktøy benyttet for å presse rondeller til 45° vinkel</i>	24
<i>Figur 17 Brettet rondell etter oppvarmingstest</i>	24
<i>Figur 18 Resultat fra heat transfer analysis, 120°C, 4 minutter [°C]</i>	28
<i>Figur 19 Resultat fra heat transfer analysis, 120°C, 5 minutter [°C]</i>	30
<i>Figur 20 Visualisering av nedbøying og lukkefunksjon etter oppvarming</i>	32
<i>Figur 21 Visualisering av «smooth step» innstilling på amplituden til forflytning av verktøy</i> 33	
<i>Figur 22 Plot av kinetic energy / strain energy. x-akse: sekunder, y-akse: prosent</i>	34
<i>Figur 23 Resulterende pressekraft presentert med rådata og behandlet graf. x-akse: sekunder, y-akse: Newton</i>	34
<i>Figur 24 Konturplott av bunn på kuttene ved 60% nedbøying</i>	35
<i>Figur 25 Konturplott av bunn på kuttene ved 65% nedbøying</i>	35
<i>Figur 26 Resulterende pressekraft ved 60% nedbøying. x-akse: sekunder, y-akse: Newton</i> ... 36	
<i>Figur 27 Trommel for innmater</i>	37
<i>Figur 28 Slippemekanisme for innmater</i>	38
<i>Figur 29 Varmepistol for oppvarming</i>	38
<i>Figur 30 Ovn for oppvarming</i>	39
<i>Figur 31 Vertikal ovn for oppvarming</i>	39
<i>Figur 32 Utskytning med luft for å få rondeller ut av verktøy</i>	40
<i>Figur 33 Prototype av utskyver, 3D-printet</i>	44
<i>Figur 34 CAD-sammenstilling av utskyver</i>	44
<i>Figur 35 Prototypetest av skyvemekanisme</i>	45
<i>Figur 36 Skisse av plate med innsnevring av rondeller</i>	46
<i>Figur 37 Orientering av rondeller</i>	47
<i>Figur 38 Visualisering av hva som simuleres i varmeanalysen av isolasjon i ovn</i>	48

<i>Figur 39 Resultat fra varmestrømsanalyse av vegg i ovn [°C]</i>	<i>49</i>
<i>Figur 40 Resultat fra statisk analyse for rammeverk under belastning</i>	<i>50</i>
<i>Figur 41 Hele maskinen, behandlet med visualiseringsverktøy i SolidWorks</i>	<i>54</i>
<i>Figur 42 Innmater foran og bak.....</i>	<i>55</i>
<i>Figur 43 Bilder av innmateren.....</i>	<i>56</i>
<i>Figur 44 Innmateren med hoveddeler</i>	<i>56</i>
<i>Figur 45 Orienteringsmodul før ovn.....</i>	<i>57</i>
<i>Figur 46 Griper med rotasjon og kamera for avlesning</i>	<i>58</i>
<i>Figur 47 Utsnitt av griper med fjæringsmekanisme.....</i>	<i>58</i>
<i>Figur 48 Ovn, transportbånd og diverse utstyr.....</i>	<i>59</i>
<i>Figur 49 Ovn og vifter isolert sett</i>	<i>59</i>
<i>Figur 50 Utsnitt av ovn med varmeelementer og vifter</i>	<i>60</i>
<i>Figur 51 Slutten på ovn med sensorer og vippemekanisme</i>	<i>61</i>
<i>Figur 52 Mekanisk presse behandlet med visualiseringsverktøy.....</i>	<i>62</i>
<i>Figur 53 Mekanisk presse med tilhørende utstyr</i>	<i>62</i>
<i>Figur 54 Nærmere bilder av mekanisk presse</i>	<i>63</i>
<i>Figur 55 Vippemekanisme for pressing og utskytning</i>	<i>63</i>
<i>Figur 56 Utsnitt av posisjon for utmating</i>	<i>64</i>
<i>Figur 57 Hele maskinen med referanseperson på 180cm.....</i>	<i>66</i>

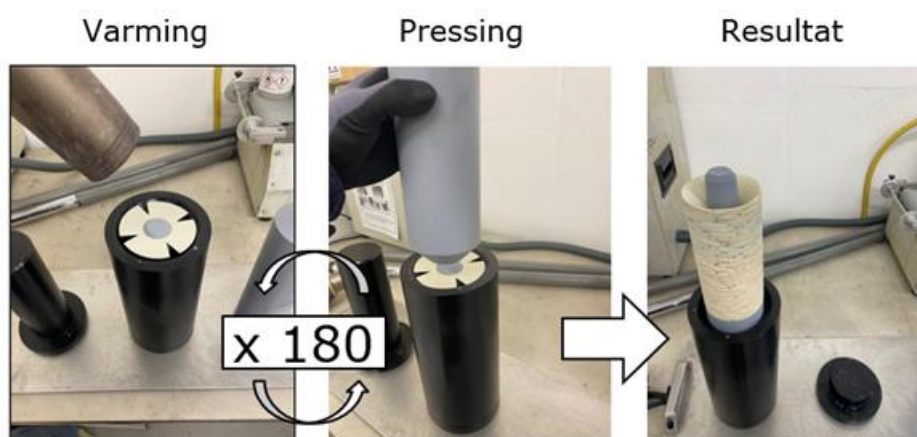
Tabelliste

Tabell 1: Tallverdier for herdet materiale	15
Tabell 2: Tallverdier for uherdet materiale	15
Tabell 3: Input og output fra ESP-kalkulator for herdet kompositt	19
Tabell 4: Input og output fra ESP-kalkulator for uherdet kompositt	20
Tabell 5: Resultater fra oppvarming av rondeller i ovn	25
Tabell 6: Testresultat for å verifisere analysen fra figur 18	29
Tabell 7: Testresultater for å verifisere varmeoverføringsanalyse.....	30
Tabell 8: Vurderingsskala for vurderingsmatrise	41
Tabell 9: Vurderingsmatrise for konsepter.....	41
Tabell 10: Tilleggs kommentarer ved mulige konsepter.....	42

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Nammo Raufoss AS har røtter helt tilbake til 1896 og har siden den gang spesialisert seg på produksjon av blant annet ammunisjon, rakettmotorer og romfartsteknologi (Nammo AS, 2024). I produksjonslokalene inngår flere prosesser som skal forbedres og opprettholdes kontinuerlig. En av prosessene innebærer pressing av kompositt der rondeller legges opp enkeltvis, varmes opp og deretter presses. Kompositten er ferdig når 180 rondeller er presset sammen, og dette resultatet omtales videre som et «tårn». I dag er forpressingen en manuell prosess som må utføres av én eller to operatører. Prosessparametere som oppvarmingstemperatur, holdetid eller pressekraft er ikke fastsatt og kan variere.



Figur 1 Visualisering av manuell forpressing, Ø100mm rondeller

1.2 Problemstilling

Manuell forpressing av én rondell innebærer oppvarming og pressing med håndkraft. Prosessen er tidkrevende, ressurskrevende og fører til variasjon i både opplegging, temperatur og pressekraft. Nammo ønsker et løsningsforslag til en automatisering av denne arbeidsprosessen. Gruppen ønsker i tillegg å finne gode prosessparametere. Den automatiserte

maskinen skal betjenes av maks en operatør, og det skal ikke være et behov for kontinuerlig overvåkning og arbeid.

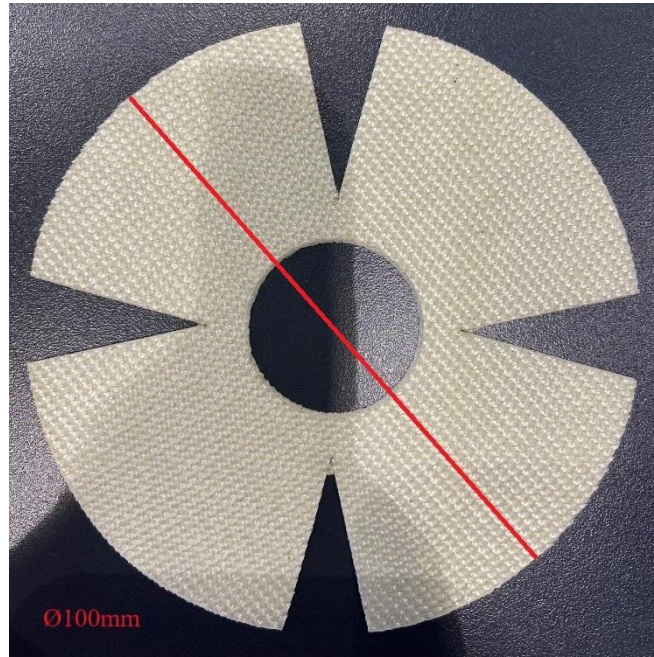
Derav formuleres problemstillingen nedenfor:

«Konstruer et løsningsforslag av en automatisert produksjonsprosess til forpressing av silica-phenolic rondeller. Den automatiserte maskinen skal ha forhåndsbestemte prosessparametere, øke produksjonshastigheten og gi god kontinuitet og kvalitet på produktet.»

1.3 Omfang og avgrensninger

Opgavens omfang innebærer å besvare problemstillingen på en god måte. Det innebærer først og fremst å finne gode prosessparametere og deretter konstruere et løsningsforslag til produksjonsprosessen. Å finne gode prosessparametere og en god konstruksjon krever blant annet flittig bruk av vitenskapelig teori, gjennomføring av tester, analyser, simuleringer og matematiske beregninger, samt dataassistert design og konstruksjon. Prosjekt målet er derfor et løsningsforslag av en dataassistert konstruksjon for den automatiserte forpressemaskinen, der ulike valg, metoder, simuleringer og beregninger dokumenteres og leveres til oppdragsgiver ved endt prosjekt.

Materialet i oppgaven er en kompositt bestående av silica-fiber og en phenolic-matriks. Materialet er fastsatt og kan ikke endres eller tilpasses. Rondellene finnes i ulik geometri og volumfraksjonen mellom matriks og fiber kan variere. Oppgaven er avgrenset til å fokusere på en spesifikk type rondell med bestemt sammensetning og materialeegenskaper. Samtidig ønsker gruppen å ta hensyn til at andre typer rondeller også kan benyttes i samme maskin, og at dette blir tatt hensyn til under konstruksjon. Det vil si at konstruksjonen konstrueres modulært slik at den enkelt kan tilpasses forskjellige type rondeller.



Figur 2 Visualisering av en rondell i komposittmateriale, Ø100mm

I den dataassisterte konstruksjonen legges det kun vekt på den mekaniske delen av konstruksjonen. Det legges ikke stor vekt på hvordan det elektriske anlegget vil forekomme, men det vil bli importert elektriske komponenter for å vise hvordan det kan se ut. De elektriske komponentene er likevel reelle produkter lastet ned fra nettet og fra utstysleverandører, og kan derfor teoretisk benyttes. Det vil kreve ingeniører med bakgrunn fra elektronikk, automasjon, signalbehandling og programmering før løsningsforslaget vil være fullstendig operativt. Derfor vil det ikke bli laget 2D-tegninger av konstruksjonen da dette er en omfattende jobb og kanskje må tilpasses når maskinen skal lages i virkeligheten.

1.4 Kravspesifikasjoner

Kravspesifikasjoner til bacheloroppgaven er laget i samarbeid med prosjektgiver Nammo Raufoss AS. Innholdet beskriver hvilke krav og spesifikasjoner gruppen må ta hensyn til og forsøke å tilfredsstille i løpet av prosjektet. Det skilles mellom hvilke krav som kommer direkte fra oppdragsgiver og hvilke krav gruppen selv har bestemt.

Krav fra ekstern oppdragsgiver

Prosesen skal være mest mulig automatisk, med operatør kun til på- og ut-lastning av produkt. Det er et mål om færrest mulig operatører, så derfor ønskes maks 1 operatør til å betjene maskinen. Det er også ønsket at denne operatøren teoretisk skal kunne operere med innsyn på maskinen kun en gang i timen. Det vil si at maskinen skal kunne fungere minimum 1 time uten ekstern handling.

Det må integreres oppvarming av rondellene i løpet av prosessen før de skal presses sammen. Dette må gjøres for å oppnå nødvendig formbarhet. Rondellene skal kunne stables med en rotasjon/orientering i forhold til hverandre slik at kuttene ikke overlapper hverandre i det sammenpressede tårnet.

Gruppens egne mål og krav

Prosesen skal sørge for bedre kontinuitet og kvalitet på produktet. Det vil si at alle tårn skal være så like som mulig og sannsynligheten for avvik skal vurderes som veldig lav. Eksempler på potensielle feil gruppen skal kunne kontrollere er vinkelorientering, pressekraft, oppvarmingstemperatur og holdetid på ovn. Parameterne burde være loggbare for å dokumentere produksjonsprosessen.

Generelt: Maskinen skal plasseres i produksjonslokalet og derfor er det ønsket å bruke så lite gulvareal så mulig, men det skal samtidig være enkelt å betjene og vedlikeholde maskinen. For å tallfeste dette kravet settes 8 m^2 som et fornuftig mål. Det skal også være mulig å endre geometri/type rondell enkelt i konseptet, som for eksempel å endre nedbøyingsvinkel fra 45 grader til 80 grader.

Økonomi: Det er ikke satt et øvre pristak på konstruksjonen, men det skal velges smarte, effektive og rimelige designløsninger. Underveis i planlegging og konstruksjonen skal det velges riktige materialer til sitt bruk. Det er for eksempel ikke nødvendig med rustfritt stål, så et vanlig konstruksjonsstål er naturlig å velge for rammeverk og generelle deler.

Syklustid: Den manuelle prosessen tar omtrent 40 minutter per tårn. Et ferdig tårn består av 180 rondeller sammenpresset lagvis. For å møte fremtidens behov bør den automatiserte maskinen ha en syklustid på maks 15 minutter per tårn. Oppstartstiden på maskinen, med blant annet forvarming av ovn og klargjøring er ikke med i de 15 minuttene.

HMS: Maskinen skal plasseres i produksjonslokale med høy forbigående trafikk av både personer og materiell. For å ta hensyn til HMS må gruppen selv vurdere om det er behov for bur eller gitter rundt maskin som sikkerhet. Det viktigste er at det vurderes som trygt for operatører å operere og oppholde seg rundt maskinen.

1.5 Informasjonssøk og metoder

I løpet av oppgaven må det gjennomføres diverse informasjonssøk der det er nødvendig å lese faglitteratur om blant annet kompositt og produksjonsmetoder. Litteraturen vil stamme fra det åpne Internett, men også interne dokumenter fra ekstern bedrift. I løpet av prosjektet er gruppen nødt til å være kildekritiske og informasjonen som er funnet må bli kvalitetssikret. For å kvalitetssikre blir det blant annet holdt jevne møter med veileder fra NTNU og fagpersoner fra ekstern bedrift, Nammo Raufoss AS. Det vil også bli hentet informasjon fra tidligere bachelor- og masteroppgaver for å øke kompetansen og kvalitetssikre teori, metoder og resultater.

1.6 Disposisjon og rapportstruktur

Bachelorrapporten er satt opp etter standardmal gitt av NTNU og den følger IMROD-strukturen. Det vil si at rapporten grovt sett er delt inn i innledning, metode, resultater og til slutt en diskusjonsdel. IMROD-strukturen sier ingenting om hvordan teoretisk grunnlag presenteres, men dette er satt opp som et eget kapittel rett etter innledningen.

Omfanget av oppgaven er stort, så derfor valgte gruppen å dele opp oppgaven i delresultater og sluttresultater for å unngå forvirring. Resultater fra simuleringer, tester og analyser presenteres som delresultater underveis i kapittelet «Metode», da disse må benyttes videre i kapittelet. Sluttproduktet er løsningsforslaget til den automatiserte forpressemaskinen og det presenteres til slutt under kapittelet «Sluttresultat».

2 Teoretisk grunnlag

2.1 Silica-phenolic komposit

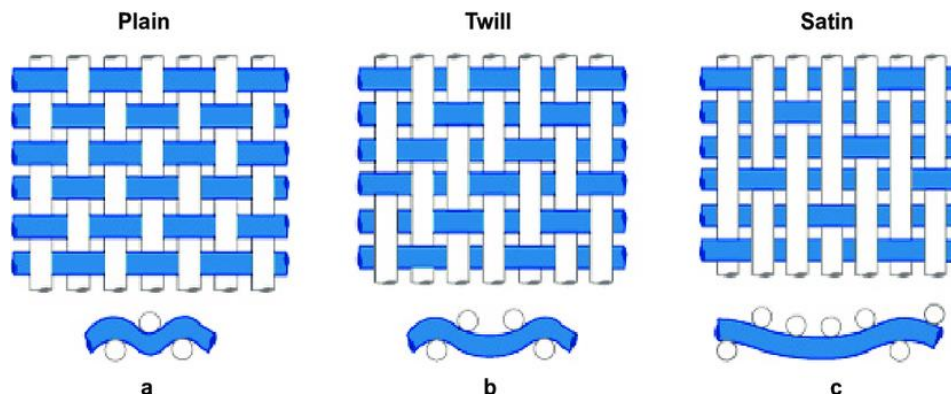
En komposit er et materiale som består av to eller flere ulike materialer. Materialdelene i en komposit deles ofte inn i matriks og forsterkning. Matriksen kan være en type plast og er til stede for å holde fibrene sammen, fordele spenning og beskytte fibrene (Hull & Clyne, 1996). Et eksempel på en forsterkning er fibre og de kan bidra med å bære last, bidra med styrke, forbedre termiske egenskaper og kontrollere sprekke-dannelser (Hull & Clyne, 1996).

Kompositten som benyttes i denne bacheloroppgaven er silica-phenolic. Denne typen komposit er blant annet kjent for å benyttes i systemer som utsettes for høye temperaturer. En silica-phenolic komposit består av silica-fiber og en phenolic-resin. Phenolic resin er kjent for å ha høy flytegrense under forkulling, lav brennbarhet, termisk og dimensjonal stabilitet og gode termiske isolasjonsegenskaper (J, et al., 2022). Silica-fibre er kjent for å ha høy mekanisk styrke mot strekk og bøyning og er relativt kjemisk stabil (Paschotta, 2008).

Fra ekstern leverandør kan kompositmaterialer komme til produksjonsavdelingen i form av en lang duk på en rull. Denne duken blir ofte omtalt som et pre-preg av materialet. Pre-preg betyr at duken er laget med «pre-impregnerte» fibre og en delvis herdet polymermatriks (Hull & Clyne, 1996). Matriksen er delvis herdet slik at den blir lettere å håndtere under diverse produksjonsprosesser (Hull & Clyne, 1996). Pre-pregs bør oppbevares på avkjølte rom på grunn av deres evne til å polymerisere (herde) over tid ved varmere temperaturer (Hull & Clyne, 1996). I dette prosjektet brukes en pre-preg-duk som består av silica fibre og phenolic resin. Duken kan rulles ut og skjæres av for eksempel en CNC-styrt skjæremaskin for å oppnå ønsket geometri.

Rondellene kan komme i ulike typer vevinger, som for eksempel plain-weave, 2/1 twill-weave og 8/1 satin-weave. Plain-weave, også kjent som enkel-vev, følger et rettvisklet mønster hvor fibertrådene passerer over én tråd og under én tråd på motsatt side. Dette resulterer i et rektangulært mønster av fibrene. 2/1 twill-weave, også kjent som 2/1 tvill-vev, refererer til en veving hvor fibertrådene passerer over to tråder og under én tråd på motsatt

side. Dette resulterer i et diagonalt mønster av fibre. 8/1 satin-weave, også kjent som 8/1 satengjev, følger et bestemt mønster hvor hver fibertråd passerer over sju tråder og under en tråd på motsatt side. Dette resulterer i glatte og flate overflater. Ulike typer vevinger av fibre gir ulike mekaniske egenskaper. (Shamsuyeva, et al., 2019) De tre ulike vevingene illustreres i figuren nedenfor.



Figur 3 Tre typer vevinger (Shadanov, 2022)

2.2 Design og idémyldring

Idémyldring inspirerer til kreativitet og løsninger for problemstillinger. Gjennom idémyldring kan idéer sammenliknes, diskuteres, vurderes, elimineres, kombineres og gi inspirasjon til nye idéer. Denne måten å jobbe seg frem til et produkt på kalles designmetodikk. Som en del av designprosessen og idémyldringen kan en vurderingsmatrise brukes for systematisk evaluering av idéene. Dette sikrer at vurderingen av ulike konsepter utføres på en metodisk måte, og hjelper med å identifisere de beste løsningene.

2.3 Programvarer

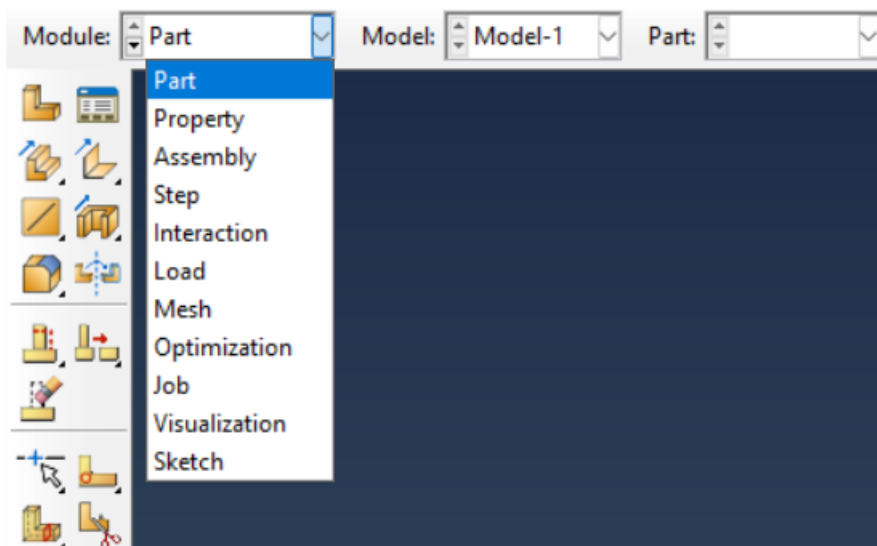
I dette delkapittelet presenteres hvilke programmer som blir benyttet i bacheloroppgaven. Formålet med denne presentasjonen er å gi et innblikk i hvordan programvaren er bygd opp og hvilke parametere eller moduler som benyttes. De to programmene som presenteres er SolidWorks og Abaqus.

2.3.1 SolidWorks

SolidWorks er et 3D CAD (Computer-Aided Design)-program utviklet av «Dassault systèmes». I programmet tilbys det en rekke verktøy for tegning og sammenstilling, samt modellering og simulering av mekaniske systemer. Dette gjør det mulig å designe og konstruere komplekse mekaniske deler med presisjon. I programmet er det mulig å importere eksterne tegninger og modeller, så ved konstruering av større prosjekter kan det brukes standarddeler som skruer, muttere og lagere uten å måtte tegne de på egenhånd.

2.3.2 Abaqus

Abaqus er et simuleringsprogram som bruker elementmetoden (Finite Element Analysis) til beregninger. Komponentene deles opp i et definert antall mindre elementer, og programmet regner ut verdier for alle «disse små delene». Programmet kan simulere de fleste påkjenninger som kan oppstå eller påføres en gitt komponent. Dette innebærer blant annet temperatur, forflytning, strekk, trykk og konsentrerte krefter. Programmet er bygd av forskjellige moduler som presenteres nedenfor.



Figur 4 Inndeling av oppbygningsmoduler i Abaqus

«Part» modulen er den delen av programmet hvor man konstruerer de forskjellige komponentene som skal inkluderes i simuleringen.

I «Properties» defineres materialet og hvordan det oppfører seg under ulike tilstander.

Materialet defineres i form av dens egenskaper, men hvilke av egenskapene som skal legges

inn bestemmes ut ifra hvilken analyse som skal utføres. Det blir for eksempel definert om et materiale er anisotrop eller isotrop i denne modulen.

I «Step» modulen defineres hvilken type analyse som skal utføres. Simuleringen kan bestå av for eksempel både termiske og mekaniske belastninger. Den reelle tiden brukt på nedbøyningen defineres også i denne modulen.

I «Assembly» modulen sammenstilles modellen med alle delene der de plasseres i riktig posisjonen slik at det kan kjøres en fullverdig analyse for alle delene samtidig.

I «Load» modulen defineres eventuelle påkjenninger og ytre krefter. Modulen brukes også til å definere randbetingelser, som for eksempel at visse punkter, linjer eller deler er låst fast. Spesifikke eksempler er at verktøy ikke skal bevege seg eller at materialet skal holdes ved en konstant temperatur gjennom hele analysen. I en «explicit» utregning må en amplitude defineres for påkjenningene som har en endring over tid. Dette kan for eksempel være endring i temperatur, forflytning eller krefter.

«Interaction» modulen brukes for å definere interaksjoner som for eksempel kontakt mellom flater. Ved å bruke «explicit» utregning finner Abaqus selv hvor disse kontaktflatene oppstår. Det er også mulig å legge inn brukerdefinerte kontaktflater der det bestemmes hvordan flatene blir påvirket av for eksempel friksjonskoeffisienter og temperaturøkninger.

«Mesh» modulen brukes for å definere elementene. Elementene defineres etter type, geometri, størrelse eller antall. Jo mindre elementene er, jo flere beregninger er Abaqus nødt til å gjennomføre, og analysen tar naturligvis mer tid.

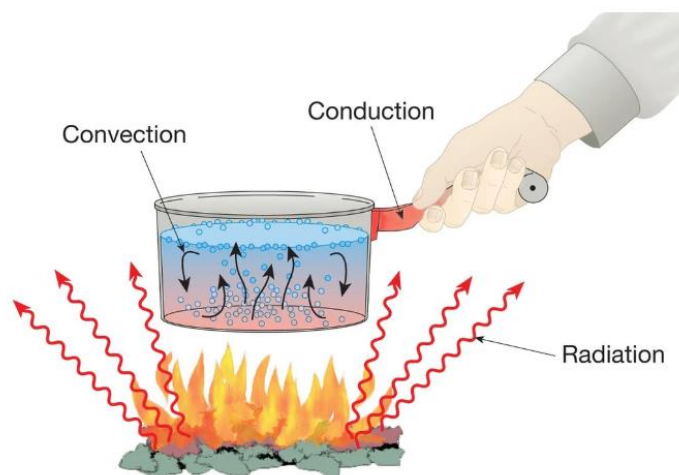
«Job» modulen brukes for å kjøre simuleringen av modellen. Under simuleringen vil en monitor være tilgjengelig for å få oppdateringer. Når utregningen er ferdig, vil man få tilgang til å åpne «visualization» av resultatet. Her kan alle resultater presenteres og disse kan visualiseres i form av tabeller, grafer, eller konturplott av utvalgte deler og sammenstillinger.

I dette prosjekter er spesielt varmeoverføringsanalyse interessant å se på. Ved hjelp av denne analysen kan man finne ut hvordan temperaturen har fordelt seg i komponenten ved forskjellige temperaturer og holdetider. Analysen kan benyttes for å estimere hvor lenge komponenten må holdes i ovn og på hvilken temperatur. Det bør også gjennomføres en

analyse av mekanisk nedbøying, og svaret fra denne vil gi innsikt i hvor stor pressekraft som vil kreves ved nedbøyingen av rondellene.

2.4 Varmeoverføringsanalyse

Varmeoverføringsanalyse, som på engelsk heter «heat transfer analysis» er en termisk analyse som kan gjennomføres i Abaqus for å studere en spesifikk varmeoverføringsprosess. Dette er en analyse som må gjennomføres grunnet kravet om oppvarming av rondellene før den mekaniske nedbøyingen. Det finnes flere måter en varmeoverføring kan skje på, og dette må defineres i programmet før simuleringen. I Abaqus er det blant annet mulig å legge inn både konduksjon, stråling og konveksjon som justerbare parametere.



Figur 5 Forskjellige typer varmeoverføring (Simscale, 2023)

Konduksjon, også kjent som varmeledning, innebærer hvordan varmeenergi ledes gjennom et materiale uten at materialet selv beveger seg. Varmeoverføringen skjer på et mikroskopisk nivå der den kinetiske energi overføres fra atomer med høyere temperatur til lavere temperatur. Stråling i konteksten varmeoverføringsanalyse referer til en prosess der energi overføres i form av elektromagnetiske bølger. Denne typen energistråling krever ikke en materie å bevege seg gjennom, noe som betyr at varmestrålingen også kan finne sted i vakuum. Konveksjon er en form for varmeoverføring som skjer innad i væsker eller gasser. Denne varmeoverføringsprosessen innebærer fysisk bevegelse av et fluid som transporterer varme fra sted til sted. Oppsummert betyr dette at konduksjon krever kontakt, konveksjon

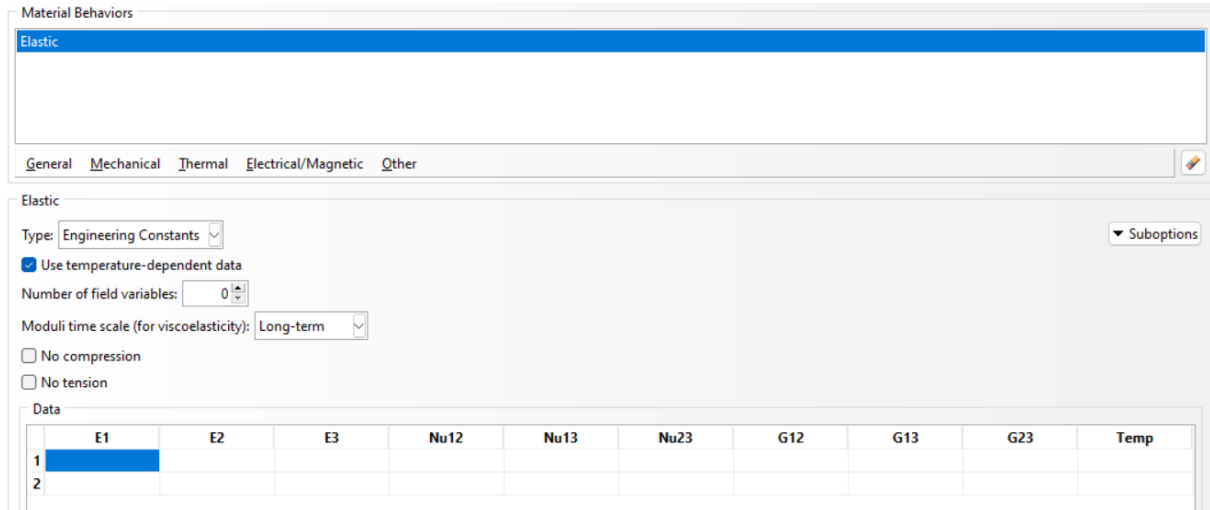
krever fluidstrømning og stråling kan skje selv uten kontakt med medium. Når det gjelder hvilke varmeoverføringer som er relevant for dette prosjektet er både konduksjon, stråling og konveksjon til stede i ulik grad. (Science Ready, 2024)

2.5 Beregninger

Materialet i prosjektet er en kompositt og det vil være nødvendig å kjenne til flere materialegenskaper for å kunne gjennomføre simuleringer og analyser. Når det gjelder produksjonsprosessen er det behov for både oppvarming og pressing av rondeller. Viktige parametere i prosessen er derfor oppvarmingstemperatur, holdetid og pressekraft. Simuleringer skal gjennomføres ved hjelp av programvaren Abaqus med formål om å estimere de riktige prosessparametere. Det vil bli gjennomført både analyser og praktiske tester, og ved hjelp av disse resultatene vil det sammenlignes og sammenfattes en konklusjon i forhold til hva som er gode prosessparametere.

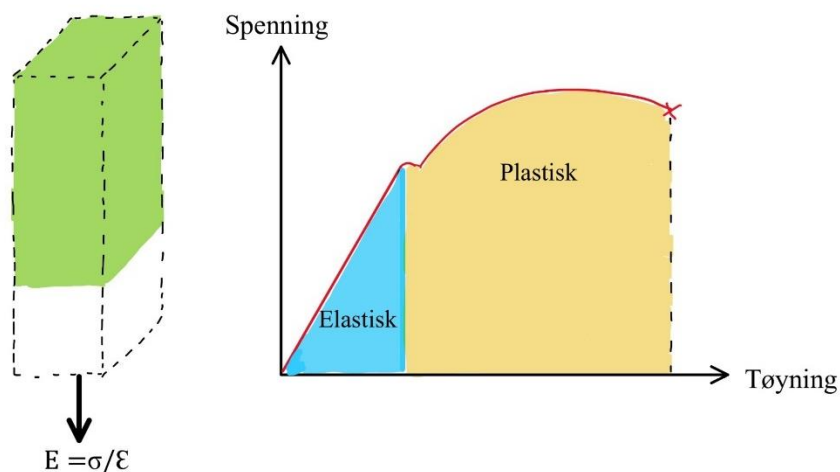
I Abaqus er det behov for en del materialegenskaper som må legges inn for at simuleringene skal fungere. Å lage en god representativ modell av rondellen i Abaqus er ikke rett frem, fordi kompositter ofte har materialegenskaper som er anisotrope. Et anisotrop materiale vil si at det har retningsavhengige egenskaper. En motsetning til anisotrop er isotropt, det vil altså si at egenskapene er like i alle retninger. En annen utfordring med kompositten er at nødvendige egenskaper til pre-preg-duken ikke er oppgitt fra eksternt leverandør. I tilgjengelige datablader finnes det en del informasjon for egenskaper ved herdet materiale, men i dette prosjektet er det nødvendig å vite egenskaper i kompositten før den er ferdig herdet. Det er en vesentlig forskjell mellom egenskapene før og etter herding, og derfor må det gjøres noen antakelser, estimerer og videre beregninger for å finne resterende materialdata.

Materialegenskapene som trengs i Abaqus-simuleringene skal altså gjelde for uherdet komposittmateriale og dette innebærer elastisitetsmodulen i alle retningene (x , y , z), poisson-raten i alle retningene (xy , xz , yz) og skjærmodulen i alle retningene (xy , xz , yz). Det vil også være nødvendig å legge til temperaturavhengig data grunnet oppvarmingen av rondeller i ovn. Den elastiske oppførselen blir definert av typen «engineering constants» og disse egenskapene trengs for å danne en realistisk simuleringsmodell.



Figur 6 Nødvendig materialdata for å legge inn elastisk oppførsel til materiale i Abaqus

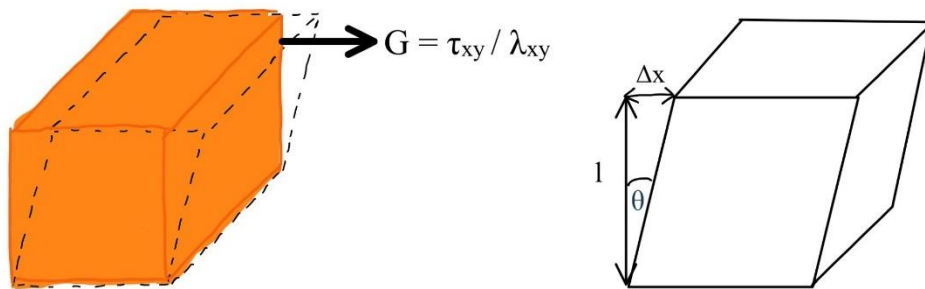
«Young's modulus», også kjent som E-modul eller elastisitetsmodul, er en konstant som beskriver materialets stivhet. Praktisk sett forklarer konstanten hvor lett det er å strekke og deformere et materiale. Konstanten defineres som forholdet mellom spenning og tøyning. Spenningen defineres som hvor mye kraft som påføres per areal og tøyning defineres som forlengelsen per lengde. (University of Birmingham, u.d.) SI-enheten for elastisitetsmodulen er Pascal (Pa). For kontekst har for eksempel herdet stål en elastisitetsmodul på 210 GPa og gummi en elastisitetsmodul mellom 0.2 MPa og 8.0 MPa. (Ormestad, 2021)



Figur 7 Elastisitetsmodul

Skjærmodulen, G, er et mål på stivheten til et materiale når det utsettes for skjærspenninger. Skjærspenninger er de spenningene som oppstår ved skjærkrefter og vinkeldeformasjoner i et legeme. Skjærmodulen kalles også G-modulen, og tallet beskriver forholdet mellom

skjærspenning og skjærdeformasjon i et materiale. Jo høyere skjærmodulen er, desto stivere er materialet og det vil oppleve mindre deformasjon under påvirkning av skjærkrefter. SI-enheten for skjærmodulen er Pascal (Pa), men disse verdiene blir ofte oppgitt i GPa eller MPa grunnet den typiske størrelsen. For kontekst har for eksempel stål en skjærmodul på omtrent 80 GPa og gummi har 0.6 MPa. (Wikipedia, 2023)

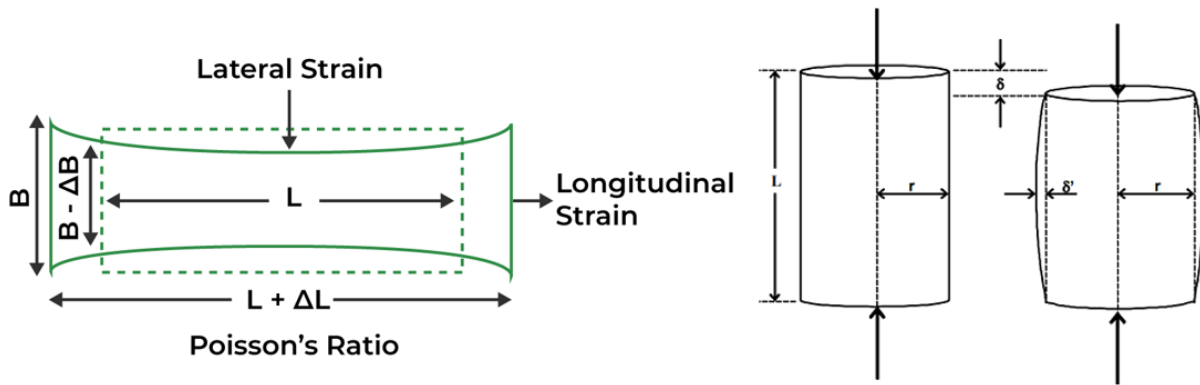


Figur 8 Skjærmodul

Poissonraten « ν » er en beskrivelse på hvordan et materiale oppfører seg under deformasjon. I Abaqus brukes «Nu» som benevning. Når et emne utsettes for strekkrefter forlenges komponenten og tverrsnittet blir mindre, mens ved trykk komprimeres komponenten og tverrsnittet øker. Poissonraten er altså et forholdstall og defineres som absoluttverdien av:

$$\nu = \frac{\text{lateral tøyning}}{\text{langsgående tøyning}}$$

I et fullstendig sprøtt materiale vil « ν » være lik tilnærmet null, ettersom materialet ikke deformeres før det knekker av. I et veldig elastisk materiale som for eksempel en tynn gummistrikk kan ν være omtrent 0.7. For å gi konkrete eksempler har stål ofte en poissonrate på 0.3 og gummi har 0.6. (Poplavko, 2019)



Figur 9 Poisson rate (Geeksforgeeks, 2024) (Engineersedge, u.d.)

For å bestemme de nødvendige verdiene til en simulering i Abaqus kan det benyttes formler og prinsipper fra boka «Mechanics of Composite Materials with MATLAB» av George Voyiadjis og Peter Kattan (Voyiadjis & Kattan, 2005). Kapittel 3 i boka handler om hvordan man kan forutsi elastiske verdier ved hjelp av prinsipper og relasjoner fra standard mikromekanikk. Metoden innebærer blant annet å predikere hvordan matriksen og fibre samhandler og hvordan relasjonen påvirker materialoppførselen.

Ved å bruke materialstyrketilnærming og blandingsregelen for kompositt gjelder følgende relasjon for elastisitetsmodulen i aksial retning:

$$E_1 = E_1^f V^f + E^m V^m \quad [1]$$

E_1^f er elastisitetsmodulen til silica-fibre og E^m er elastisitetsmodulen for phenolic-matriksen i aksial retning. V^f og V^m representerer volumfraksjon, altså forholdet mellom volumet av fiber og matriks i kompositten.

For elastisitetsmodulen i radiell retning gjelder følgende relasjon:

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V^f}{E_2^f} + \frac{V^m}{E^m} \rightarrow E_2 = \frac{1}{\frac{V^f}{E_2^f} + \frac{V^m}{E^m}} \quad [2]$$

E_2^f er elastisitetsmodulen til silica-fibre i radiell retning.

For Poissons forhold ν_{12} gjelder følgende relasjon:

$$\nu_{12} = \nu_{12}^f V^f + \nu^m V^m \quad [3]$$

v_{12}^f og v^m representerer poisson-raten for fiber og matriks.

For skjærmodulen G_{12} gjelder følgende relasjon:

$$G_{12} = \frac{1}{\frac{v^f + v^m}{G_{12}^f + G^m}} \quad [4]$$

G_{12}^f og G^m er skjærmodulen for fiber og matriks.

Skjærmodulen for matriks har følgende relasjon:

$$G^m = \frac{E^m}{2 \times (1 + v^m)} \quad [5]$$

Ved hjelp av disse fem formlene og en ekstern kalkulator for veving av kompositten skal det være mulig å finne alle de ukjente materialkonstantene som mangler til analysen i Abaqus. Noen av variablene kommer fra egne datablad, mens andre blir estimert eller antatt. De kjente variablene er presentert i tabellene nedenfor.

Tabell 1: Tallverdier for herdet materiale

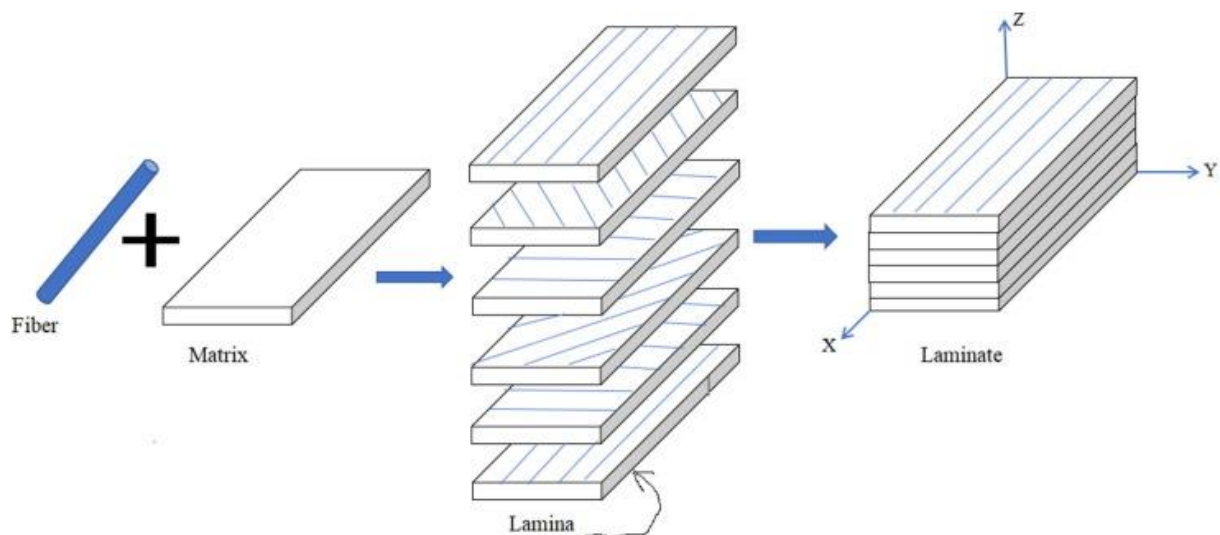
Materialeegenskaper	Verdi	Enhet	Referanse
E-modul kompositt	20684	MPa	Internt datablad, Nammo
Silica fiber			
$E_1^f = E_2^f$	68000	MPa	(AZO, 2024)
v^f	0.16		(AZO, 2024)
Phenolic matriks			
E^m	3800	MPa	(Ashby, 2021)
v^m	0.35		Stergios Goutianos, Professor

Tabell 2: Tallverdier for uherdet materiale

Materialeegenskaper	Verdi	Enhet	Referanse
Silica fiber			
$E_1^f = E_2^f$	68000	MPa	(AZO, 2024)
v^f	0.16		(AZO, 2024)
Phenolic matriks			
E^m	50	MPa	Antakelse
v^m	0.35		Stergios Goutianos, Professor

Kalkulator for materialegenskaper til vevet-kompositt

For å finne materialegenskaper til den vevde pre-preg-rondellen benyttes det en ekstern kalkulator laget i Excel. Kalkulatoren er laget av selskapet «ESP Composites» og kan beregne materialegenskaper i laminaer. Et laminat er et eller flere lamina i en kompositt, og består av for eksempel fibre som går i flere retninger. Denne kalkulatoren er nødvendig å bruke fordi en rondell består av to lamina, der fibre er orientert 90 grader på hverandre og danner et laminat. Det betyr at kalkulatoren beregner materialegenskapene når kompositten blir vevet i «plain weave», der vevingen er i et 1/1 forhold, med fibre som går kontinuerlig en over og en under hverandre.



Figur 10 Lamina og laminat (Bezzie, et al., 2021)

3 Metode

I dette kapitlet presenteres valg av metoder og fremgangsmåter underveis i prosjektet. Dette innebærer hvordan gruppen går frem for å løse utfordringer, samt hvilke beregninger og antakelser som ligger til grunn for valgene.

3.1 Valg av prosessparametere

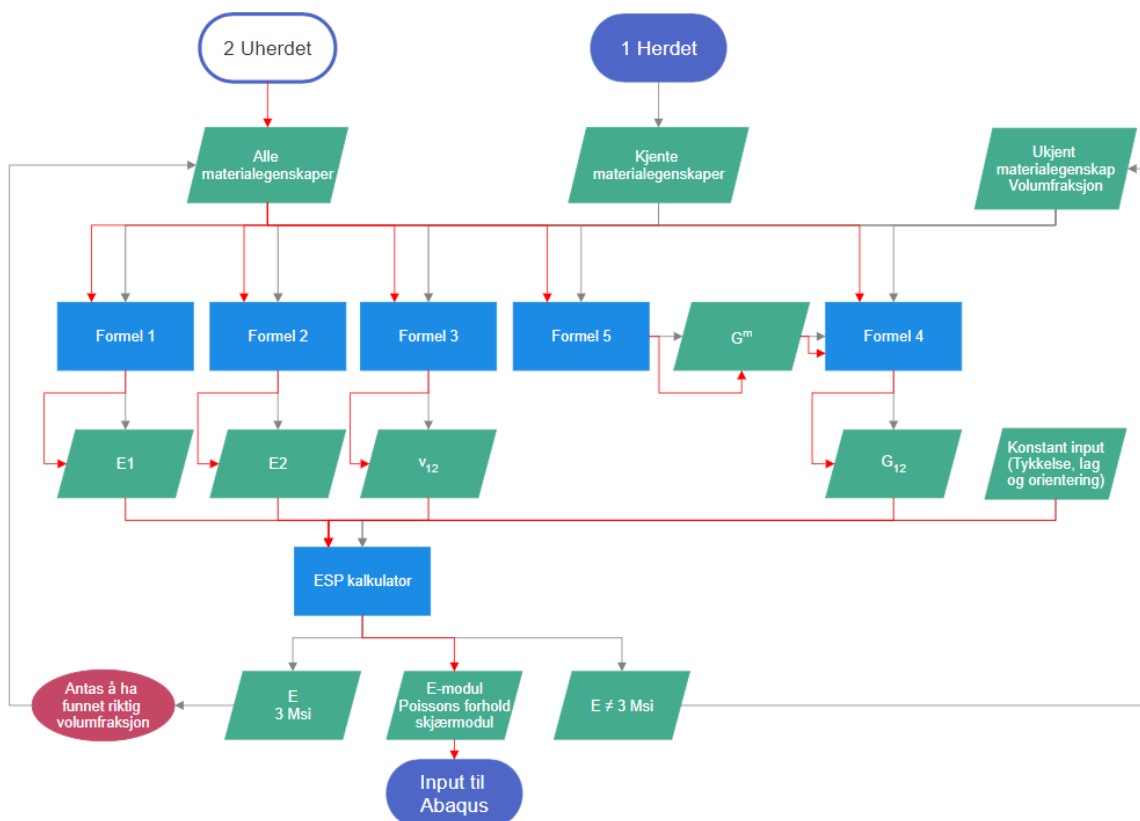
3.1.1 Beregning av materialeegenskaper

Ved hjelp av det teoretiske grunnlaget, fra kapittel 2.2, «Beregning av materialeegenskaper», er det mulig å regne seg fram til riktig materialdata for uherdet kompositt. Materialeegenskapene som skal brukes i ESP-kalkulatoren må være for hele kompositten, så disse må beregnes først.

For herdet kompositt er materialeegenskapene kjent via de fem formlene fra teoretisk grunnlag, bortsett fra volumfraksjonen til fibre. Dermed er det første delmålet for beregningene å finne riktig volumfraksjon som innebærer at ESP-kalkulatoren gir samme E-modul i output som det interne databladet fra Nammo, som er 3 Msi (20 684 MPa).

Fremgangsmåten av beregningene for å finne materialeegenskapene til uherdet kompositt er komplisert. Derfor er det laget et flytskjema for å forklare fremgangsmåten på en enklere måte.

Fremgangsmåte



Figur 11 Flytskjema for materialberegninger



Figur 12 Symbolbetydning flytskjema

Flytskjemaet starter ved boksen «1 Herdet» og følger de grå pilene. En verdi for volumfraksjonen må først antas i formlene. Output fra formlene brukes som input i ESP-kalkulatoren. Dersom output fra kalkulatoren ikke er 3 Msi betyr dette at volumfraksjonen er feil og beregningen må utføres på nytt. Dersom output fra kalkulatoren er 3 Msi er den antatte volumfraksjonen riktig. Ved funn av riktig volumfraksjon begynner beregningen for uherdet materiale. Neste steg i flytskjema starter ved boksen «2 Uherdet» og følger de røde pilene. Beregningen videre er den samme som for herdet, men for uherdet er nå alle materialegenskaper kjent. Denne outputen fra ESP-kalkulatoren vil være verdiene for materialegenskapene til en uherdet rondell. Disse verdiene benyttes som input i Abaqus og simuleringen kan gjennomføres.

Beregning av volumfraksjon for herdet kompositt

Gruppen antar at volumfraksjonen for fiber ligger mellom 0.5 og 0.7. Første volumfraksjon som ble benyttet var 0.5. Denne verdien førte til en lavere E-modul enn 3 Msi (=20 684 MPa). Verdien ble økt stegvis frem til utregningen ga en tilnærmet lik elastisitetsmodul. Utregningen viste at riktig volumfraksjon for fiber er 0.69. Nedenfor vises utregningene i de fem formlene.

$$[1] \quad E_1 = E_1^f V^f + E^m V^m = 68\,000 \text{ MPa} \times 0.69 + 3\,800 \text{ MPa} \times 0.31 = 48\,098 \text{ MPa}$$

$$[2] \quad E_2 = \frac{1}{\frac{V^f}{E_2^f} + \frac{V^m}{E^m}} = \frac{1}{\frac{0.69}{68\,000 \text{ MPa}} + \frac{0.31}{3\,800 \text{ MPa}}} = 10\,902 \text{ MPa}$$

$$[3] \quad v_{12} = v_{12}^f V^f + v^m V^m = 0.16 \times 0.69 + 0.35 \times 0.31 = 0.2189$$

$$[5] \quad G^m = \frac{E^m}{2 \times (1 + v^m)} = \frac{3\,800 \text{ MPa}}{2 \times (1 + 0.35)} = 1\,407.4 \text{ MPa}$$

$$[4] \quad G_{12} = \frac{1}{\frac{V^f}{G_{12}^f} + \frac{V^m}{G^m}} = \frac{1}{\frac{0.69}{30\,000 \text{ MPa}} + \frac{0.31}{1\,407.4 \text{ MPa}}} = 4\,110.8 \text{ MPa}$$

Disse resultatene settes som input i komposittkalkulatoren i Excel. Verdiene er for herdet komponent med volumfraksjon på 0.69.

Tabell 3: Input og output fra ESP-kalkulator for herdet kompositt

Input	Verdi	Enhet	→	Resultater	
E1	48098	MPa		$E_x = 20\,738 \text{ MPa}$	
E2	10902	MPa		$E_y = 20\,738 \text{ MPa}$	
v_{12}	0.2189	-		$v_{xy} = 0.081$	
G_{12}	4110.8	MPa		$v_{yx} = 0.081$	
t_{ply}	0.5	mm		$G_{xy} = 4111 \text{ MPa}$	

Resultatene fra komposittkalkulatoren viser at E-modulen til herdet materiale er 20 738 MPa. Sammenlignet med verdien 20684 MPa fra Nammo sitt datablad er dette et relativt godt resultat. Det beregnede resultatet har kun $(1 - (20684 / 20738)) = 0.0026 = 0.26\%$ avvik. Videre ble beregningen for uherdet materiale utført.

Beregning av materialegenskaper for uherdet kompositt

Utregninger for uherdet materiale:

$$[1] \quad E_1 = E_1^f V^f + E^m V^m = 68\,000 \text{ MPa} \times 0.69 + 50 \text{ MPa} \times 0.31 = 46\,935.5 \text{ MPa}$$

$$[2] \quad E_2 = \frac{1}{\frac{V^f}{E_2^f} + \frac{V^m}{E^m}} = \frac{1}{\frac{0.69}{68\,000 \text{ MPa}} + \frac{0.31}{50 \text{ MPa}}} = 161 \text{ MPa}$$

$$[3] \quad v_{12} = v_{12}^f V^f + v^m V^m = 0.16 \times 0.69 + 0.35 \times 0.31 = 0.2189$$

$$[5] \quad G^m = \frac{E^m}{2 \times (1 + v^m)} = \frac{50 \text{ MPa}}{2 \times (1 + 0.35)} = 18.52 \text{ MPa}$$

$$[4] \quad G_{12} = \frac{1}{\frac{V^f}{G_{12}^f} + \frac{V^m}{G^m}} = \frac{1}{\frac{0.69}{30\,000 \text{ MPa}} + \frac{0.31}{18.52 \text{ MPa}}} = 59.7 \text{ MPa}$$

Tabell 4: Input og output fra ESP-kalkulator for uherdet kompositt

Input	Verdi	Enhet	→	Resultater	
E1	46 935.5	MPa		$E_x = 6\,129 \text{ MPa}$	
E2	161	MPa		$E_y = 6\,129 \text{ MPa}$	
v_{12}	0.2189	-		$v_{xy} = 0.001$	
G_{12}	59.7	MPa		$v_{yx} = 0.001$	
t_{ply}	0.5	mm		$G_{xy} = 59.7 \text{ MPa}$	

Kalkulatoren viser at E-modulen for uherdet kompositt er 6129 MPa. Det er tidligere presisert at rondellen skal presses i oppvarmet tilstand, så derfor trengs det også temperaturavhengig materialdata. Den temperaturavhengige dataen estimeres ved å anta lineære verdier fra

romtemperatur til smeltetemperatur for phenolic-resinen. Det antas at de mekaniske egenskapene til silica-fibrene ikke vil bli påvirket etter oppvarming. For smeltet tilstand antas E-modulen til resinet til å være tilnærmet lik 0 MPa og 0.5 i poissonrate, der disse materialegenskapene stammer fra antakelsen om verdier til flytende materie (Ando & Mizutani, 2014). De temperaturavhengige materialkonstantene for elastisk oppførsel presenteres i figuren nedenfor. Den øvre raden er for romtemperatur og den nedre raden er ved smeltetemperaturen for resinen.

	E1	E2	E3	Nu12	Nu13	Nu23	G12	G13	G23	Temp
1	6129	6129	50	0.001	0.001	0.001	60	60	60	20
2	5865	5865	1E-05	4E-10	4E-10	4E-10	1.08E-05	1.08E-05	1.08E-05	229

Figur 13 Ferdige materialegenskaper som input til simulering i Abaqus

3.1.2 Fysisk test: Oppvarming av rondeller i ovn

Formålet med testen er å sammenligne fysiske testresultater med simuleringer fra Abaqus og ikke minst for å få en oppfattelse om hvordan materialet oppfører seg ved forskjellige temperaturer og holdetider. Formbarhet og klistreevne avhenger av disse parameterne. Testplanen er å starte på samme oppvarmingstemperatur og holdetid som Nammo har benyttet tidligere ved manuell oppvarming av rondeller. Denne kjente temperaturen og holdetiden er bestemt ut ifra tidligere fysiske tester og har fungert godt i praksis tidligere. Det er allikevel ønskelig for gruppen å finne en enda mer effektiv oppvarmingsmetode.

Før testene ble utført ble det satt opp en oversiktlig testplan med ulike temperaturer og holdetider. Testplanen inneholder kolonner for testnummer, temperatur, holdetid, målt temperatur med termometer, om den er herdet, om den er klissete, totalvurdering mellom 0 og 10 og til slutt supplerende kommentarer.

Utstyr

- Ovn
- IR-termometer
- Rondeller
- Treplate

- Presseverktøy
- Testplan / skjema
- Penn
- Vernebriller
- Vernehansker
- Vernesko
- Vernefrakk

Hypotese

Balansen mellom temperatur og holdetid har en vesentlig innvirkning på sluttresultatet. Målet er å finne den høyeste temperaturen og den korteste holdetiden for at rondellen skal ha en gunstig formbarhet og konsistens. Hypotesen er at dersom rondellen blir utsatt for en for høy temperatur vil rondellen herde og bli stiv og lite formbar. Dersom rondellen blir utsatt for lave temperaturer vil rondellen legge seg feil, få en elastisk forming og ikke klistre seg til nabo-rondeller.

Metode

Denne testen er utført hos Nammo på Raufoss, men grunnet bildeforbud i produksjonslokaler er det benyttet bilder fra tilsvarende tester fra laben på NTNU i Gjøvik. Gjennomføringen av testen er forklart nedenfor.

- 1) Forvarm ovnen til planlagt temperatur. Kontroller at ovnen er på riktig temperatur med måleutstyr, for eksempel IR-termometer. Det er viktig å forvarme underlagsplaten på forhånd slik at den holder ovnstemperatur. Hvis underlagsplaten har lavere temperatur enn ovnen, vil oppvarmingstiden bli lengre.
- 2) Når ovn og underlagsplate har nådd riktig temperatur, så åpnes ovnen og rondellen legges på underlagsplata. Lukk igjen ovn og start klokken for å logge tiden. Åpne og lukk ovnen raskt for å unngå unødvendig varmetap.



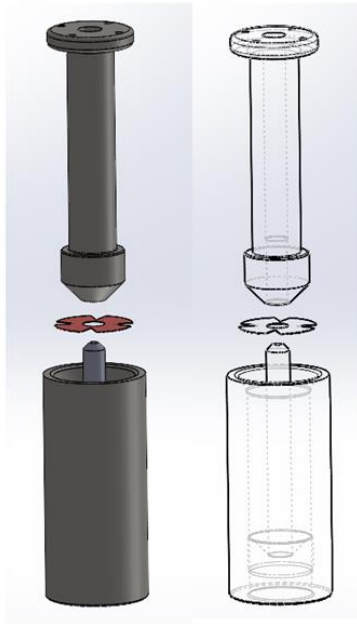
Figur 14 Legge rondell inn og ut av ovn

- 3) Ta treplaten med rondellen ut av ovnen etter planlagt holdetid og mål temperaturen på rondellen raskt. Det kan være lurt å starte termometeret ca. 3 sekunder før rondellen tas ut for å være klar.



Figur 15 Temperaturmåling med IR-termometer

- 4) Når temperatur er målt og notert skal gruppen teste formbarheten og hvor klissete materialet er, og deretter presses rondellen ned i verktøyet. Dette skal gjøres med verneutstyr. Noter ned resultater og nødvendige kommentarer inn i testtabellen.



Figur 16 Testverktøy benyttet for å presse rondeller til 45° vinkel



Figur 17 Brettet rondell etter oppvarmingstest

- 5) Repeter steg 2 – 4 for ulike temperaturer og holdetider. Det er viktig å fylle ut testrapporten underveis.

Resultater

Tabell 5: Resultater fra oppvarming av rondeller i ovn

Test	Temp ovn (°C)	Tid (min)	Målt temp på overflate (°C)	Herdet	Sticky	Score av 10	Kommentarer
1	100	8	86	Nei	Nei	4	<ul style="list-style-type: none"> - Oppnår ikke høy nok ønsket temperatur - Enkel å presse, men sitter ikke sammen. - Etter noen minutter mistet den også formen sin igjen (restspenninger)
2	100	8	85	Nei	Nei	4	<ul style="list-style-type: none"> - Dobbeltsjekker at resultatet blir likt med forvarmet treplate.
3	120	8	103	Nei	Ja	8	<ul style="list-style-type: none"> - Med kaldt verktøy i aluminium fungerte dette relativt godt. God formbarhet og relativt sticky. Tror ikke det trengs så lang oppvarming.
4	120	8	108	Nei	Ja	7	<ul style="list-style-type: none"> - Prøvde samme igjen, men ventet litt lenger før det ble tatt ut av presseverktøyet. Ble fortsatt et godt resultat, men litt mindre sticky
5	120	5	109	Nei	Nei	5	<ul style="list-style-type: none"> - Her ble det igjen brukt presseverktøyet direkte, men det virker som varmen forsvinner for fort grunnet kaldt verktøy. Rondeller satt seg ikke ordentlig sammen.
6	120	4	98	Nei	Nei	5	<ul style="list-style-type: none"> - Her ble det presset med fingrene på kun 45° konusen. Fungerte ikke, satt ikke sammen.

							- Kan ha sammenheng med fingerpressing og kalde verktøy.
7	120	5	99	Nei	Ja	10	<ul style="list-style-type: none"> - Denne testen ble gjort i verktøyet med en rondell over og under som buffer for å unngå raskt varmetap i aluminiumen. - Ga det beste resultatet - God formbarhet og bra sammensmelt av rondellene. Sitter godt, men ikke helt fast, som ønsket
8	140	5	132	Ja, litt	Nei	2	<ul style="list-style-type: none"> - Her er det tydelig at resinen har herdet for mye. - Ikke sticky i det hele tatt. Tyder på at temperatur og holdetid er for høy og lang. Ikke aktuelt.

Testresultatene viser at test nummer 7 ga best score ut ifra formbarhet og konsistens med lavest holdetid. Det legges vekt på at testen inneholdt buffer mellom verktøy og rondell for å isolere varmen under pressing. Videre diskusjon av testresultatene forekommer senere i rapporten der dette er interessant og kan benyttes.

3.1.3 Simuleringer i Abaqus

Ved å bruke simuleringsverktøy kan ressurser spares sammenlignet med å kun gjennomføre fysiske tester som grunnlag for prosesser og konstruksjon. Gruppen brukte programmet Abaqus for å simulere oppvarming og nedbøyingen av rondellen. Formålet med simuleringen var å finne ut hvordan komponenten oppførte seg før, under, og etter nedbøyning med hensyn på både temperatur, holdetid og pressekraft.

Oppbygning av modell

For å spare tid ved utførelsen av utregninger og analysen bør analysedelene forenkles så mye som mulig i programmet. Ved å gjennomføre korte og enkle tester med forskjellige metodikker i 2D, 3D og bruk av symmetri kan man sjekke ut hvilke forenklinger som gir samme resultater og som man kan benytte seg av. Først ble det utarbeidet en simulering av nedbøyningen i 2D. Her ble det oppdaget en del feil, ettersom det bare ble en linje med elementer der hjørner og kontaktflater oppførte seg urealistisk. Derfor ble det utarbeidet en 3D-modell. Det ble gjort for å forsikre om at Abaqus medberegner overflatekontakten i tykkelsen av rondellen. 3D-modellen viste god forbedring, men var fortsatt utenfor forventningene ved kontakt mellom kuttoverflatene etter nedbøyning. Det ble videre utviklet en simulering med dynamisk utregning (explicit), som gjøres kvasistatisk (tilnærmet statisk). Oppbygningen av den kvasistatiske analysen i 3D presenteres nedenfor:

Part: Simuleringen består av 3 komponenter hvor over- og underdel av verktøyet er identiske. Det har derfor blitt tegnet rondell og verktøy individuelt. Verktøyet ble konstruert med analytiske flater, og rondellen ble konstruert som en solid 3D-modell.

Properties: De beregnede materialegenskapene for rondellen i kompositt blir implementert som «engineering constants».

Step: Det ble benyttet «explicit step», med $10E-06$ som tidsskritt i løpet av en reell tid på ett sekund.

Assembly: Senter av rondellen ble plassert i origo av sammenstillingen. Verktøydelen ble satt inn to ganger, med over- og underdel på hver side av rondellen. Delene ble plassert helt inntil hverandre med samme senterakser.

Interaction: Det ble benyttet generell kontakt for «explicit» simulering, der friksjonskoeffisienten mellom flater antas å være 0,3. Dette er for å gjøre interaksjonen mellom flater mer realistisk enn ved standardinnstillingen om friksjonsløs kontakt.

Referansepunkter ble koblet opp mot verktøydeler for kunne hente ut resultater ved endt simulering.

Load: Referansepunktet til underverktøyet ble låst fullstendig i alle retninger.

Referansepunktet til oververktøyet ble fullstendig låst med unntak av z-retningen. Bevegelsen

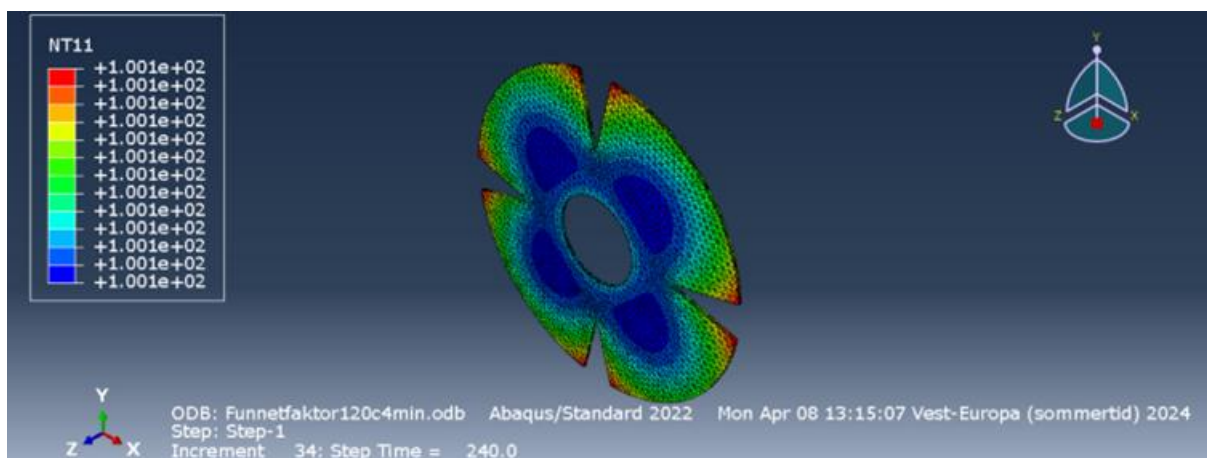
til oververktøyet ble lagt inn som en forflytning i referansepunktet i z-retning med en avstand på omtrent 36mm, med «smooth step» amplitude. Temperaturen fra varmeoverføringsanalysen blir også implementert under denne modulen. Denne må implementeres når gruppen vet hvilken temperatur som skal gås videre med, ettersom denne bestemmes av resultatet fra den planlagte varmeoverføringsanalysen.

Mesh: For å gjøre utregningene raskere ble det benyttet lineære 3D-stress elementer med en global størrelse på omtrent 1mm.

Varmeoverføringsanalyse

Ved å gjennomføre fysiske tester sammen med simuleringer i Abaqus kan man til en viss grad kvalitetssikre og validere begge parter. Gruppen utarbeidet en varmeoverføringsanalyse der varmen ble overført ved stråling, og deretter ble det utført fysiske tester for å sammenligne resultatene. Da viste det seg at resultatene hadde et for stort avvik fra hverandre, og dette kan skyldes en mengde input variabler som for eksempel materialegenskapene og oppvarmingsfaktorer. Differansen mellom temperaturresultatene ble korrigert ved å regulere en inputfaktor for oppvarmingen frem til resultatene fra simuleringen og den fysiske testen var omtrent like.

Nedenfor vises resultatet fra simuleringen etter å ha blitt modifisert, ved oppvarming på 120°C i 4 minutter. Denne testen, nummer 6 fra testrapporten, ble valgt ettersom treplaten i ovnen var forvarmet. Denne testen vil dermed gi det mest riktige resultatet, og mest sammenliknbare med Abaqus.



Figur 18 Resultat fra heat transfer analysis, 120°C, 4 minutter [°C]

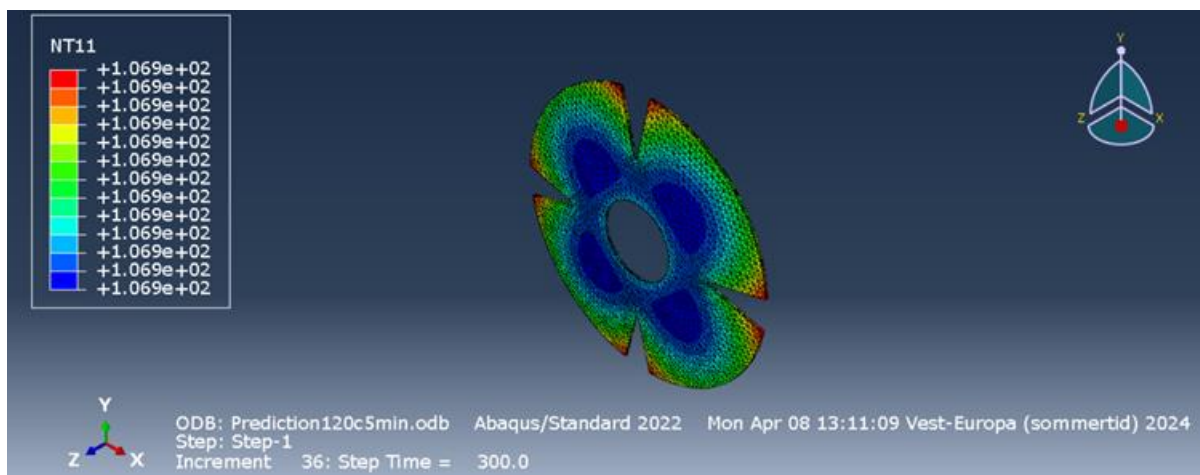
Sammenliknet med de fysiske testresultatene anser gruppen dette som innenfor vårt bruksområde, ettersom målingen kan ha vært litt treg og resultert i et par grader lavere overflatetemperatur på rondellen enn hva den er øyeblikkelig ut fra ovn.

Tabell 6: Testresultat for å verifisere analysen fra figur 18

Test	Temp ovn (°C)	Tid (min)	Målt temp på overflate (°C)	Herdet	Sticky	Score av 10	Kommentarer
6	120	4	98	Nei	Nei	5	<ul style="list-style-type: none"> - Her ble det presset med fingrene på kun 45° konusen. Fungerte ikke, satt ikke sammen. - Kan ha sammenheng med fingerpress og kaldt verktøy.

Testresultatene viser altså en måling på 98°C på overflaten, mens resultatene fra Abaqus viser 100°C ved slutten av oppvarmingen. De to gradene kan forklares av påbegynt nedkjøling etter uttakelse av ovn.

Under den fysiske testen opplevde gruppen at en overflatetemperatur mellom 100-105°C ved pressing var det mest optimale. Dette stemmer også overens med et viskositetsdiagram for phenolic-resinet. Viskositetsdiagrammet er analysert hos ekstern oppdragsgiver, men kan ikke presenteres her grunnet sensitivitet. Fra viskositetsdiagrammet ser man også at temperaturen i materialet ikke bør overstige 110°C. Ved for høy temperatur vil viskositeten øke igjen og resinet vil miste ønsket klistreevne. Videre er det også simulert med 5 minutter holdetid i ovn, altså en økning på 1 minutt fra forrige simulering.



Figur 19 Resultat fra heat transfer analysis, 120°C, 5 minutter [°C]

Abaqus forutser en temperatur på 107°C direkte fra ovn. Deretter kan man anta slik som i forrige test at temperaturen vil være et sted rundt 105°C ved måling, som er omtrent 2-3 sekunder etter uttakelse av ovn. Det understrekes at bruk av denne verdien vil være konservativ i forhold til effektivitet ved holdetid. Toleransen gruppen ønsker å holde seg innenfor er mellom 100 – 105°C og det går dermed videre med å se på holdetid og temperatur hvor 105°C oppnås for å regne konservativt med hensyn på effektivitet.

Tabell 7: Testresultater for å verifisere varmeoverføringsanalyse

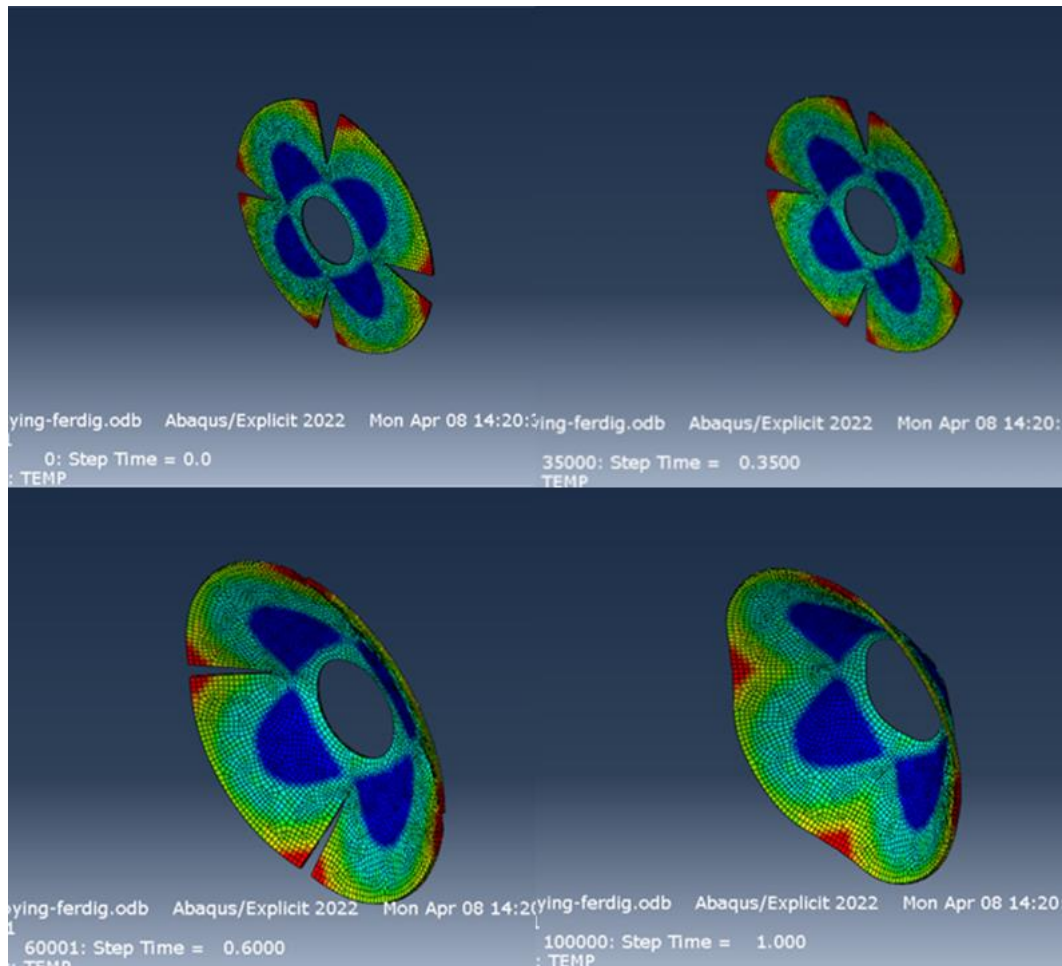
Test	Temp ovn (°C)	Tid (min)	Målt temp på overflate (°C)	Herdet	Sticky	Score av 10	Kommentarer
5	120	5	109	Nei	Nei	5	- Her ble det igjen brukt presseverktøy direkte, men det virker som varmen forsvinner for fort grunnet kaldt verktøy. Rondeller satt seg ikke ordentlig sammen.
7	120	5	99	Nei	Ja	10	- Denne testen ble gjort i verktøyet med en rondell over og under som buffer for å unngå raskt varmetap i aluminiumen. Hjalp ekstremt, veldig godt resultat her.

Fra testresultatene over ser man stor forskjell mellom de to «identiske» testene. Gruppen anser dette til å være feilmålinger skapt av deltakerne, samt mulige feil og/eller måletoleranser på ovn og lasermåler. Målet om å ligge på omtrent 105°C anses til å være oppnådd ved 5 minutter på 120°C. Det kan tenkes at høyere temperaturer i ovn vil kunne senke holdetiden så lenge temperaturen ikke overstiger den kritiske temperaturen 110°C fra viskositetsdiagrammet. Ettersom gjennomvarming er ønskelig, anser gruppen 120°C som høyeste brukbare temperatur gjennom oppgaven.

En god oppvarmingstemperatur og holdetid er dermed funnet, og gruppen kan gå videre til å implementere dette i den mekaniske simuleringen. Siden rondellene skal varmes opp er dette nødvendig for å oppnå det mest korrekte resultatet for nødvendig pressekraft.

Mekanisk nedbøying med oppvarming

Figuren nedenfor visualiserer nedbøyningen av rondellen og lukkefunksjonen etter oppvarming.



Figur 20 Visualisering av nedbøying og lukkefunksjon etter oppvarming

I den mekaniske delen av simuleringen er gruppen ute etter å se hvordan rondellen oppfører seg under nedbøyningen for å se om det er noe som må tas hensyn til i konstruksjonen.

Hovedresultatet ønsket fra simuleringen er nødvendig pressekraft som må til for å presse verktøyet sammen med en rondell imellom. Dette har blitt gjort ved å bruke analytiske flater som verktøy, for å deretter hente ut verdi for resulterende kraft i forflytningen av verktøyet.

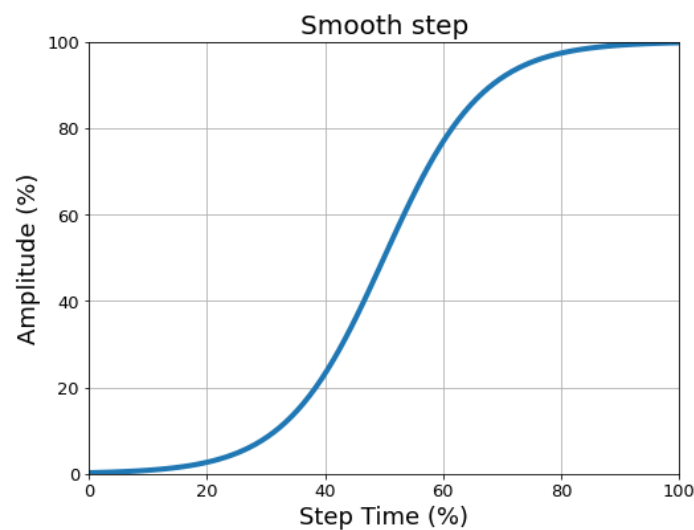
Først ble det sjekket hvor høy den kinetiske energien var i forhold til tøyningen ettersom dette er et statisk problem som utregnes ved dynamisk (explicit) simulering. Etter samtale med

veileder bør $\frac{\text{Kinetisk energi}}{\text{Tøyningsenergi}} < 2\%$ ved tidspunktet som data hentes fra. I de første

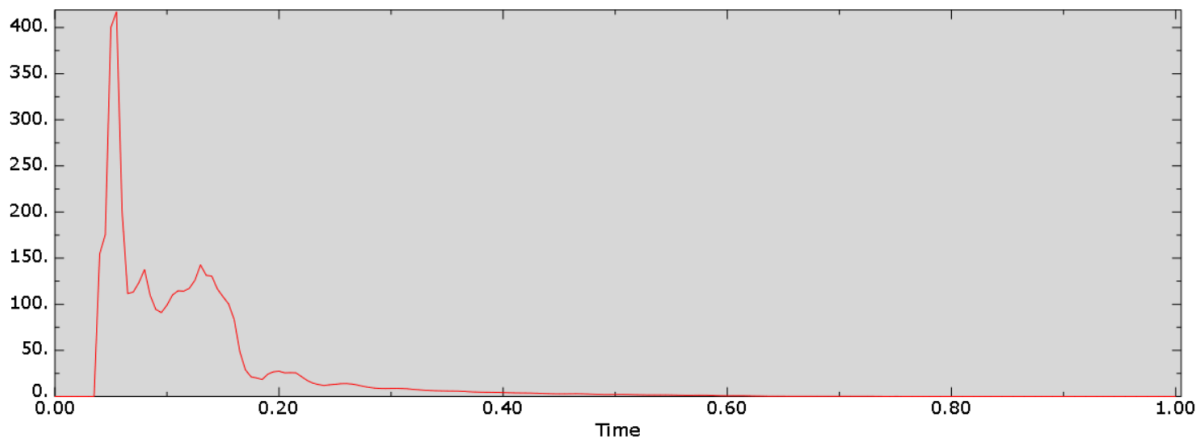
simuleringene var det et gjengående problem at den kinetiske energien var for høy. Grunnet

standardinnstillingen om en lineær sammenheng mellom start og slutt punkt tolker Abaqus at verktøyet treffer rondellen med høy fart og simuleringen gir urealistisk fordeling av krefter.

For å løse dette problemet ble amplituden av bevegelsen modifisert ved hjelp av innstillingen «smooth step». Amplituden definerer hvordan bevegelsen foregår som en funksjon av tid, som igjen betyr at amplituden påvirker hvor mye prosent av kreftene som oppstår ved de forskjellige tidene. Ved å bruke den nye innstillingen blir området mellom 0 og 100% i step-time forhåndsdefinert, slik at man kun trenger å definere start- og slutt punkt på amplituden. Bruken av «smooth step» gjør at kreftene påføres forsiktig i begynnelsen for å unngå «impact energy» ved førstegangskontakt mellom verktøy og rondeller. Simuleringer med denne innstillingen løste problemet og det blir erfart at den kinetiske energien er relativt lav. Nedenfor i figur 21 presenteres en visualisering av «smooth step» innstillingen og deretter i figur 22 presenteres resultatet fra kinetic energy/strain energy. I figur 22 observeres det i tillegg at fra 0.4 sekunder og videre er den kinetiske energien lav nok til at verdiene kan benyttes.

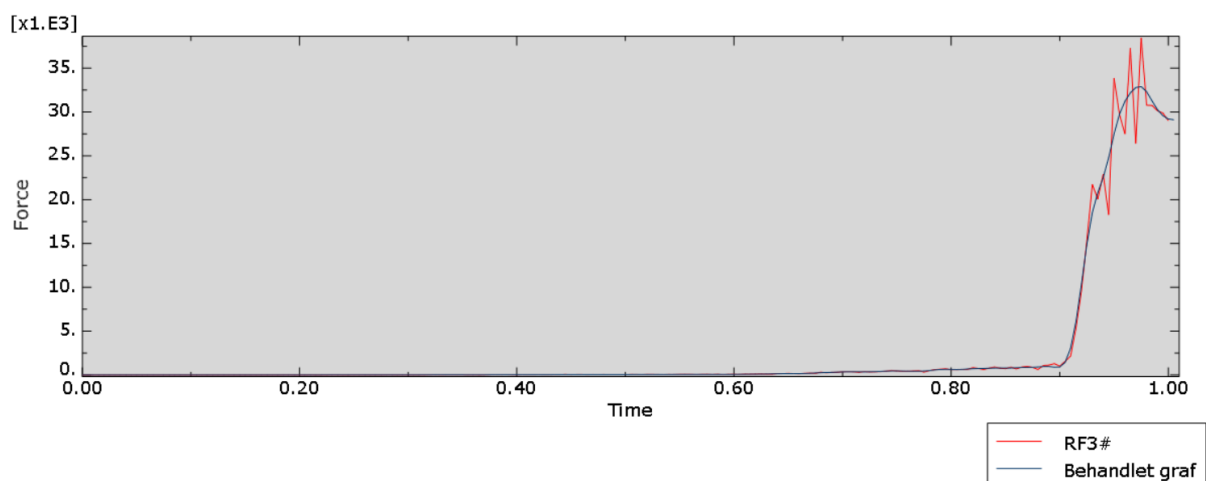


Figur 21 Visualisering av «smooth step» innstilling på amplituden til forflytning av verktøy



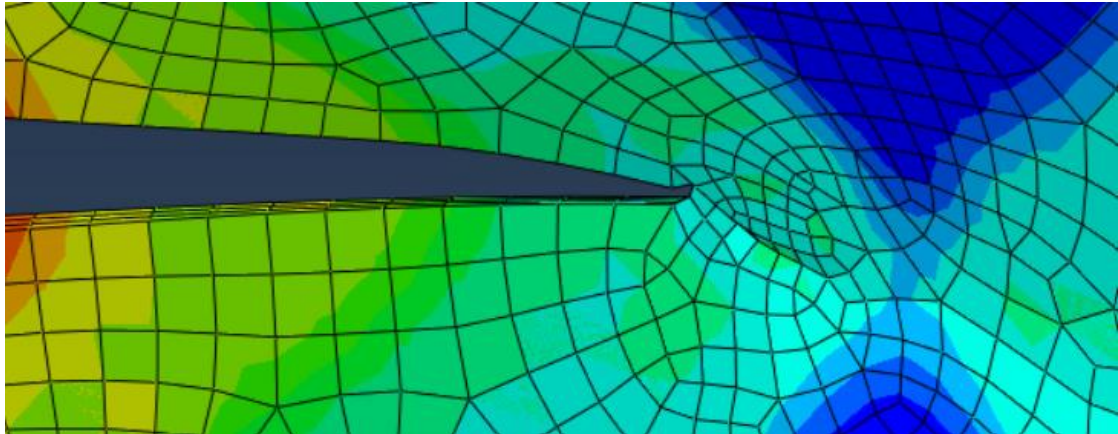
Figur 22 Plot av kinetic energy / strain energy. x-akse: sekunder, y-akse: prosent

Etter at den kinetiske energien ble korrigert var neste steg å hente ut resulterende pressekrefter. Grafen nedenfor representerer resulterende kraft i z-retning med rådataen fra simuleringen, i tillegg til en behandlet graf av disse dataene. Den behandlede grafen stammer fra gjennomsnittlige verdier av alle målingene og lager en tilpasset linje. Ved å zoome inn på grafene vises det en betydelig øking i nødvendig pressekraft etter omtrent 60-65% nedbøying og igjen ved 90%. Ved 60-65% kan dette være et resultat av at kuttene i rondellene har begynt å kollidere med hverandre, og ikke «glir rundt» slik som et fibermateriale vil gjøre i praksis. Ved 90% er verktøyene og rondeller helt sammenklemt, slik at videre pressing gir komprimering av rondell og det oppstår urealistiske verdier.

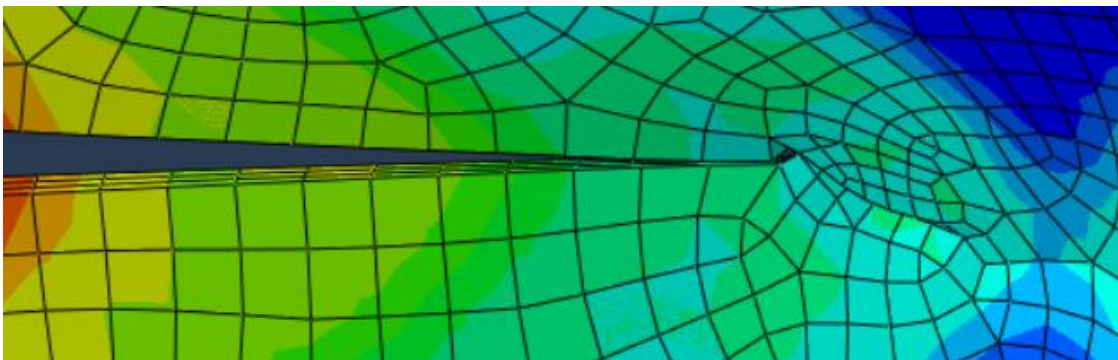


Figur 23 Resulterende pressekraft presentert med rådata og behandlet graf. x-akse: sekunder, y-akse: Newton

Følgende bilder viser konturplott av bunnen i kuttene ved 60% og 65% nedbøying. Det er omtrent i denne overgangen elementene kolliderer med hverandre og videre gir urealistiske verdier som output. Modellen skjønner ikke at materialet er en kompositt og at fibre og matriks kan krysse og sammenfalle med hverandre.

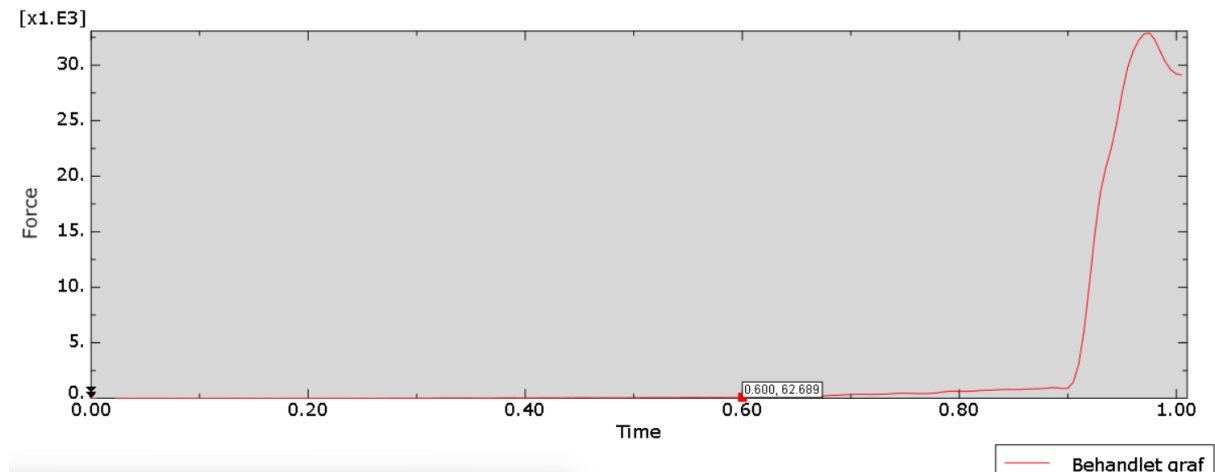


Figur 24 Konturplott av bunn på kuttene ved 60% nedbøying



Figur 25 Konturplott av bunn på kuttene ved 65% nedbøying

Gruppen har sammen med veileder konkludert med at resulterende krefter ved 60% nedbøying vil være tilstrekkelig til å fortsette nedbøyingen i realiteten, og derfor neglisjeres verdiene etter dette tidspunktet. Videre må dermed verdiene etter 60% nedbøying hentes ut i fra Abaqus.



Figur 26 Resulterende pressekraft ved 60% nedbøying. x-akse: sekunder, y-akse: Newton

Den nødvendige pressekraften anses derfor til å være omtrent 62.7N, med forbehold om at noe økning også vil kunne være realistisk. For å oppnå god kontakt mellom rondellene bør det også presses litt ekstra enn nødvendig for å oppnå litt kompresjon slik at rondellen festes godt til hverandre. 62.7N er tilnærmet det samme som et verktøy på 6-7 kg i fritt fall ned over rondellen. Det vil si at den nødvendige pressekraften ikke er en begrensende faktor ved valg av presseutstyr.

Dermed er prosessparameterne pressekraft, temperatur og holdetid funnet, og neste steg i prosjektet er selve konstruksjonen. I konstruksjonsdelen er det valgt å dele fremgangsmåten opp i fire hoveddeler: Idémyldring, prototyping for å teste mekanismer, vurderingsmatrise for utvelgelse av konseptet og til slutt konstruering av de ulike delene i SolidWorks. Når alle delkonstruksjonene er laget sammenfattes dette til en fullstendig sammenstilling.

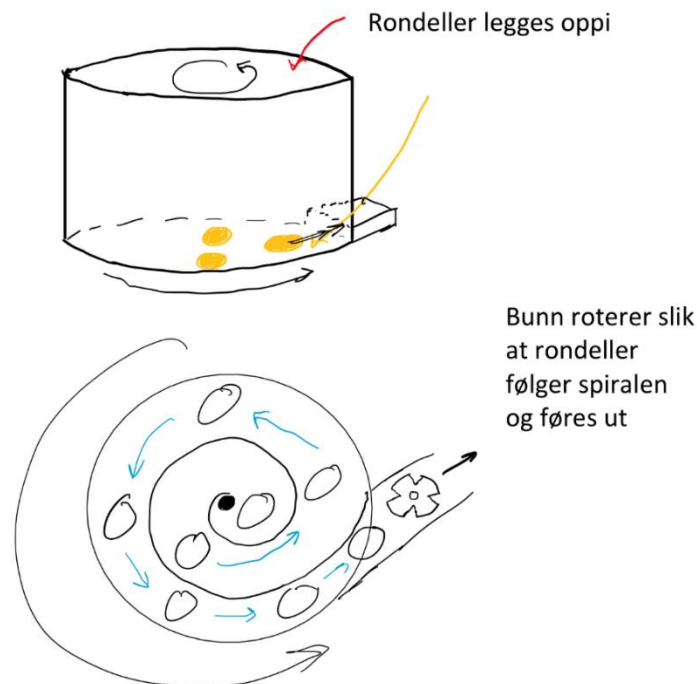
3.2 Konstruksjon

3.2.1 Idémyldring

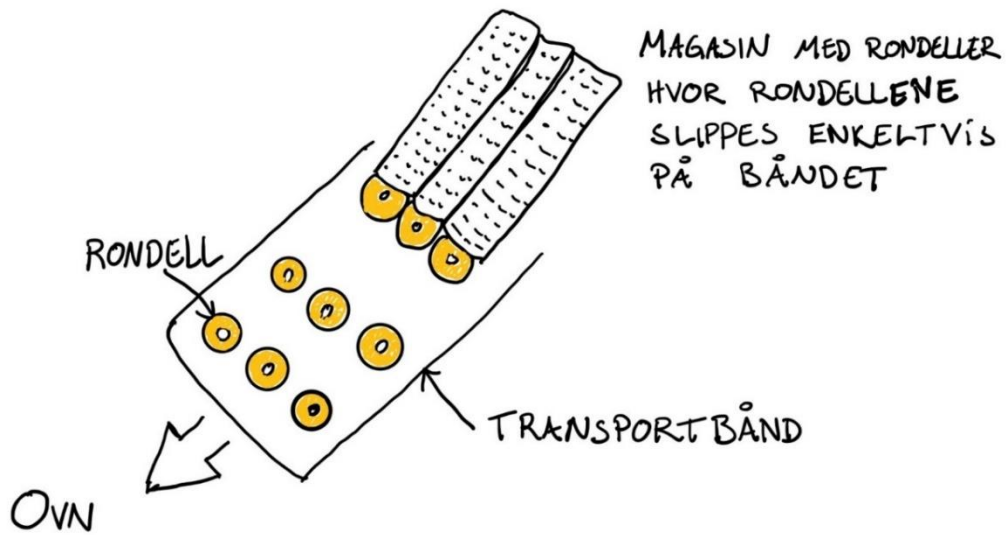
Idémyldringen ble utført innad i gruppen, med gode innspill fra ekstern bedrift.

Konstruksjonen deles hovedsakelig inn i fire funksjoner: Innmater til ovn, ovn, presse og utmating ut ifra presseverktøy. Under idémyldringen ble det påpekt at rondellene kun er 1mm tykke og svært tøyelige, og derfor er det viktig å ta hensyn til dette under all behandling og transport gjennom den automatiserte maskinen. For gruppen var det også viktig å sørge for at alle ideer ble presentert, med en tanke om at ingen ideer er «dumme». På denne måten kan gruppen sørge for at alle kommer med sine egne bidrag, og at man heller kan reflektere og diskutere etter at personlige tanker er notert ned eller visualisert.

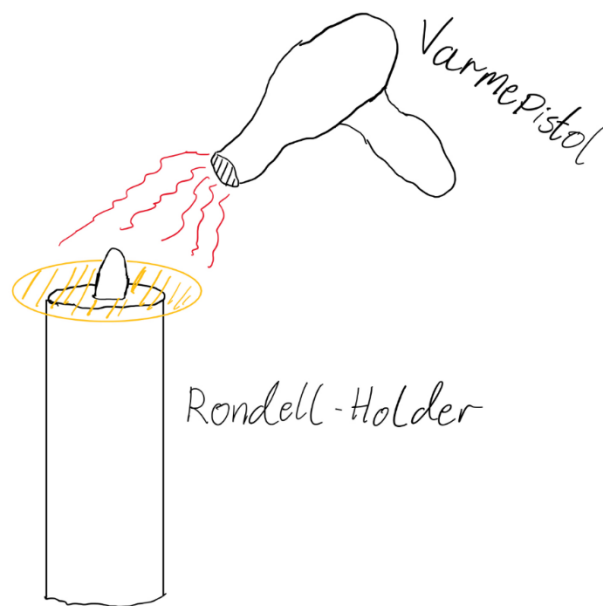
Nedenfor presenteres et utvalg av alternativene gruppen tegnet for hånd:



Figur 27 Trommel for innmater



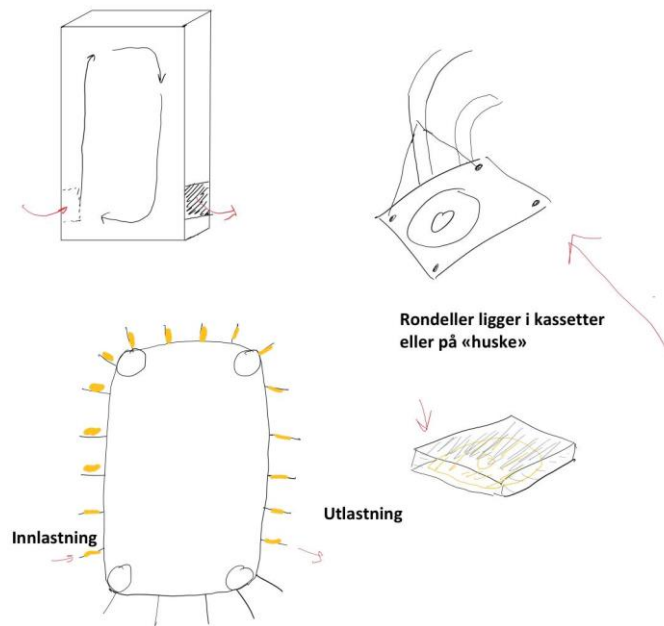
Figur 28 Slippemekanisme for innmater



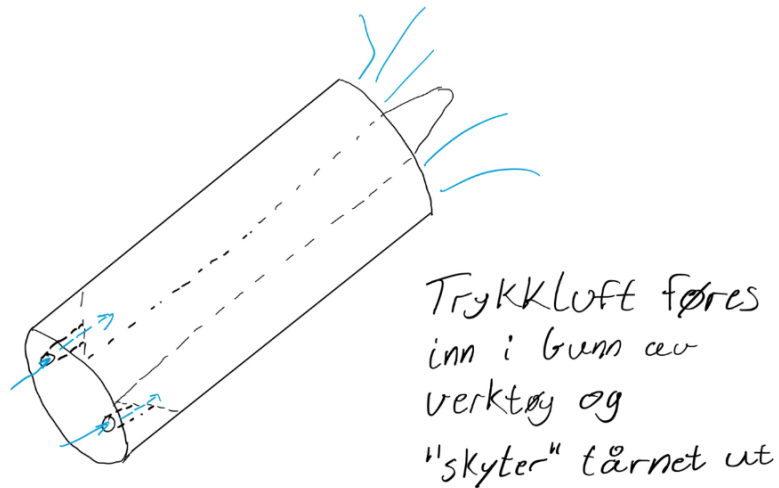
Figur 29 Varmepistol for oppvarming



Figur 30 Ovn for oppvarming



Figur 31 Vertikal ovn for oppvarming



Figur 32 Utskytning med luft for å få rondeller ut av verktøy

3.2.2 Vurderingsmatrise og konseptutvalg

Videre i fase to av idémyldringen ble det valgt ut tre alternativer for hver av de fire delene som skal vurderes i vurderingsmatrisa. Vurderingsmatrisa er satt opp med en kolonne til venstre som representerer alternativene og kolonner som representerer kriteriene. Kriteriene er funksjon (hvor godt mekanismen fungerer), automasjon, pris (kostnad), arealeffektivitet, syklustid, kvalitet (på sluttproduktet) og HMS. For hvert alternativ skal det settes en verdi som går fra én til fem der én er dårligst og fem er best. Disse verdiene summeres til slutt i kolonnen til høyre (score).

Tabell 8: Vurderingsskala for vurderingsmatrise

Vurderinger	
Meget dårlig	1
Dårlig	2
Passe	3
Bra	4
Meget bra	5

Tabell 9: Vurderingsmatrise for konsepter

	Kriterier							Score
	Funksjon	Automasjon	Pris	Arealeffektivitet	Syklustid	Kvalitet	HMS	
Innmateren								
Alternativ 1 (Trommel)	1	4	3	2	3	1	2	16
Alternativ 2 (Skyver)	5	4	3	4	4	5	4	29
Alternativ 3 (Slippemekanisme)	3	3	3	4	4	5	4	26
Ovn								
Alternativ 1 (Varmepistol)	4	3	3	5	3	3	2	23
Alternativ 2 (Varmeplate)	3	5	3	3	1	3	2	20
Alternativ 3 (Ovn)	5	5	3	2	4	5	4	28
Presse								
Alternativ 1 (Pneumatikk)	5	5	4	4	4	4	4	30
Alternativ 2 (Hydraulikk)	5	5	3	4	4	4	3	28
Alternativ 3 (Robotarm)	5	5	1	2	4	4	4	25
Utmater								
Alternativ 1 (Utskytning med luft)	4	5	5	5	4	3	4	30
Alternativ 2 (Robotarm)	5	5	1	2	4	4	5	26
Alternativ 3 (Hydraulikk-sylinder)	3	3	3	2	4	3	4	22

I tabell 10 presenteres ulike fordeler og ulemper for alternativene. Denne er laget for å ikke gå glipp av vesentlige positive eller negative egenskaper ved ideene. Det er også et ønske om å prioritere den første kolonnen, «funksjon», som det viktigste kriteriet i forhold til hvilke konsepter som tas med videre til neste fase.

Tabell 10: Tilleggs kommentarer ved mulige konsepter

Konsepter	Positive faktorer	Negative faktorer
Innmater		
Alternativ 1 (Trommel)	Lett å laste inn. Bare å kaste rondeller ned i trommel.	Tynne rondeller og rondeller kan ligge i vinkel (ikke flatt på bordet)
Alternativ 2 (Skyver)	Kan utnytte paralleller	Tynne rondeller
Alternativ 3 (Slippemekanisme)	Veldig plassbesparende	Tynne rondeller. Vanskelig å få tak mellom
Ovn		
Alternativ 1 (Varmepistol)	Raskt og teoretisk enkelt	Vanskelig å oppnå gjennomvarming og kontroll på temperatur
Alternativ 2 (Varmeplate)	Plassbesparende og billig	Vanskelig å kontrollere, må beskyttes
Alternativ 3 (Ovn)	God kontinuitet, god gjennomvarming	Tar en del plass
Presse		
Alternativ 1 (Pneumatikk)	Billig, raskt, enkelt	Støy, pressekraft
Alternativ 2 (Hydraulikk)	Trygg måte å implementere nødvendig pressekraft	Krever ekstra plass grunnet hydraulikkaggregat + tank, mulighet for lekkasje/søl
Alternativ 3 (Robotarm)	Kan utføre flere operasjoner samtidig	Dyr investering og krever flere HMS-tiltak
Utmater		
Alternativ 1 (Utskytning med luft)	Svært billig, enkelt	Nøye med HMS grunnet mulig oppbygning av innvendig trykk
Alternativ 2 (Robotarm)	Kan også brukes for selve pressingen, kan plassere et sted uten ekstra moduler	Dyr investering og krever flere HMS-tiltak.
Alternativ 3 (Hydraulikk-sylinder)	Saktere bevegelser, enkelt å separere tårn fra verktøy	Verktøy må ut, stor slaglengde under verktøyet, plassbruk og krever hydraulikkutstyr

3.2.3 Helse, miljø og sikkerhet (HMS)

Ettersom arbeidsprosessen skal være automatisert, er det gode muligheter for å opprettholde god HMS ved maskinen. Områdene hvor mennesker er involvert i prosessen er i utgangspunktet ved lasting av magasin (starten på maskinen) og utlasting/utskifting av pall (slutten av maskinen). Arbeid andre steder enn dette vil kun være av fagpersoner under for eksempel vedlikehold og reparasjoner. For å sikre en trygg og effektiv arbeidsprosess har gruppen identifisert tre hovedmål: Utvikle gode løsninger for inn- og utlasting av maskinen, sikre lett tilgjengelige lokasjoner for vedlikehold på maskinen og til slutt minimere risikoen for klemskader og andre direkte skader ved berøring. For å redusere faren for ulykker bør derfor maskinen være inngjerdet og utilgjengelig under drift. Det kan også være et alternativ å

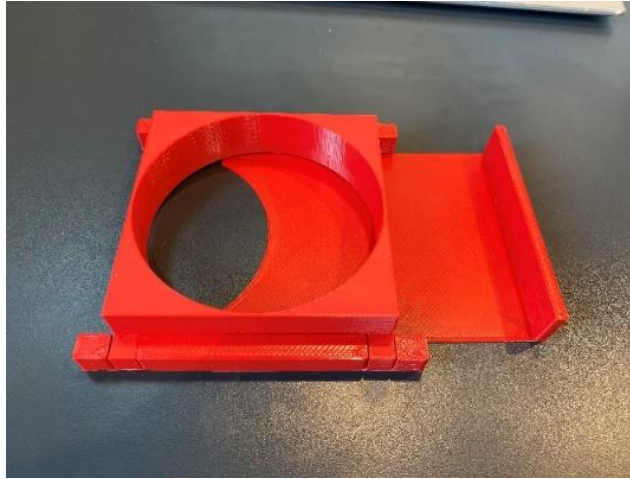
benytte lysgitter som sikkerhet der dette er aktuelt. Tiltakene vil hindre utilsiktet tilgang og dermed øke sikkerheten for operatørene.

3.2.4 Bærekraft og materialvalg

Oppgaven inneholder visse avgrensninger, som for eksempel at materialet silica-phenolic er fastsatt og ikke kan endres. Likevel er det mange faktorer innenfor bærekraft som kan påvirkes gjennom valg av prosess og materialer underveis i konstruksjonen. I løpet av konstruksjonsfasen er det et mål å minimere det nødvendige energiforbruket på maskinen ved å velge arealeffektive løsninger. Dette inkluderer strategier for optimal plassutnyttelse for å redusere oppvarming av unødvendig store områder. Det er også et mål å velge materialer til konstruksjonen med fokus på kostnad, vekt og kvalitet. Den første tanken er å benytte vanlig konstruksjonsstål som grunnmateriale, da dette er et generelt rimelig materiale med gode mekaniske egenskaper og høy kvalitet. I SolidWorks tas det derfor utgangspunkt i å benytte «AISI 1020» som materiale. Gruppen ser ikke behovet for å benytte rustfritt materiale eller andre dyrere materialer, da det ikke vurderes som nødvendig. For å spare vekt ved konstruksjonen kan det også være smart å velge aluminium på noen av delene. Ved å prioritere disse tilnærmingene under konstruksjonsfasen vil det forhåpentligvis sikre at maskinen er energieffektiv og relativt bærekraftig, samtidig som den er levedyktig og oppfyller kravene til drift og ytelse.

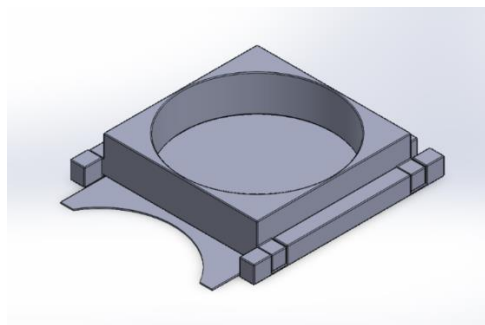
3.2.5 Innmater

Innmateren skal gi fra seg rondeller enkeltvis inn til ovnen. Gruppen valgte at konseptet med å skyve ut rondeller enkeltvis ut fra et magasin er det beste alternativet. For å sikre at mekanismen vil funke ble det 3D-printet en prototype av utskyvningsmekanismen.



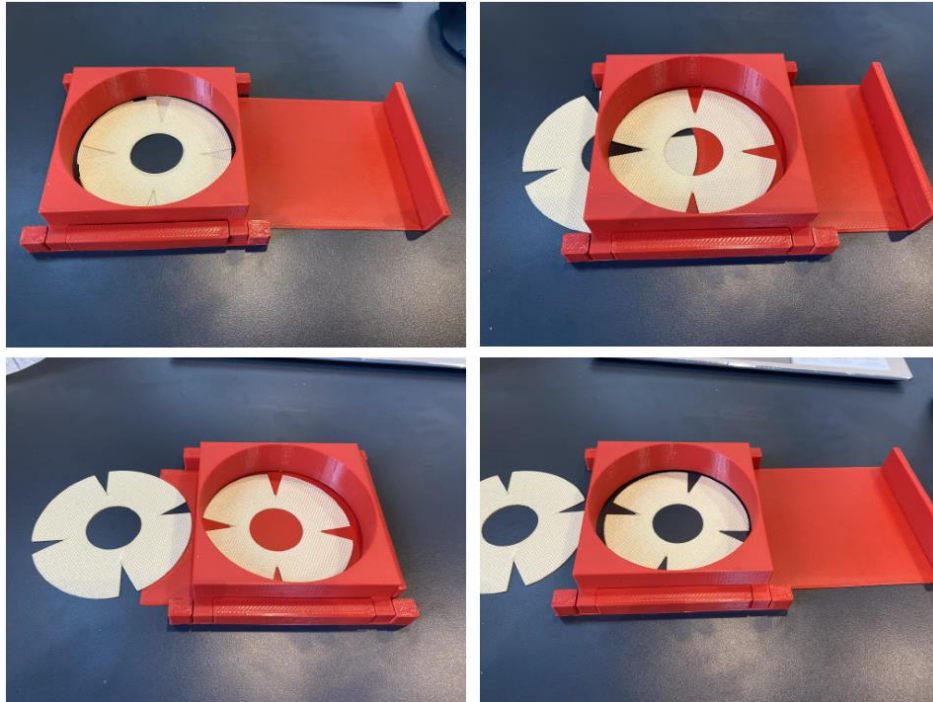
Figur 33 Prototype av utskyver, 3D-printet

SolidWorks ble brukt for å konstruere prototypen. Konseptet består av ett magasin, to bjelker og én skyveplate. Rondellene har en tykkelse på 1mm. Magasinet legges oppå bjelkene for å få 1 mm klaring over bordet. På klaringen ble det også lagt inn en toleranse på + 0.5 mm slik at det ikke kiler seg fast. Skyveplaten er 1mm tykk og skyves gjennom åpningen mellom bordet og magasinet.



Figur 34 CAD-sammenstilling av utskyver

Videre ble 3D-modellen printet og skyvemekanismen ble testet fysisk med rondeller. Testen foregår ved å først plassere rondeller i magasinet og deretter skyve skyveplaten fram og tilbake. Testen ble utført med et mindre antall rondeller, men for tilnærming av flere rondeller ble det brukt en vekt som ble lagt på toppen. Den fysiske testen illustreres i figuren nedenfor, med to rondeller.



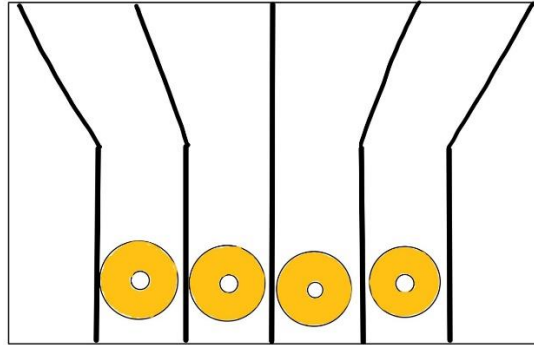
Figur 35 Prototypetest av skyvemekanisme

Resultatet fra testen viser at skyvemekanismen fungerer i praksis. Det oppsto få feil hvor det kom ut to rondeller samtidig, men dette kan skyldes for stor klaring og toleranser, samt at prototypen ikke var fastmontert i bordet. Feilen kan også stamme fra tykkelsen av skyveplaten, siden den er konstruert til å være like tjukk som rondellen. Skyveplaten bør være litt tynnere enn rondellen slik at det ikke gnisser eller treffer flere rondeller samtidig. Det må også huskes på at skyvemekanismen mest sannsynlig vil fungere enda bedre når den produseres i stål eller et stivere materiale enn plast. Det konkluderes dermed at skyvefunksjonen fungerer godt både med få og mange rondeller samtidig.

Under designfasen av innmateren var det ulike utfordringer som påvirket designet. Dersom rondellene skal skyves direkte inn i ovnen må avstanden mellom ovnen og magasinene øke for å unngå varmestrømning til magasinet. Dersom orienteringen av rondellen skal styres i innmateren påvirker dette designet av for eksempel magasinet. Etter muntlige vurderinger kom gruppen frem til at innmateren skal ta inspirasjon fra designet av prototypen. Videre ble det bestemt at en egen orienteringsmodul skal implementeres mellom innmateren og ovnen. Et av kravspesifikasjonene var arealeffektivitet og økning i hastighet, og dermed ble det bestemt å bruke en parallellføring med fire rondeller i bredden. Bakgrunnen for implementeringen av parallellføringen forklares nærmere i delkapittel 3.2.7.

Innmaterkonseptet med paralleller tar stor plass i bredden som fører til større avstand mellom

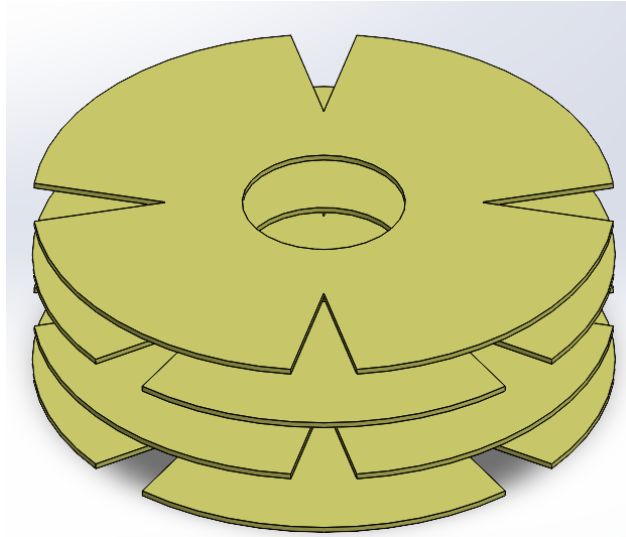
rondellene på båndet i ovn, og dermed bør rondellene snevres inn for plassbesparelse. Dermed ble det designet en plate som styrer rondellene nærmere hverandre i det de sklir inn på ovnsbåndet.



Figur 36 Skisse av plate med innsnevring av rondeller

3.2.6 Orienteringsmodul

Underveis i prosessen var det uklart om hvor orienteringen av rondeller skulle foregå. Etter diskusjon underveis ble det bestemt at modulen burde plasseres foran ovnen, fordi det var ønsket å presse rondellene så raskt som mulig etter utgangen av ovnen for å ikke miste for mye temperatur. Orienteringsmodulen sin funksjon er å orientere rondellene til riktig posisjon i forhold til kuttene. Rondellen har fire kutt i et radielt mønster, dermed må rondellene orienteres for å oppnå en tilnærming til like mekaniske egenskaper i aksiell retning etter pressing. Orienteringen av rondellene deles inn i to posisjoner, standardposisjonen og vinklet posisjon. Vinklet posisjon innebærer en radiell rotering på 45° fra standardposisjonen.



Figur 37 Orientering av rondeller

Orienteringsmodulen plasseres rett før ovnen og orienteringen skal skje mens rondellene ligger på transportbåndet. Ulike løsninger ble vurdert for hvordan roteringen skal utføres, men det valgte konseptet innebærer et kamera for å oppfatte posisjonen til rondellen, og for å bestemme rotasjon/vinkling, en griper for å rotere rondellen og lineærføringer. Griperen var en av de største utfordringene under idémyldringen. Gruppen valgte et griperkonsept med fjærbelastede pinner som fysisk kjøres ned på rondellen og roteres ved hjelp av en elektrisk motor.

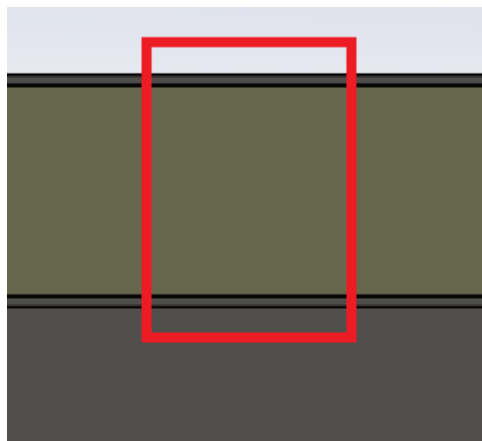
3.2.7 Ovn

Ovnen må konstrueres i forhold til kravet om en holdetid på 5 minutter i ovn, i tillegg til kravet om 15 minutters syklustid. Ved å produsere med enkeltvise rondeller liggende etter hverandre på et transportbånd innenfor effektivitetskravet, må ovnen være minimum 6 meter lang. Et annet krav er arealeffektivitet og gruppen ønsket derfor å korte ned nødvendig lengde på ovnen. Kortere ovn betyr at transportbåndet må kjøres tregere. Dette vil ha negativ konsekvens for effektiviteten og vil ikke tilfredsstillere kravet om 15 minutters syklustid. Derfor ser gruppen videre på alternativet med å implementere en parallell løsning.

For å kunne kjøre båndet tregere, men med samme effektivitet er det planlagt å kjøre 4 parallelle prosesser, men gjennom samme ovn. Dette gir rom for å øke tidsbruket på en syklus til en time. Gruppen velger allikevel å senke syklustiden på 4 tårn til 45 min, slik at hvert tredje kvarter blir det produsert 4 tårn. En fullstendig syklus på $2700s / 180 \text{ takter} = 15s$ per

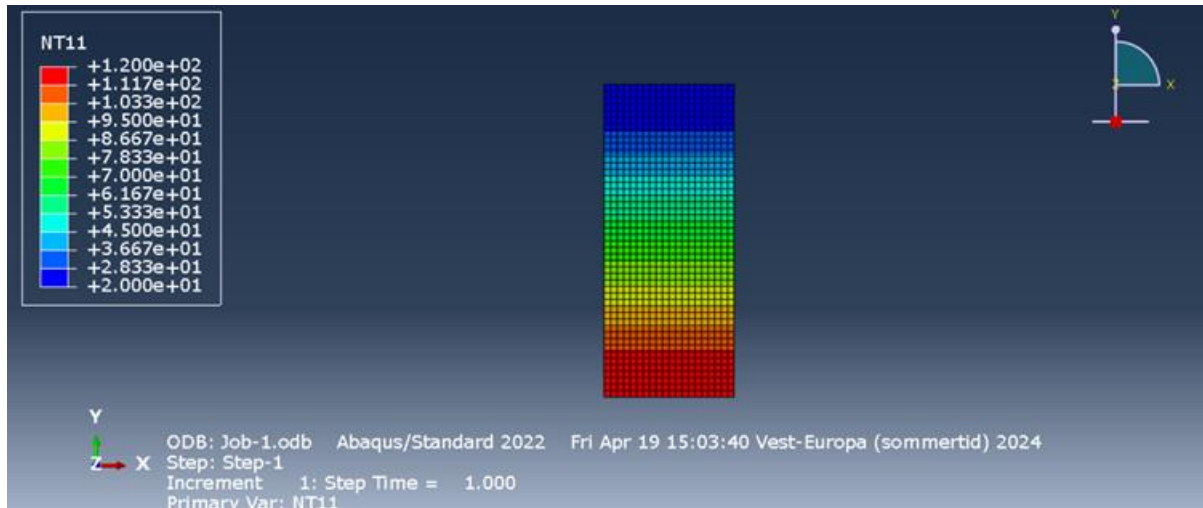
rondell. Intervallet mellom hver rondell bør altså være 15 sekunder. Diameteren av en rondell er 100mm. $100\text{mm}/15\text{s} \approx 6.67\text{mm/s}$ som vil være hastigheten på båndet. En holdetid i ovnen på 5 minutter vil da tilsvare $6.67\text{mm/s} * 300\text{s} \approx 2000\text{mm}$. Ovnen må altså være minst 2.0m lang ved bruk av 4 paralleller. Eventuelt mellomrom/pause mellom rondeller kan neglisjeres i beregningene ettersom varme fra ovn kan slippe ut langs båndet både før inngang til ovn og etter utgang fra ovn, samt at denne holdetiden og temperaturen vil gi 105°C . Eventuell justering er tenkt til å foregå med en temperaturmåler rett før den mekaniske pressa. En overflatetemperatur på $100\text{-}105^\circ\text{C}$ er ønskelig. En temperaturmåler ved utgang på ovn vil da være kapabel til å sende output slik at hastighet på bånd justeres automatisk og gjør dimensjoneringen i designet til et utgangspunkt. Ettersom varmestrømning ut av ovn langs transportbåndet vil være aktuelt, vil dette øke tiden hvor rondellene er utsatt for temperatur. Dette vil resultere i at båndet og taktiden eventuelt øker driftshastigheten i dette tilfelle.

For å eliminere varmetap andre steder enn i inn- og utgang av ovn implementeres det isolasjon i veggene på ovnen. For å sjekke at ovnen inneholder nok isolasjon ble det fremstilt en varestrømsanalyse av et utsnitt av vegg. Simuleringen ble utført i 2D av et utsnitt med tynnplateveggene og isolasjonen i midten av glassfiber (Industrial-oven, 2024) med temperatur på 20°C ved kald side og 120°C på varm side. Materialeegenskapene for stål og glassfiber er generelle verdier hentet fra nettet (MATWEB, u.d.) (MATWEB, u.d.) (Doiron, u.d.).



Figur 38 Visualisering av hva som simuleres i varmeanalysen av isolasjon i ovn

Figuren ovenfor visualiserer hva simuleringen inneholder, altså et utsnitt av isolasjonen sammen med tynnplateveggene i stål på utsiden og innsiden av ovnen.



Figur 39 Resultat fra varmestrømsanalyse av vegg i ovn [°C]

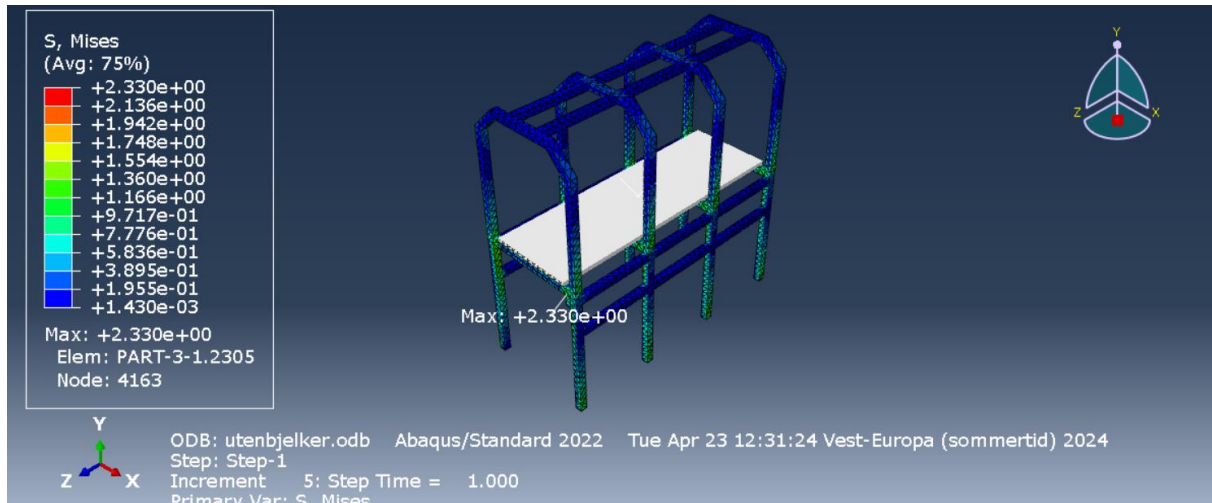
Resultatene fra simuleringen er etter «steady state». Det vil si at temperaturen ikke lenger endrer seg. Hvis ovnen er påskrudd over en lengre periode vil temperaturen på utvendig overflate av ovnen fremdeles være romtemperatur. Dette oppfyller HMS-krav om at eventuell berøring av maskin under drift og anses som trygt.

Dimensjonering av rammeverk på ovn

For å sjekke at rammeverket tåler belastningen den blir utsatt for, simuleres dette i Abaqus. Rammen til ovnen antas å oppleve størst belastning. Dette er fordi vekten til transportbåndet og egenvekten er størst ved denne modulen, samt andre ting som for eksempel tynnplater, varmeelementer og elmotorer. Påkjenningsene rammen bærer i simuleringen er egenvekt i tillegg til transportbåndet med tilhørende utstyr. Andre belastninger som vekt av rondeller neglisjeres i simuleringen ettersom betydningen er svært liten.

Vekten av transportbåndet simuleres til å ligge jevnt fordelt utover anleggsflaten på rammeverket til kun ovnen. I praksis vil kreftene også være fordelt til rammeverket for orienteringsmodulen. Vekten av transportbåndet med tilhørende utstyr estimeres ved å definere det som stål i SolidWorks. Dette vil gi en litt høyere masse enn realiteten, men det resulterer i at analysen blir konservativ.

I følge SolidWorks er totalvekten av transportbåndet 215kg. Dette implementeres i Abaqus til et referansepunkt som styrer en flate på størrelsen av transportbåndet og dermed fordeler vekten utover en flate.



Figur 40 Resultat fra statistisk analyse for rammeverk under belastning

Simuleringen er gjort ved å implementere massetetthet i materialet til rammen, og den totale massen på båndet utover en analytisk flate (hvit plate, ref. figur 41). Ved å bruke gravitasjonsfunksjonen med $9,81\text{m/s}^2$ i y-retning, med beinene til rammen låst fast, resulterer dette i en realistisk konstruksjonsanalyse. Spenningsresultatet viser en Von Mises spenning på 2,3 MPa, og med en flytegrense på materialet til rammen på 355 MPa (Wanlei steel pipe, u.d.).

Rammeverket anses derfor til å være mer enn sterk nok for sitt bruk med godt rom for ekstra belastning grunnet en høy sikkerhetsfaktor på 154 mot flyt.

3.2.8 Mekanisk presse

En viktig del av produksjonsprosessen er selve pressa der de oppvarmede rondellene skal presses ned til ønsket geometri, med 45° vinkel. Det er naturlig å velge mellom en pneumatikkpresse og hydraulikkpresse, og de har hver sine fordeler og ulemper. En pneumatikksylinder er relativt billig og krever mindre plass sammenlignet med en hydraulikksylinder, grunnet behov for ekstra hydraulikkaggregat og utstyr. Luftsylindere er også ofte raskere i bevegelsene og er mer vedlikeholdsvennlige. Ved hjelp av disse refleksjonene sammen med konseptvurderingsmatrisene velger gruppen å gå videre i designfasen med en sylinder styrt av pneumatikk. Etter å ha funnet tilgjengelige sylindere fra FESTO.com med lang nok slaglengde var det et behov for å vurdere tilgjengelig teoretisk pressekraft og tilhørende funksjoner. Et eksempel er sylinderen av typen DSBC-32-320-PPSA-N3 og ifølge databladet klarer denne å presse 483N i positiv retning og 415N i negativ retning ved et arbeidstrykk på 6 bar med luft (FESTO, 2024). Det finnes både svakere og

sterkere sylindere, men total størrelse og vekt følger naturligvis deretter. Dimensjonerende faktor for sylindere er slaglengden. Derfor vurderes denne sylindere som god nok, da det kun er estimert et behov for omtrent 70N per rondell ifølge simuleringer og fysiske tester. Ved å plassere sylindere med god opplagring og innfesting på begge sidene av verktøyene antar gruppen at det vil være en god løsning.

Det er et behov for at rondellene klistrer seg godt sammen under pressingen og beholder sin gitte form, og det er viktig å unngå unødvendige forurensninger og luftbobler underveis i prosessen. Derfor er planen å implementere luftkoblinger i bunn av verktøyet som kan suge ut luft nedenfra kontinuerlig mens maskinen er i drift. Luftkoblingene med utsuging vil bidra til å oppnå mer kontinuitet i produktet og et bedre sluttresultat.

Den automatiserte pressa krever mange deler og komponenter, der mange av de er konstruert selv, men det vil også være et behov for å importere standarddeler som skruer, lagere og andre sylindere i tillegg. Alle importerte deler er kildehenvist i en liste som kommer senere i rapporten.

3.2.9 Utmater

Etter at 180 rondeller er presset sammen i den mekaniske pressa er neste utfordring å få det ferdige tårnet ut av verktøyet. Ettersom verktøyet og pressa står fastmontert i grunnramma må det finnes en løsning for å enten få verktøyet eller rondellene ut av selve maskinen. Ut ifra vurderingsmatrisen (ref. tabell 9) er det konkludert å gå videre med konseptet som innebærer utskytning med luft. Fra konstruering av den mekaniske pressa er det allerede et ønske om utsuging av luft fra verktøyene under pressingen. De samme luftkoblingene kan derfor brukes igjen, men i stedet for innsuging kan disse blåse tårnene rett ut fra verktøyet. Dette er en svært enkel, effektiv og billig metode for å skille tårnene fra verktøyet før maskinen kan operere i en ny syklus med nye tårn. Siden konseptet innebærer luftblåsing og små toleranser i verktøyet er det viktig å ta hensyn til at det kan bygge seg opp et innvendig trykk i verktøyet, om tårnene ikke sklir lett ut. Denne problematikken må det tas hensyn til når mottaket av tårnene konstrueres. En umiddelbar løsning er å bygge inn mottaket av tårnene (med solide tak og vegger) slik at utskytningen av tårnene ikke kan komme til skade på utstyr eller personell.

3.2.10 Importerte deler fra Internett

Underveis i konstruksjonen av maskinen og komponentene har det vært nyttig å importere standarddeler fra Internettet. Dette er en effektiv og smart måte å konstruere på, da det er mulig å skaffe både pris på delene og at delene allerede følger standarder som er mye brukt i industrien fra før. Denne måten å konstruere på gjør også at det går mye raskere fra en idé til et sluttprodukt. Alle de importerte delene er:

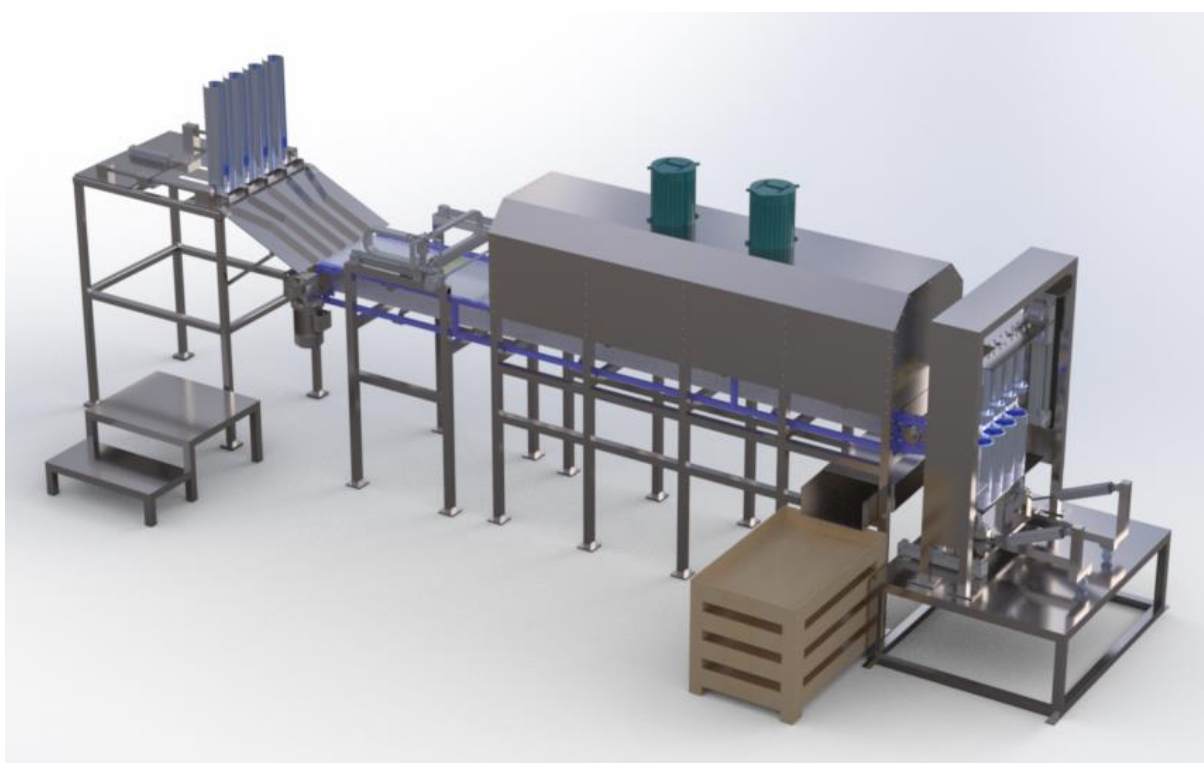
1. Transportbånd, hentet fra GRABCAD (Goat, 2024).
2. Vifte, hentet fra GRABCAD (BERROYA, 2023).
3. El-motor, hentet fra GRABCAD (Madiwal, 2024).
4. Mann for visualisering av størrelse på konstruksjon, hentet fra GRABCAD. (CADNurd, 2023).
5. Pneumatikksylindere til vippeplate, hentet fra FESTO (FESTO, 2024)
6. Posisjonssensor på utgang av ovn, hentet fra FESTO (FESTO, 2024)
7. Pneumatikksylinder til innmater, hentet fra FESTO (FESTO, 2024)
8. 3-akset orienteringsmodul, hentet fra FESTO (FESTO, 2024)
9. Lagerbukker for opplagring ved rotasjon på mekanisk presse, hentet fra SKF (SKF, 2024)
10. Luftkoblinger for vakuum og lufttrykk under verktøy, hentet fra FESTO (FESTO, 2024)
11. Luftsylinder for horisontal bevegelse mellom ovn og presse, hentet fra FESTO (FESTO, 2024)
12. Luftsylinder for låsing av verktøy i vertikal presseposisjon, hentet fra FESTO (FESTO, 2024)
13. Luftsylinder for pressing i den mekaniske pressa, hentet fra FESTO (FESTO, 2024)

14. Luftkobling for låsesylinder for verktøy i vertikal presseposisjon, hentet fra FESTO (FESTO, 2024)
15. Gaffel (Clevis foot) til montering av rotasjonssylinder, hentet fra FESTO (Festo, 2024)
16. Leddet øyestang (Rod eye) til montering av rotasjonssylinder, hentet fra FESTO (Festo, 2024)
17. Luftsylinder for rotasjon av verktøy, hentet fra FESTO (FESTO, 2024)
18. Leddet flens (Swivel flange) for rotasjonssylinder, hentet fra FESTO (FESTO, 2024)
19. Trillehjul til den mekaniske pressa, hentet fra GRABCAD (Alcantara, 2023)
20. Standard skruer, muttere og andre deler er hentet ut fra SolidWorks Toolbox inne i programmet.

4 Sluttresultat

I dette kapittelet presenteres konstruksjonen som er sluttresultatet for prosjektet. Dette innebærer hele løsningsforslaget, prosessdelene hver for seg og til slutt maskinens prosessrekkefølge.

4.1 Hele maskinen



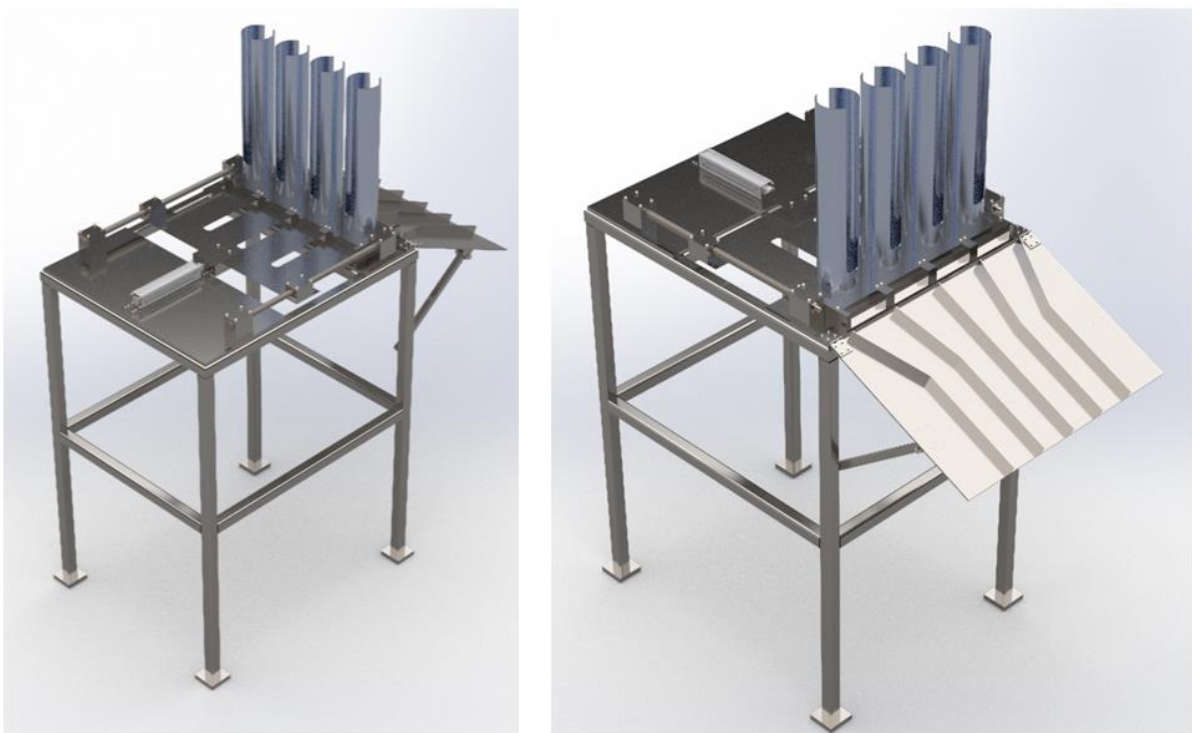
Figur 41 Hele maskinen, behandlet med visualiseringsverktøy i SolidWorks

Den automatiserte maskinen oppnår en taktid på 15 sekunder for hvert mekaniske press. Denne produksjonshastigheten tilsvarer en produksjonstid på 45 minutter der det produseres 4 komplette tårn. I snitt tilsvarer dette et fullført tårn omtrent hvert 11. minutt som er 4 minutter raskere enn kravet på 15 minutter. Ved kontinuerlig produksjon kan maskinen kjøre ubemannet i 2 timer og 15 minutter, dette oppfyller kravspesifikasjonen om ubemannet produksjon. Maskinen produserer 12 tårn i løpet av den ubemannede driftstiden. Løsningsforslaget av maskin innebærer at det kun er interaksjon med maskinoperatør ved inn og utlasting av rondeller og tårn. Det anbefales derfor å fylle opp magasinene annenhver time,

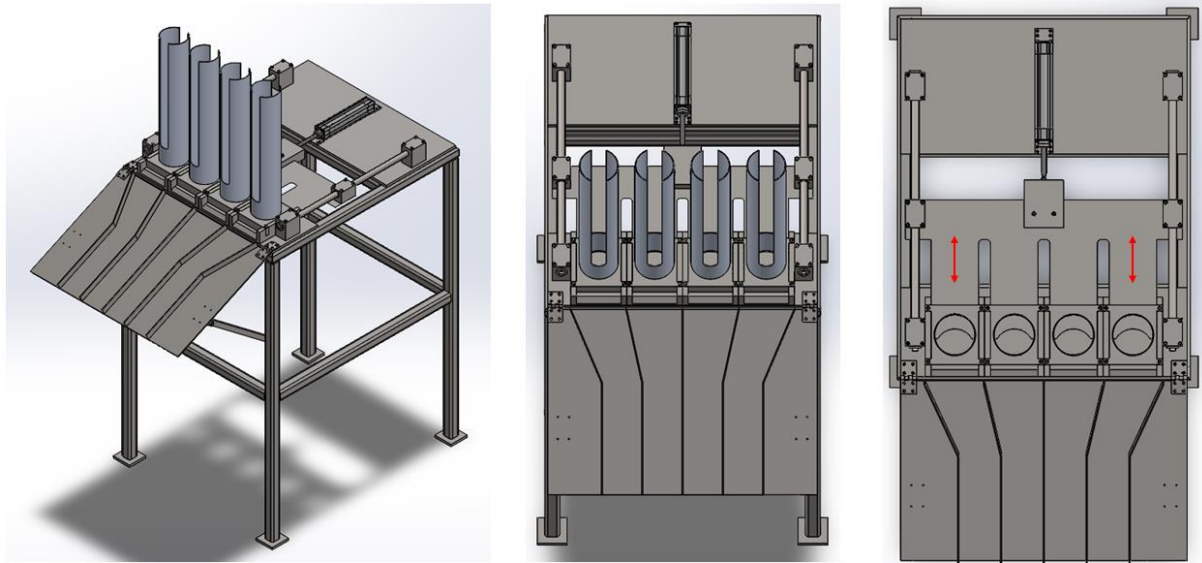
slik at magasinet ikke går tomt under planlagt drift. Maskinen opptar et gulvareal på omtrent $6.5 m^2$ og er godt innenfor gruppens mål om arealeffektivitet. Kostnaden av maskinen er estimert til omtrent 330 000 kr gjennom estimerte verdier for alle enkeltkomponenter.

4.2 Delprosesser

4.2.1 Innmater

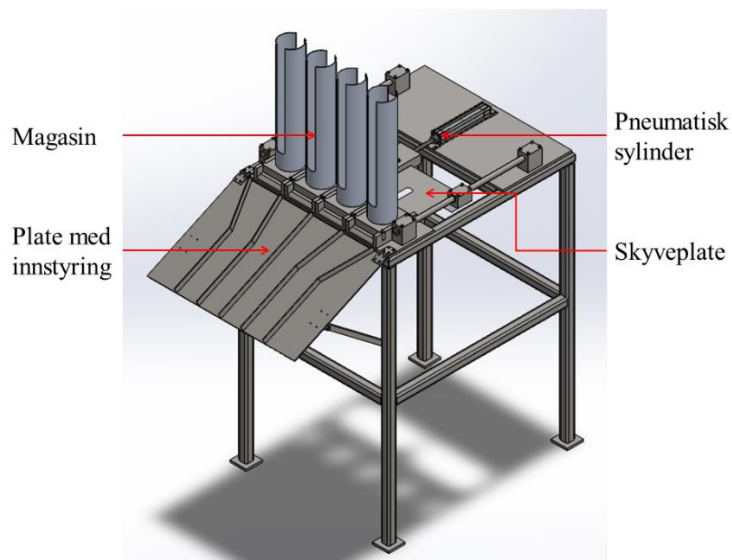


Figur 42 Innmater foran og bak



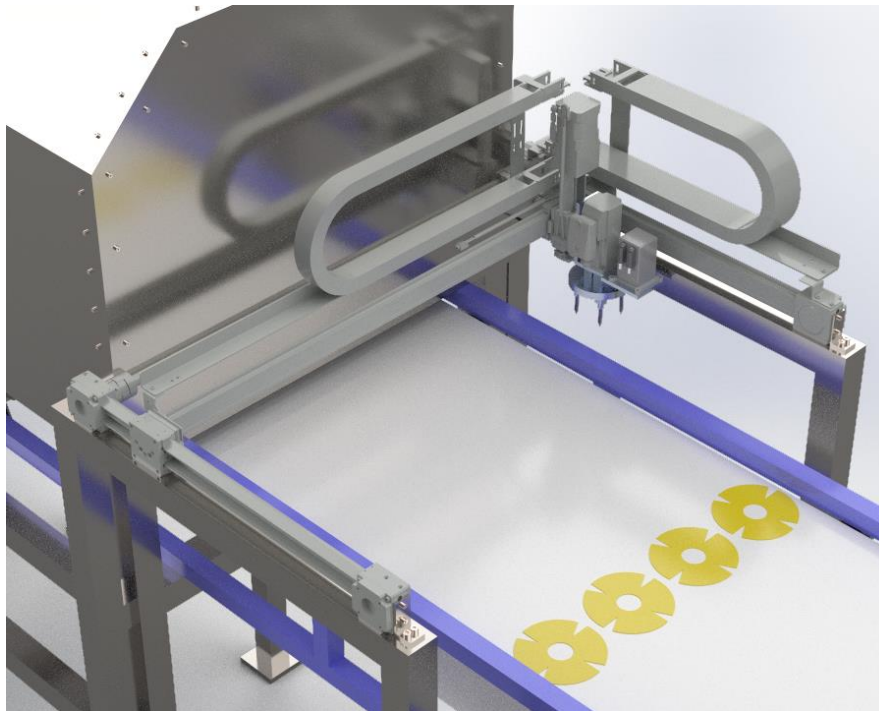
Figur 43 Bilder av innmateren

Innmateren består av en ramme, fire magasiner, en skyveplate for å skyve fire rondeller, en vinklet plate med innsnevring, en pneumatisk sylinder og to styrepinner. Magasinet på innmateren fylles opp av maskinoperatør og funksjonen til konstruksjonen er å mate rondeller ned til transportbånd for videre prosess.



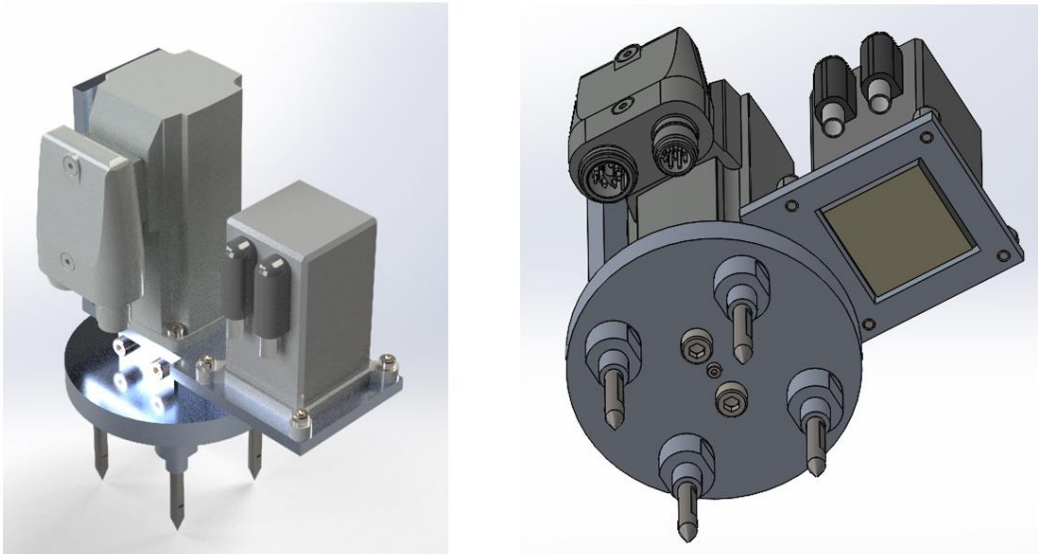
Figur 44 Innmateren med hoveddeler

4.2.2 Orienteringsmodul



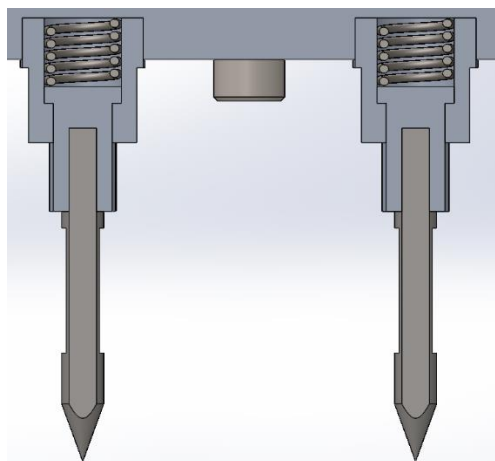
Figur 45 Orienteringsmodul før ovn

Orienteringsmodulen består av en 3-akset lineærføring, en servomotor for å rotere griperen, en griper og et kamera. Funksjonen til orienteringsmodulen er å lese av og korrigere posisjonen og orienteringen til alle rondellene før de sendes inn i oppvarmet ovn.



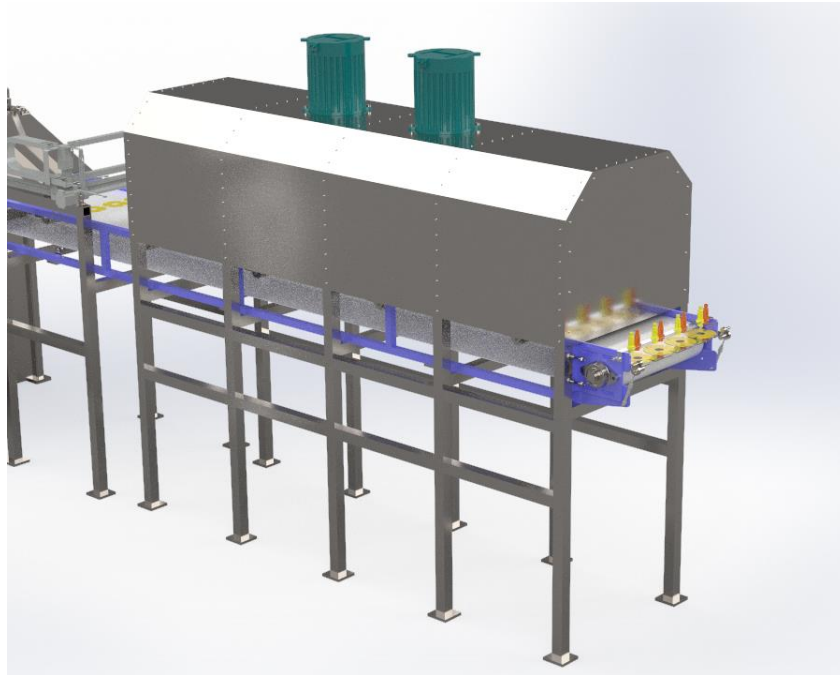
Figur 46 Griper med rotasjon og kamera for avlesning

Fjæring ble lagt inn i pinnene som treffer rondellen for å unngå og presse for hardt ned i rondeller og transportbånd. Fjæringen vil spare maskinen for unødvendig slitasje, potensielle rifter eller riper og neglisjerer ulikhet i høyde av spissene.

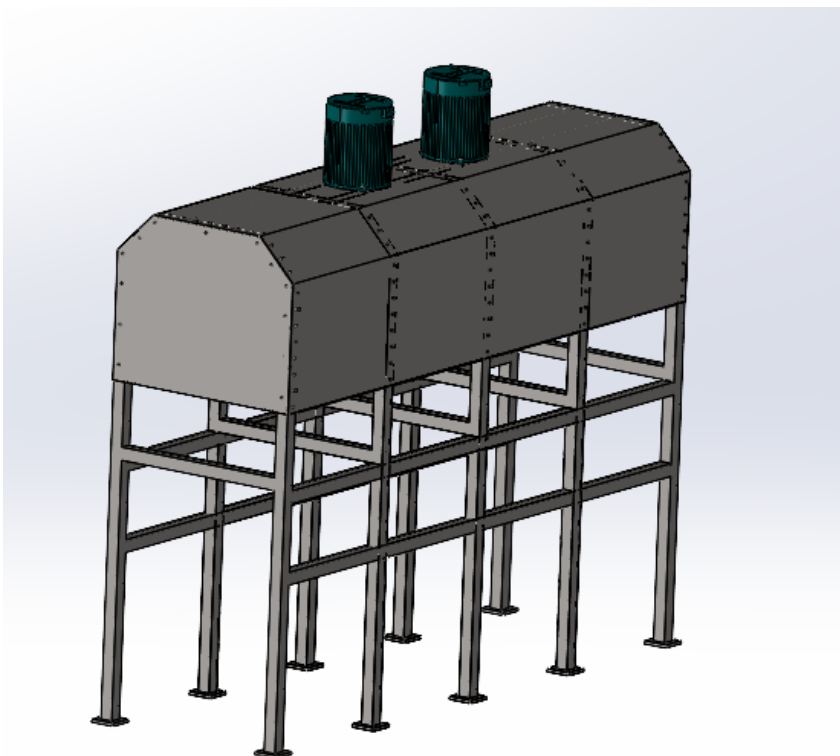


Figur 47 Utsnitt av griper med fjæringsmekanisme

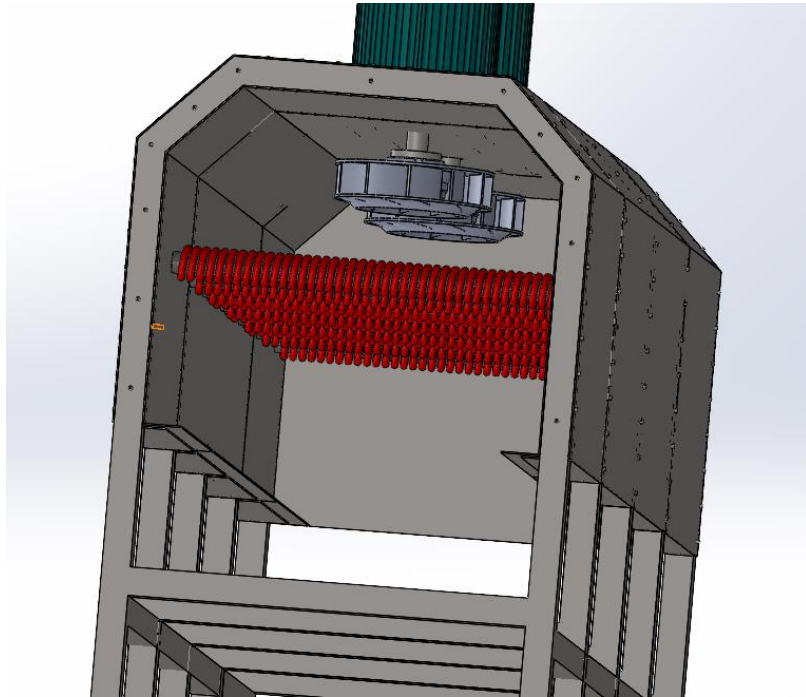
4.2.3 Ovn



Figur 48 Ovn, transportbånd og diverse utstyr

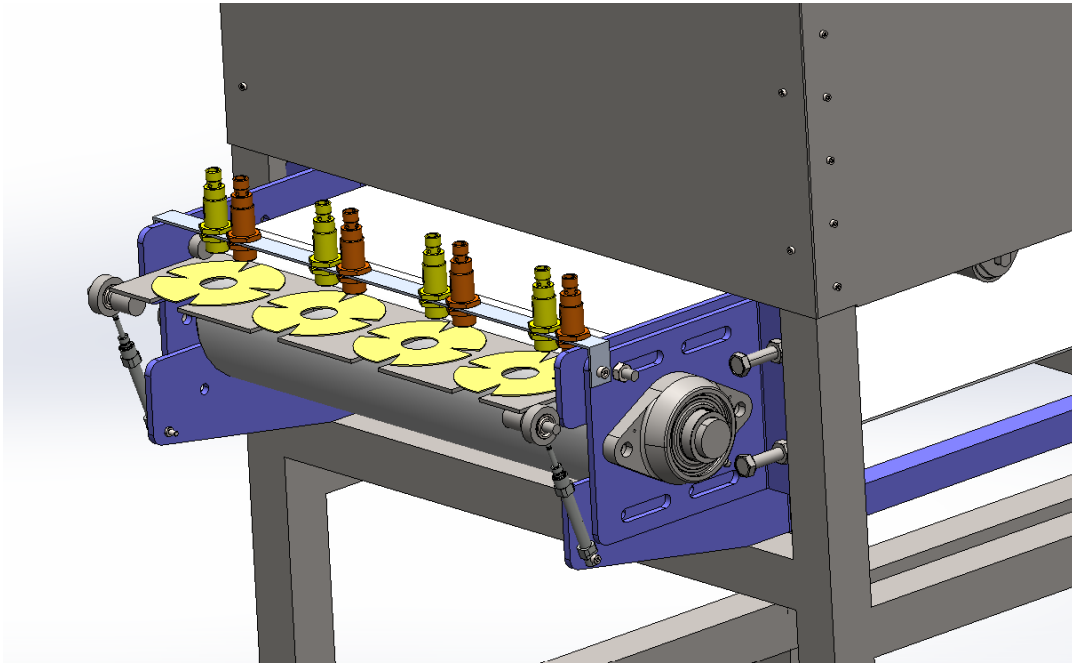


Figur 49 Ovn og vifter isolert sett



Figur 50 Utsnitt av ovn med varmeelementer og vifter

Ovnen består av rammeverk, deksler, isolasjon, motor, vifter og varmeelementer. Viftene har som oppgave å gi god sirkulasjon i ovnen, slik at temperaturen holdes jevn. Ovnen skal holde en temperatur på 120 °C. Etter utgang fra ovnen lander rondellene på en holdeplate som vippes med hjelp av luftsylindere. Disse sylindere aktiveres når alle fire posisjonssensorene gir signal. Ved siden av posisjonssensorene står temperaturmålere. Disse måler temperaturen på de fire rondellene og sender output til et program som optimaliserer hastighet og temperatur på ovn til å samsvare med en ønsket inputverdi for overflatetemperatur på rondellene ved utgang av ovn.



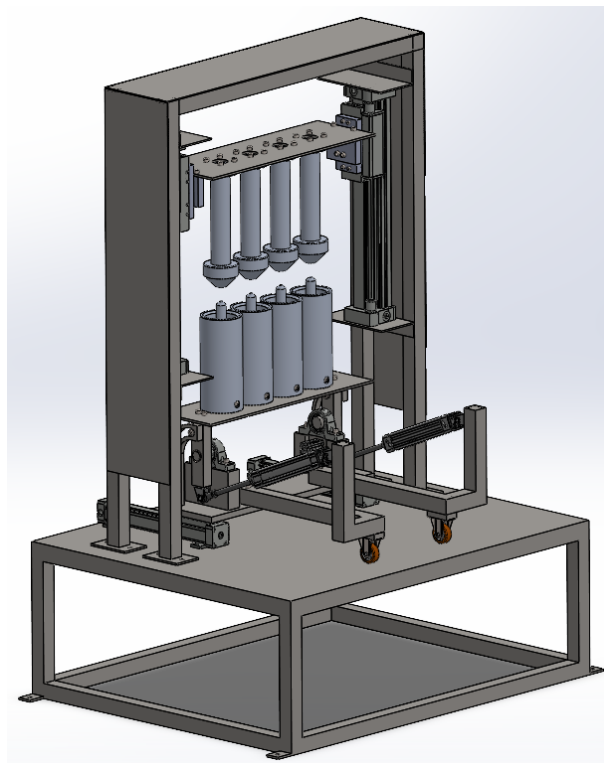
Figur 51 Slutten på ovn med sensorer og vippemekanisme

I 3D modellen er sensorene visuelt helt like, da dette kun er for å visualisere potensiell posisjon og størrelse. Planen er å benytte både temperatursensor for logging av temperatur før press og posisjonssensor for å sikre at rondellene ligger riktig før verktøyet henter de.

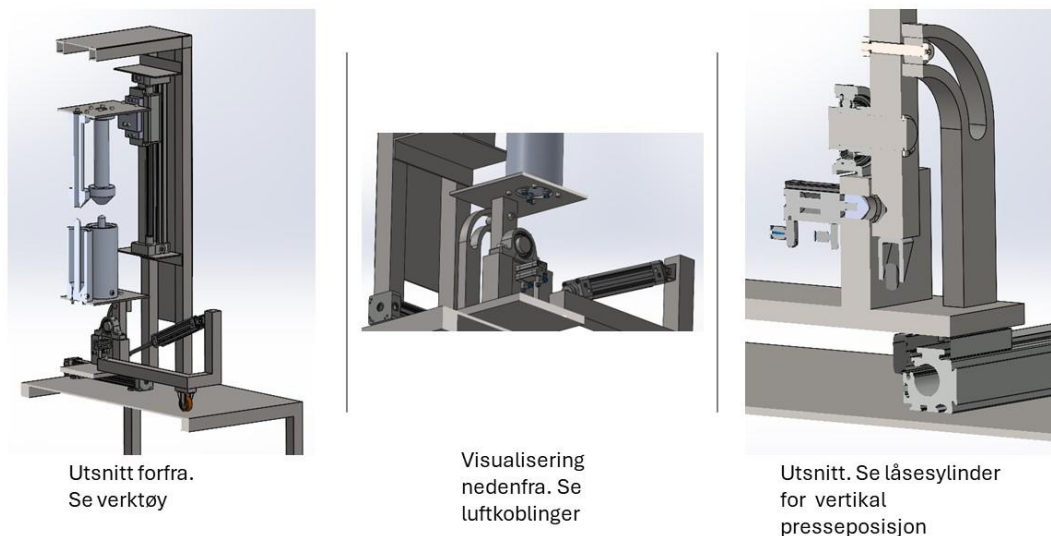
4.2.4 Mekanisk presse



Figur 52 Mekanisk presse behandlet med visualiseringsverktøy



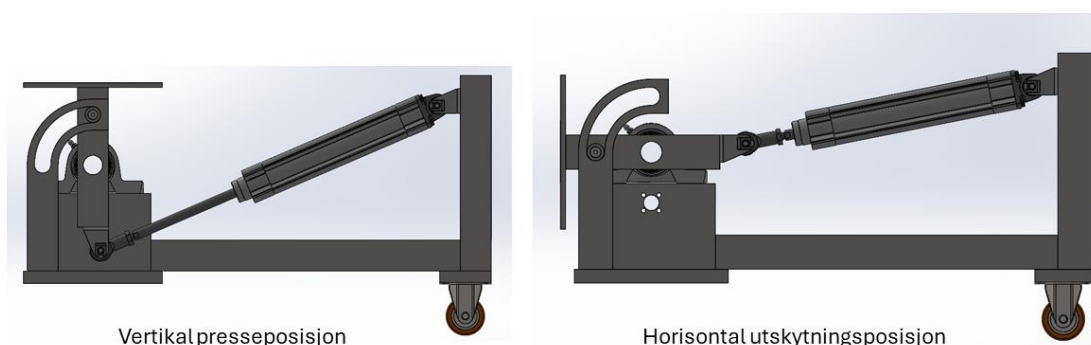
Figur 53 Mekanisk presse med tilhørende utstyr



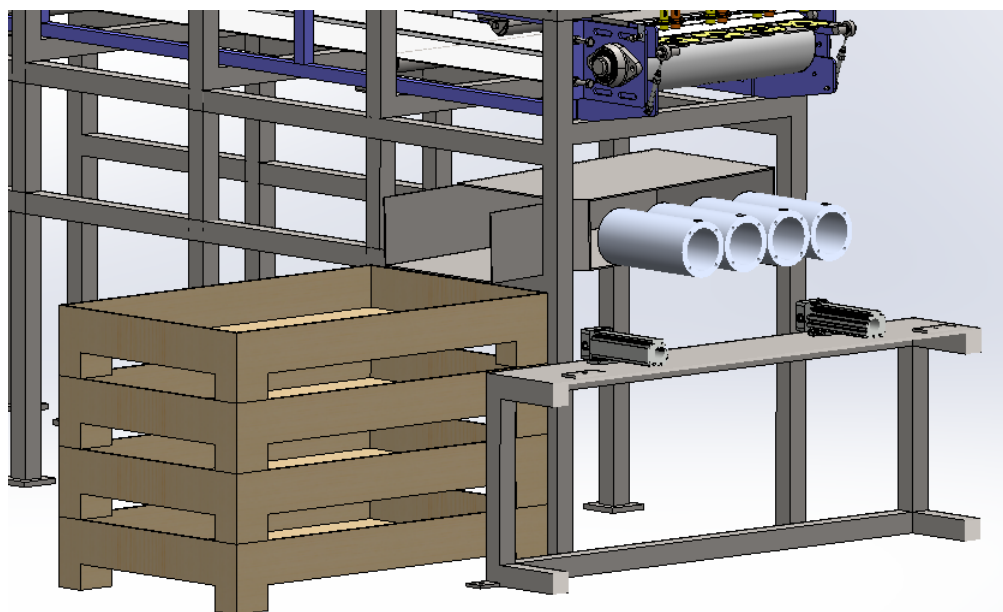
Figur 54 Nærmere bilder av mekanisk presse

Den mekaniske pressa inneholder fire parallelle sett med presseverktøy. Det skal være mulig å montere alle delene i konstruksjonen selv og løsningene for vedlikehold eller eventuelle tilpasninger skal være rimelige. De vertikale pressesylindrene har en pressekapasitet på 483N og er montert med integrerte føringer for bedre stabilitet og opplagring. Siden denne prosessen drives av pneumatikk og sensorer er det mulig å kjøre med høy produksjonshastighet.

4.2.5 Utmater



Figur 55 Vippemekanisme for pressing og utskytning



Figur 56 Utsnitt av posisjon for utmating

Når totalt 180 rondeller er presset sammen roterer verktøyet ned til horisontal posisjon for utmating. Som nevnt tidligere ble konseptet med utskytning med trykkluft valgt for å skille ferdigpressede tårn fra verktøyet og ut av maskin. Figuren ovenfor viser posisjonen der denne prosessen foregår.

4.3 Prosessrekkefølge på maskin

Innmater

1. Rondeller skyves ut fra magasinet med et intervall på omtrent 15 sekunder.
2. Rondeller innsnevres og lander på transportbåndet.

Orientering

3. Kamera oppdager rondell og leser av orientering av modell.
4. Programmet forteller om det er nødvendig med rotering/forflytning, og den 3-aksede modulen med tilhørende utstyr sørger for eventuelle korrigeringer.

Oppvarming

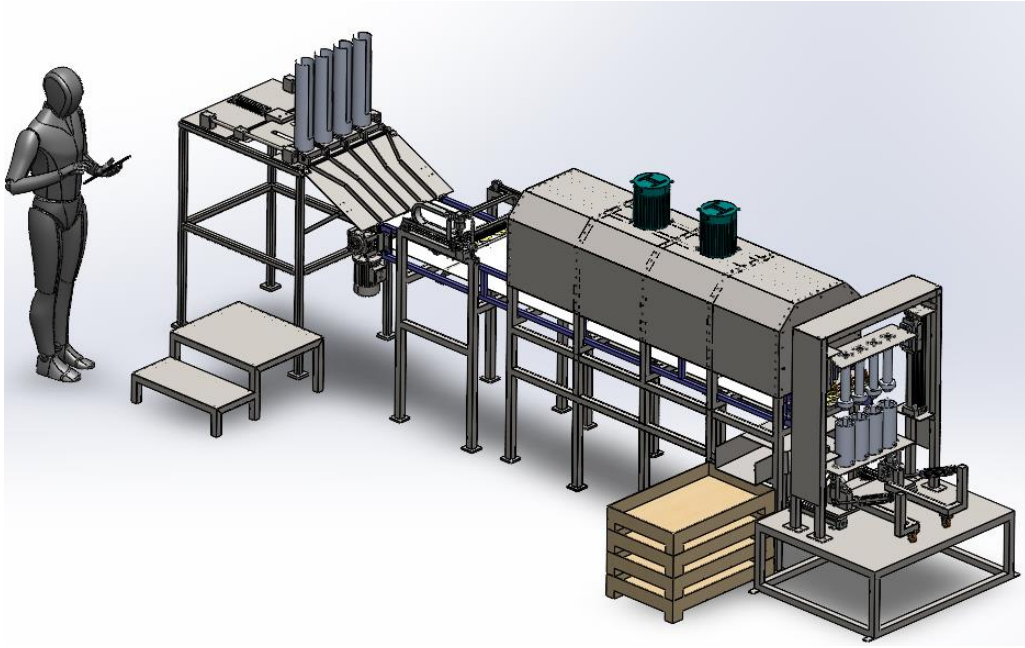
5. Rondeller føres inn i ovnen av transportbåndet.
6. Rondeller kommer ut av ovnen og lander på holdeplaten.
7. Sensor leser av overflatetemperatur på rondell for logging og eventuelle avvik. Ved avvik kan både settemperatur og hastighet på bånd justeres.

Pressing

8. Låsesylindere for vertikale verktøy er aktive, og ventil står i posisjon for vakuum i bunn av verktøyet.
9. Vippeplate på ovn senker rondell fra holdeplate ned til konet verktøytupp.
10. Verktøy flyttes horisontalt til posisjon for pressing.
11. Pressesyndere går ned og sørger for ønsket geometri før retur til startposisjon. Pressekraften kan justeres og tilpasses enkelt med trykkregulator/struping.
12. Verktøy flyttes tilbake til henteposisjon ved ovn og gjør seg klar for ny syklus.
 - Punktene ovenfor repeteres 180 ganger til man har et ferdigpresset tårn, før det går videre til neste steg i prosessen.

Utlasting

13. Låsesylindere for vertikal låsing av verktøy åpner, og vippesylindere aktiveres slik at verktøy roteres til horisontal posisjon.
14. Pneumatikkventilen med vakuum skifter posisjon og blåser nå ut trykkluft.
15. Tårnene av rondeller blåses ut på et skråbrett og ruller forsiktig ned på pall for oppsamling.
16. Verktøy roteres opp igjen til vertikal posisjon og låses, ventil sjalter til vakuum og presseverktøyet kan skyves horisontalt til henteposisjon ved ovn igjen for ny syklus av nye tårn.



Figur 57 Hele maskinen med referanseperson på 180cm

5 Diskusjon og analyse av resultater

I følgende kapittel har gruppen tolket og analysert delresultater og sluttresultater, drøftet implikasjoner, identifisert begrensninger og foreslått videre anbefalinger for løsningsforslaget.

5.1 Diskusjon av delresultater

Ved beregninger av materialelegenskaper bruker gruppen herdet materialelegenskaper for å finne volumfraksjonen. I praksis vil volumfraksjonen av fibre være høyere i herdet materiale enn i uherdet grunnet for eksempel utsmelting av resin. Dette er ikke tatt hensyn til i beregningene og kan medføre små feil som gruppen antar er små nok til at de kan neglisjeres.

Ved oppvarmingstesten oppdaget gruppen at et metallverktøy stjeler mye varme fra rondellene ved pressing. Det er heller ikke ønskelig med et verktøy i plast da gruppen observerte plastpartikler mellom rondellene ved oppstart/infomøte med oppdragsgiver i starten av prosjektet. Derfor anbefales et varmebeskyttende belegg som bør legges på presseverktøyet og bunnen av verktøyet.

Varmestrømsanalysen viste seg å være til dels overflødig ettersom de fysiske testene av oppvarming sammen med viskositetsdiagrammet ga en god nok forståelse til å kunne trekke en konklusjon for nødvendig temperatur og holdetid. Simuleringen ble allikevel nyttig, for å få fremstilt riktig temperatur i den mekaniske analysen, slik at nedpressingssimuleringen foregikk i oppvarmet tilstand.

I beskrivelsen av oppgaven fra Nammo står det at det blir brukt håndkraft til pressingen. Den mekaniske analysen har blitt brukt for å tallfeste den nødvendige kraften, selv om gruppen skjønte omtrent hvor mye kraften ville ligge på.

Delresultatene har gitt en tallfestet konklusjon av de nødvendige prosessparameterne som anbefales å bruke som utgangspunkt ved eventuell videreutvikling.

5.2 Diskusjon av sluttresultat

Effektivitet: Produksjonshastigheten til løsningsforslaget er fire ganger så raskt som nåværende situasjon. Etter forpressemaskinen går produktet videre til en ny prosess, og denne prosessen er foreløpig mer tidkrevende. Mellom forpressingen og neste prosess vil det oppstå en flaskehals. Løsningsforslaget gir dermed rom for å utarbeide raskere produksjon andre steder i produksjonslinjen.

Materialvalg: På transportbåndet kan det for eksempel velges mellom silicon-bånd slik at rondellene ikke klistrer seg fast eller et stål-bånd. Gruppen anbefaler at det utnyttes et stålband som holder varme bedre, men det kan være lurt å smøre inn båndet med for eksempel teflon slik at rondellene ikke klistrer seg fast til transportbåndet.

Rammeverket i konstruksjonen er valgt til å være i standard 40x40 firkantør i stål. Dette gjøres på grunnlag av pris og tilgjengelighet. Gjennom styrkeanalysen til rammen kan man se at dimensjonen på firkantørene kan senkes for å spare på total kostnad og vekt. Ved produksjon av modulene anbefaler derfor gruppen at bedriften sjekker hva som allerede finnes tilgjengelig på lageret.

Materialvalg av magasinrørene i innmaterialet er relativt fritt. Her er plast et godt alternativ dersom vekt og kostnad vektlegges. To gode forslag til type plast er polypropylen (PP) eller polyvinylklorid (PVC). Materialene er termoplaster og kan derfor resirkuleres, samtidig som de har lav kostnad sammenlignet med for eksempel aluminium.

HMS: Inngjerding er ikke konstruert i 3D-modellen. Etter samtale med bedriften og fremvisning av resultatet mente bedriften at dette ikke var nødvendig. Gruppen velger allikevel å anbefale at maskinen innelukkes i bur eller ved hjelp av lysgitter, slik at eventuelle ulykker ikke oppstår. Det anbefales spesielt ved skyveplaten i innmaterialet og pressen, ettersom det kan være fare for klem og kuttskade ved disse operasjonene.

Arealforbruk: Løsningsforslaget opptar et gulvareal på omtrent 6.5 m^2 og er godt innenfor gruppens mål om 8 m^2 . Selv om gruppen hadde et mål om mest mulig arealeffektivitet, ble dette likevel tallfestet. Gruppen kunne derfor teoretisk brukt den resterende plassen til å øke effektiviteten av maskinen ved å øke lengden av ovnen. Det bør også nevnes at et elektrisk anlegg vil oppta noe av denne plassen. Eksempel på ting som ikke er med i konstruksjonen

som opptar gulvareal er strømskap og kontrollpanel. Ved eventuell inngjerding er dette deler av konstruksjonen som står på utsiden. Det betyr at totalt 8 m² raskt opptas etter implementering av et elektrisk anlegg.

Kvalitet og kontinuitet: Ettersom maskinen selv kan styre settemperatur og hastighet ved kontinuerlig drift, vil maskinen opprettholde like prosessparametere for hvert tårn og rondell. Dette tilsier at kun utvendige og ikke-kontrollerbare parametere som for eksempel variasjon i materialet av rondell kan være årsaken til eventuell variasjon i kvalitet. Det anses at løsningsforslaget svarer på kravet om kvalitet og kontinuitet. Når det gjelder pressekraft anbefaler gruppen å se videre på metoder for å kunne logge/kontrollere den utførte pressekraften.

Ettersom temperaturen og holdetiden på rondellene måles i utgangen av ovnen, burde det være justeringsmuligheter på dette. Justeringen vil kunne hjelpe til med å stille inn maskinen til å oppnå maksimal effektivitet mot kvalitet på produktet, med utgangspunkt fra verdiene i oppgaven på 120°C og 5 minutter. Eksempelvis kan varmen tilføres rondellene gjennom restvarme fra båndet, og holdetiden vil kunne senkes.

Vedlikehold av maskin: Maskinen er konstruert med hensyn på vedlikehold. Det er valgt gode løsninger for tilgjengeligheten av slidedeler og utstyr som kan kreve vedlikehold, slik som for eksempel lokasjon av lagere og flittig bruk av enkle luftsylindere med hurtigkoblinger.

Brukervennlighet: Brukervennligheten av maskinen anses som god. Dette begrunnes i kravspesifikasjonen hvor kun en operatør er nødvendig ved innlasting av rondeller i magasin, og ved henting av pall med ferdige tårn. Dette vil kun være nødvendig å gjøre med intervaller på 2 timer og 15 minutter, hvor kravet fra oppdragsgiver var på minst 1 time.

Bærekraft: Dagens manuelle prosess fører til unødvendig mange avvik grunnet for mange ukontrollerbare variabler, og et av målene med oppgaven var å redusere disse som en underkategori av «forbedret kontinuitet». I tillegg er komposittmaterialer i seg selv generelt lite bærekraftige. Derfor kan produksjonsbærekraften forbedres ved å implementere løsningsforslaget til produksjonslinjen, fordi det vil redusere antall avvik og vrakdeler.

I forhold til bærekraft og tap av energi i ovn ble det designet en ovn med små åpninger og isolasjon i vegger for å bevare varmeenergien. Ettersom ovnen er åpen i inn og utgang vil noe

varme uansett kunne slippe ut. Dette fører til tap av energi og det kan være gunstig å se på muligheter med lukket ovn som kan åpnes ved inn og utføring av rondell.

Produksjon av maskin: Maskinen i sin helhet kan bygges av Nammos egne produksjonsavdelinger. Det er konstruert med forbehold om at alle komponenter og råmateriale til maskinering er mulig å skaffe for bedriften. Dette gjør at prisen på maskinen stammer fra innkjøp av material- og komponentkostnader.

Pris på maskin: Den estimerte prisen på 330 000,- for maskinen er satt ved å estimere en pris på alle komponenter og mengder av stål eller andre materialer som må kjøpes inn. Dette gir et innblikk i hvor mye den mekaniske delen av konstruksjonen koster. Det betyr for eksempel at elektronisk anlegg som kabler og brytere ikke er medberegnet i prisen. I tillegg er ikke arbeidstimer medberegnet. Etersom dette er en automatisk prosess, vil det kreve en omfattende jobb for personell med bakgrunn fra automasjon for å sette opp maskinen. Prisestimatet er kun for å få et innblikk i hvor mye det kan koste mekanisk, og det vil være enklere for Nammo sin del å se for seg en totalpris.

5.3 **Anbefalinger for videre arbeid**

Hvis det er ønsket en økning i effektivitet og taktid på maskinen, anbefaler gruppen å se på alternative lengder på ovn. Ved eventuell dobling av lengden på ovnen vil man kunne kjøre transportbåndet dobbelt så fort og dette vil resultere i en taktid på 50% av gruppens løsningsforslag. Det kan også kjøpes flere av samme maskin som kjører parallelt med hverandre hvis det er plass og behov. I tillegg bør området maskinen skal stå på fastsettes slik at gulvarealet ikke blir en begrensing. Dette vil gjøre det mulig å maksimere lengden av ovn, som har direkte korrelasjon med taktiden.

Temperatur og holdetid kan optimaliseres, men dette krever en god mengde testing og samling av mer data. Gruppens antatte makstemperatur på 120°C i ovnen kan økes, dersom temperaturen på rondellene ikke overstiger makstemperaturen fra viskositetsdiagrammet. Det anbefales å undersøke nærmere rundt gjennomvarming av rondellen slik at en eventuell optimal makstemperatur i ovnen kan konkluderes med sikkerhet. Dette vil resultere i en optimal temperatur og holdetid.

Videre kan alternativer for oppvarmet verktøy, istedenfor varmeisolerende overflate i bunn og topp undersøkes nærmere. Et oppvarmet verktøy kan gjøre sluttresultatet på produktet bedre og vil fjerne behovet for isoleringsmateriale. Dermed anbefaler gruppen å se videre på dette.

Det er en viss usikkerhet i forhold til prosessen der tårnene skal separeres fra presseverktøyet ved hjelp av trykkluft. Det kan ikke garanteres at utskytningen vil fungere optimalt i praksis. For å validere en slik mekanisme må det gjennomføres flere fysiske tester før en endelig konklusjon. Gruppen skulle gjerne hatt tid eller anledning til å prototype og teste mekanismen selv, men dette lot seg dessverre ikke gjøre med tiden som var tilgjengelig. Det gis derfor en anbefaling til oppdragsgiver om å gjennomføre videre undersøkelser eller tester for å kunne verifisere mekanismen eller eventuelt vurdere andre alternative metoder.

Videre utvikling av innmaterialet bør ha fokus på areal og konsept. Ved å forandre konseptet av magasinene til et mer kompakt design, trengs ikke platen som snevrer inn avstanden mellom rondellene på båndet og rammen kan være enda lavere. Innmaterialet er en av delene av konstruksjonen som bør ta opp så lite plass som mulig. Innmaterialet er stor og tar opp mye unødvendig areal, dette tyder på at idémyldringen og planleggingen var upresis og at det ble brukt for lite tid på dette. Gruppen hadde ikke mer tid til å modifisere dette og dermed anbefales det å se videre på dette.

6 Konklusjon

Gruppen har sammen som et team kommet frem til et løsningsforslag av en automatisert produksjonsprosess der det er oppnådd betydelige fremskritt med hensyn til økt effektivitet, kvalitet og kontinuitet. Ved å integrere relevant faglitteratur, designmetodikk, simuleringer, analyser og dataassistert konstruksjon er det utviklet et løsningsforslag for en automatisert produksjonsprosess som muliggjør en betydelig effektivisering og forbedring. Gjennom utførelse av beregninger, fysiske tester og prototyping er det validert funn av gode prosessparametere, som inkluderer en nødvendig pressekraft på omtrent 70N per rondell og en oppvarmingstemperatur på 120°C med en holdetid på 5 minutter. Disse prosessparameterne og den automatiserte prosessen danner dermed grunnlaget for økt effektivitet i prosessen, i tillegg til god kvalitet og kontinuitet på produktet. Rapporten gir en god forståelse av ulike valg, metoder og design sammen med deres styrker og svakheter, samt anbefalinger for videre arbeid. Ved å lese kapittel 5.3, kan oppdragsgiver se nærmere på hva gruppen anbefaler at bedriften undersøker nærmere eller jobber videre med. Gruppen har stor tillit til at løsningsforslaget vil bidra svært positivt til utviklingen av den automatiserte forpressemaskinen.

7 Litteraturliste

Alcantara, M., 2023. *GRABCAD.com - Wheels*. [Internett]

Available at: <https://grabcad.com/library/caster-wheels-7>

[Funnet April 2024].

Ando, K. & Mizutani, M., 2014. *Influence of a wide range of moisture contents on the Poisson's ratio of wood*. [Internett]

Available at: <https://jwoodscience.springeropen.com/articles/10.1007/s10086-014-1438-7>

[Funnet 14 April 2024].

Ashby, M., 2021. *ANSYS - Material property data for engineering materials*. [Internett]

Available at: <https://www.ansys.com/content/dam/amp/2021/august/webpage-requests/education-resources-dam-upload-batch-2/material-property-data-for-eng-materials-BOKENGEN21.pdf>

[Funnet 23 Februar 2024].

AZO, 2024. <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1114>. [Internett]

Available at: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1114>

[Funnet 23 Februar 2024].

BERROYA, A. P., 2023. *GRABCAD*. [Internett]

Available at: <https://grabcad.com/library/222mm-diamater-radial-blower-1>

[Funnet 16 April 2024].

Bezzie, Y. M., Paramasivam, V., Tilahun, S. & Selvaraj, S. K., 2021. [Internett]

Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320408399>

[Funnet 14 Mai 2024].

CADNurd, 2023. *GRABCAD*. [Internett]

Available at: <https://grabcad.com/library/worker-man-3-0-1-1-with-ipad-tablet-clipboard-1>

[Funnet 18 April 2024].

Doiron, S., u.d. *Thermal Conductivity Testing: Shaping the Future of Fiberglass Composites*. [Internett]

Available at: <https://www.tencom.com/blog/thermal-conductivity-testing-shaping-the-future-of-fiberglass-composites>

[Funnet 22 April 2024].

Engineersedge, u.d. *Poisson's Ratio Metals Materials Chart*. [Internett]

Available at:

https://www.engineersedge.com/materials/poissons_ratio_metals_materials_chart_13160.htm

[Funnet 15 Mai 2024].

Festo, 2024. *Clevis foot LBN-20/25*. [Internett]

Available at:

<https://www.festo.com/no/en/a/6059/?q=LBN+20+25%7E%3AfestoSortOrderScored>

[Funnet April 2024].

FESTO, 2024. *Compact cylinder ADN-16-20-A-P-A*. [Internett]

Available at:

<https://www.festo.com/no/en/a/536222/?q=ADN+16+20%7E%3AsortByCoreRangeAndSp2020>

[Funnet April 2024].

FESTO, 2024. *DSBC-32-250-PPVA-N3*. [Internett]

Available at: <https://www.festo.com/tw/en/a/1376430/>

[Funnet 22 April 2024].

FESTO, 2024. *ISO cylinder DSBC-32-150 - 1463250*. [Internett]

Available at:

<https://www.festo.com/no/en/a/1463250/?q=1463250%7E%3AfestoSortOrderScored>

[Funnet 15 April 2024].

FESTO, 2024. *Leddet flens (Swivel flange) SNCS-32 174397*. [Internett]

Available at: <https://www.festo.com/no/en/a/174397/>

[Funnet April 2024].

FESTO, 2024. *Linear drive DGC-25*. [Internett]

Available at:

<https://www.festo.com/no/en/a/532447/?q=DGC+25+200+G+PPVA%7E%3AsortByCoreRangeAndSp2020>

[Funnet April 2024].

FESTO, 2024. *Linear drive DGC-40*. [Internett]

Available at:

<https://www.festo.com/no/en/a/532449/?q=DGC+40%7E%3AfestoSortOrderScored>

[Funnet April 2024].

FESTO, 2024. *Luftsyylinder DSBC-32-150-PPVA*. [Internett]

Available at:

https://www.festo.com/no/en/a/2123073/?q=DSBC+30%7E%3AsortByCoreRangeAndSp2020%7E%3ACC_Stroke_combined_mm_C_FP_GLOBAL%7E%3A150.0

[Funnet April 2024].

FESTO, 2024. *One-way flow control valve GRLA-M5-QS-4-D*. [Internett]

Available at:

https://www.festo.com/no/en/a/193138/?q=GRLA+m5+qs+4%7E%3AsortByCoreRangeAndSp2020%7E%3ACC_Pneumatic_connection_C_FP_GLOBAL%7E%3ACC_Pneumatic_con

nection.M5

[Funnet April 2024].

FESTO, 2024. *Push-in fitting QS-G1/8-6*. [Internett]

Available at:

<https://www.festo.com/no/en/a/186096/?q=186096%7E%3AfestoSortOrderScored>

[Funnet April 2024].

Festo, 2024. *Rod eye SGS-M10X1,25*. [Internett]

Available at: <https://www.festo.com/no/en/a/9261/>

[Funnet 2024].

FESTO, 2024. *Round cylinder DSNU-S*. [Internett]

Available at: https://www.festo.com/us/en/p/round-cylinder-id_DSNU_S/

[Funnet 25 April 2024].

FESTO, 2024. *Sensor SOEG-E-M18-NA-S-2L*. [Internett]

Available at:

<https://www.festo.com/no/en/a/537711/?q=%7E%3AsortByCoreRangeAndSp2020>

[Funnet April 2024].

FESTO, 2024. *Three-dimensional gantry*. [Internett]

Available at:

<https://www.festo.com/no/en/a/8159775/?autoShowCad=true&identCode1=EXCL-15-300-600-Z1-100-GF-ST-R-1-EK-M6-AN>

[Funnet 19 April 2024].

Gavin, M. & Knutsen, V., 2019. *Automatisering av stang- og øremating på sveisemaskin ved Glencore Nikkelverk*, s.l.: NTNU.

Geeksforgeeks, 2024. *Poisson's Ratio*. [Internett]

Available at: <https://www.geeksforgeeks.org/poissons-ratio/>

[Funnet 15 Mai 2024].

Goat, B., 2024. *GRABCAD*. [Internett]

Available at: <https://grabcad.com/library/belt-conveyor-132>

[Funnet 15 April 2024].

Hull, D. & Clyne, T. W., 1996. *An introduction to composite materials*. 2. red. s.l.:Cambridge University Press.

Industrial-oven, 2024. *industrial-oven.co.uk*. [Internett]

Available at: <http://www.industrial-oven.co.uk/industrial-oven-insulation.html>

[Funnet 22 April 2024].

- J, A. J. A. et al., 2022. *ScienceDirect*. [Internett]
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391022002415>
[Funnet 1 Februar 2024].
- Keller, R. B. & Ellis, R. A., 1975. *Solid Rocket motor nozzles*. [Internett]
Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19760013126>
[Funnet Februar 2024].
- Madiwal, P., 2024. *GRABCAD*. [Internett]
Available at: <https://grabcad.com/library/motor-31>
[Funnet 16 April 2024].
- MATWEB, u.d. *A-Glass Fiber, Generic*. [Internett]
Available at:
<https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=8f9003366c9044bdb91bcd86e1fa6e42>
[Funnet 22 April 2024].
- MATWEB, u.d. *Steels, General properties*. [Internett]
Available at: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?bassnum=MS0001&ckck=1>
[Funnet 22 April 2024].
- Nammo AS, 2024. *Nammo.com*. [Internett]
Available at: <https://www.nammo.com/location/raufoss/>
[Funnet 25 Januar 2024].
- Ormestad, H., 2021. *Elastisitet (fysikk)*. [Internett]
Available at: <https://snl.no/elastisitet - fysikk>
[Funnet 15 Mai 2024].
- Paschotta, D. R., 2008. *RP-Photonics Encyclopedia Silica fibers*. [Internett]
Available at: https://www.rp-photonics.com/silica_fibers.html
[Funnet 3 April 2024].
- Poplavko, Y. M., 2019. *Mechanical properties of solids - Poissons-ratio*. [Internett]
Available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/poisson-ratio>
[Funnet 15 Mai 2024].
- Science Ready, 2024. *Heat Transfer: Conduction, Convection and Radiation*. [Internett]
Available at: <https://scienceready.com.au/pages/conduction-convection-and-radiation>
[Funnet 07 Mars 2024].
- Shadanov, A. A., 2022. *The Influence of Weaving Technologies*. [Internett]
Available at: https://www.researchgate.net/figure/Rapports-of-the-main-types-of-textile-weaves-a-Rwa-Rwe-2-2-plain-weave-b-2-1-warp_fig1_366616737
[Funnet 19 Mars 2024].

Shamsuyeva, M., Winkelmann, J. & Endres, H.-J., 2019. *Manufacture of Hybrid Natural/Synthetic Fiber Woven Textiles for Use in Technical Biocomposites with Maximum Biobased Content*. [Internett]

Available at: <https://www.mdpi.com/2504-477X/3/2/43>
[Funnet Mars 2024].

Shields, S., 1976. *SCOUT Nozzle Data Book*. [Internett]

Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19770010201>
[Funnet Februar 2024].

Simscale, 2023. *Simscale.com*. [Internett]

Available at: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/heat-transfer-thermal-analysis/what-is-heat-transfer/>
[Funnet 07 Mars 2024].

SKF, 2024. *Lager: SY 20 FM*. [Internett]

Available at: <https://www.skf.com/in/products/mounted-bearings/ball-bearing-units/pillow-block-ball-bearing-units/productid-SY%2025%20FM>
[Funnet April 2024].

University of Birmingham, u.d. *Physics A level revision resource: Introduction to Young's Modulus*. [Internett]

Available at: <https://www.birmingham.ac.uk/study/undergraduate/schools-and-colleges/post-16/a-level-stem-resources/youngs-modulus>
[Funnet 15 Mai 2024].

Wanlei steel pipe, u.d. *S355J2H Strukturell Hul Seksjon Stålrør*. [Internett]

Available at: <http://no.galvanizedsteeltube.com/steel-pipe/structure-steel-pipe/s355j2h-structural-hollow-section-steel-pipe.html>
[Funnet 23 April 2024].

Wikipedia, 2023. *Shear modulus*. [Internett]

Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Shear_modulus
[Funnet 15 Mai 2024].

