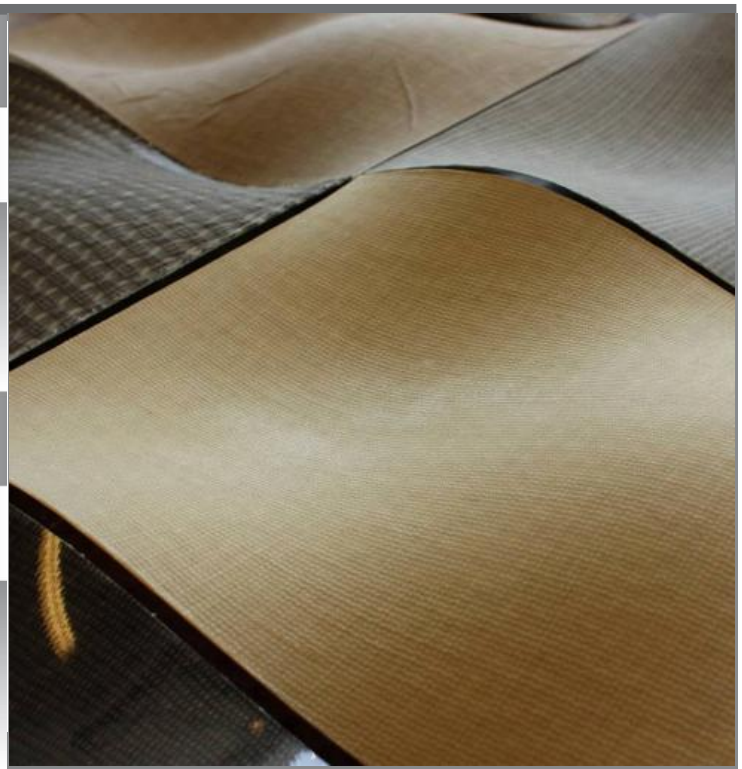
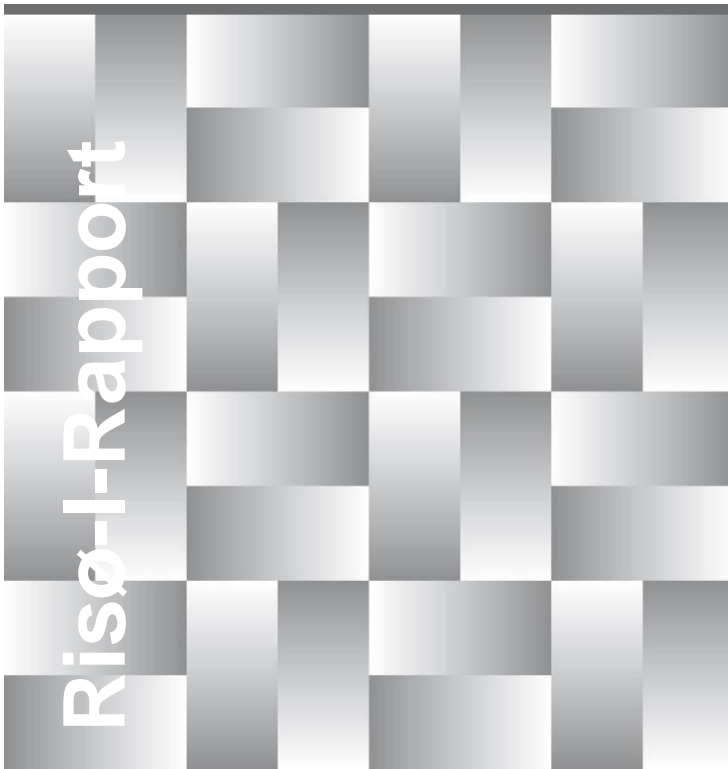


Bio/bio-kompositter



Tom Løgstrup Andersen
Risø-I-3094(DA)
Juli 2011



Forfatter: Tom Løgstrup Andersen
Titel: Bio/bio-kompositter
Afdeling: Afdelingen for Materialeforskning

Risø-I-3094(DA)
Juli 2011

Abstract (in English) (max. 2000 char.):

Bio/Bio composites are based on natural fibre reinforcement and a biopolymer matrix material. The natural fibres increase the strength and stiffness of the biopolymer and form a sustainable and environmental alternative material for manufacture of e.g. furniture's.

Basic research and development of generic know how for manufacture of components based on Bio/Bio-composites has been generated. Mechanical performance of composites at temperatures in the range from 5 °C to 80 °C has been determined.

The components were developed in a "Bio/Bio composites" project as cooperation between Risø DTUs Materials Research Division, industrial designer Martin Larsen and textile designer Karina Rios Nielsen.

The project was made possible by funding from Regional Growth Forum Sjælland and Region Zealand (Vækstforum Sjælland og Region Sjælland) as one of the climate, energy and environmental activities launched in 2008.



Gruppens reg. nr.:
1615132-00

Sponsorship:
Region Sjælland

**Forside: 3D-demoemner af
bio/bio-komposit**

Sider: 87
Tabeller: 31
Referencer: 0

Afdelingen for
Informationsservice
Risø Nationallaboratoriet for
Bæredygtig Energi
Danmarks Tekniske Universitet
Postboks 49
4000 Roskilde
Danmark
Telefon 46774005
bibl@risoe.dtu.dk
Fax 46774013

Indhold

Forord	4
1 Sammen drag	5
1.1 Redegørelse for projektets forløb	5
1.2 Resultater: Effektmål og målopfyldelse	9
1.3 Konklusion og perspektiv	14
2 Materialer - halvfabrikater	16
2.1 Fibre	16
2.2 Matrix	18
2.2.1 Bio-baseret termoplast	19
2.2.2 Bio-baseret hærdeplast	22
3 Metoder	25
3.1 Fremstilling	25
3.2 Mekanisk test	27
4 Resultater – mekaniske egenskaber	29
4.1 Referencevæv, skud- og kæderetningen	29
4.2 HDT – heat distortion temperature – ISO 75-3	30
4.3 Egenskaber for termoplast fiberkompositter	31
4.3.1 Jute/PLA 4032D	32
4.3.2 Jute/PLA 2002D	33
4.3.3 Jute/Biograde C7500	34
4.3.4 Jute/PLA CA24	35
4.4 Egenskaber for jute/hærdeplast kompositter	36
4.5 Ensrettede hørfiber- kompositter med varierende fiberindhold	37
4.6 Egenskaber for 0°- glasfiber kompositter	38
5 Fremstillingsprocesser for 3D emner	39
5.1 Presseenhed – 3D termoplastkompositter	40
5.1.1 Pressekonsolidering af tykke lamina ter	48
5.2 Formmateriale til bio-hærdeplast	49
6 Videnoverførelse	54
6.1 3D-demoemne	54
6.2 Dropfodsskinne	66
6.3 Vindmøllevinger til en racerbil	69
6.4 Skallen til en stol	71
6.5 Skammel	74
7 Appendix 1: Modtagekontrol side 1/4	81
8 Appendix 2: HDT bestemmelse side 1/3	85

Forord

Projektarbejdet er sammenfattet i kapitel 1, *Sammendrag*, og dette kapitel kan læses separat og skal opfattes som en slutevalueringsrapport for projektarbejdet, der fagligt er uddybet i de efterfølgende kapitler. Kapitel 2, *Materialer - halvfabrikater*, indeholder en beskrivelse af de naturfibre og bio-baseret plastmaterialer, der er undersøgt i projektet. Kapitel 3 omhandler de anvendte *Metoder* til fremstilling og test af kompositter og i det efterfølgende kapitel 4, *Resultater – mekaniske egenskaber*, er de fremstillede plane kompositter og målte mekaniske egenskaber rapporteret.

Fremstillingsprocesser for 3D emner er beskrevet i kapitel 5 og omfatter ombygning af en forskningspresse til fremstilling af 3D emner samt et nyt fremstillingskoncept med anvendelse af silikonegummiforme. I kapitel 6, *Videnoverførelse*, er de mange projektaktiviteter, der er relateret til synliggørelse og videnoverførelse af forskningsresultaterne beskrevet. De efterfølgende kapitler indeholder appendiks til rapporten og omfatter dels en modtagekontrol for fiber materialer og dels eksternt udførte mekanisk test af Heat Deflection Temperature (HDT).

På baggrund af vedtagelsen af suppergruppefritagelsesordningen i EU pr. 1/9 2008 og Udenrigsministeriet, i samarbejde med Økonomi- og Erhvervsministeriet, udskrivelse af en designkonkurrence til FN's klimakonference (COP15) d. 27/8 2008 blev der udarbejdet et forslag til et forskningsprojekt; Bio/bio-kompositter, med planlagt opstart d. 1/10 2008.

Forskningsprojektet skulle ses i tilknytning til Vækstforum Sjællands beslutning om at udnytte den udskrevne designkonkurrence til at markedsføre regionen frem mod FN's klimakonference. Regionens beslutning om at udnytte konkurrencen betød, at der blev mulighed for, at gennemføre en grundlæggende forskning i bio/bio-kompositmaterialer med fokus på deres procesbarhed og egenskaber. Biobio-komposit projektet med et total budget på 2.684.086 kroner og en projektperiode på 15 måneder blev godkendt i bevillingsskrivelse fra Vækstforumssekretariatet d. 6/10 2008.

På baggrund af "en række kritiske spørgsmål" fra DDA (Danish Design Association) og DD (Danish Designers), "som Udenrigsministeriet og Økonomi- og Erhvervsministeriet vægter højt" blev det d. 9/10 2008 besluttet at aflyse designkonkurrencen. Dette afstedkom at Vækstforum Sjælland blev nødsaget til at aflyse den annoncerede udbudsproces indenfor; møbelproducenter og designere, markedsføring og know-how. Samtidig blev det overvejet om projektet "BioBio-kompositter" skulle fortsættes. Den formelle opstart af projektet blev derfor forsinket. Kick off møde blev afholdt onsdag d. 3/12 2008.

Forfatteren vil gerne takke de mange personer som i større eller mindre grad har bidraget til realisering af projektet. En speciel tak til industriel designer Martin Larsen og tekstildesigner Karina Rios Nielsen, der begge har lagt en stor indsats i projektet. Projektet blev initieret med stor hjælp fra Michael Svendsmark Hansen og RIA gruppen på Risø DTU. Folier blev fremstillet på DTU MEK ved forskningsassistent Reinholdt Koch.

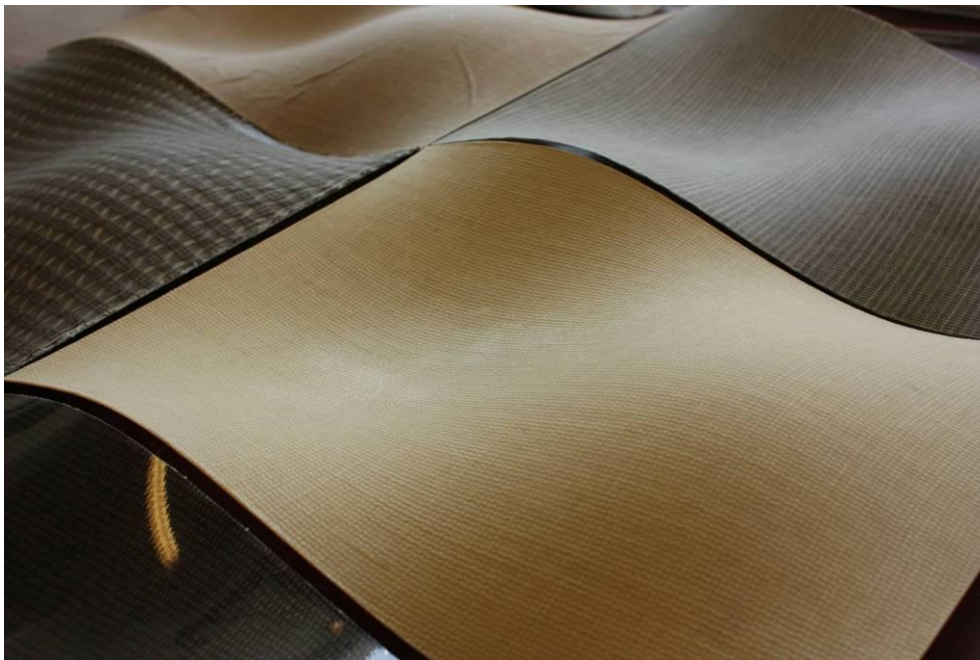
De mange eksperimentelle forsøg, modificering af udstyr og proces udvikling og har kun været mulig med hjælp fra en dygtig teknikerstab og fagligt kompetente kollegaer. En stor tak til forskningsteknikerne Jacob Christensen, Christian H. Madsen, Jonas Heininge, Erik Vogelye, Jens Olsson og Frank Adrian samt seniorforskerne Povl Brøndsted, Bo Madsen, Lars Pilgård Mikkelsen og Hans Lilholt for faglig sparring og deltagelse.

1 Sammendrag

1.1 Redegørelse for projektets forløb

Forskningsprojektet har omfattet en grundlæggende undersøgelse af mulighederne for at anvende naturfibre og bio-baserede polymerer i kompositmaterialer. Forskningen har været af generisk karakter og har ført til interessant fornyet viden om bio/bio-kompositers materialekarakteristika og proces egnethed.

Der har været specielt fokus på at synliggøre forskningsresultaterne i projektet. I samarbejde med industriel designer Martin Larsen og tekstildesigner Karina Rios Nielsen blev en række bio/bio-kompositemner fremstillet ud fra forskellige naturfibre, klæder og plastmaterialer. Udformningen af demoemnet viser kompositmaterialets mulighed for fremstilling af komponenter med 3D dobbeltkrumme flader. Designet af 3D-emnet blev udformet, så det er muligt at placere flere emner ved siden af hinanden og derved generere et bølget landskab, som illustreret i Figur 1.1.1.



Figur 1.1.1: Bølget landskab sammensat af 3D-emner med dobbeltkrumme flader designet af Industriel designer Martin Larsen og fremstillet med naturfiberklæde af tekstildesigner Karina Rios Nielsen. Emner fremstillet på Risø DTU.

3D demoemnerne har været benyttet som blikfang i flere sammenhængen. Første gang var på den censurerede udstilling på Trapholdt i Kolding i forbindelse med *Biennalen for Kunsthåndværk og Design 2009*, der havde bæredygtighed som tema. Bio/bio-kompositemnerne opnåede den hæder, at blive tildelt en pris fra Statens Kunstfond. Et billede af emnerne udstillet på Trapholdt og præmieringen er vist i Figur 1.1.2.



Figur 1.1.2: Stor opmærksomhed omkring projektets bio/bio-kompositemner ved ferniseringen på Biennalen for Kunsthåndværk og Design 2009, Trapholdt, Kolding. Indsat billede med præmieringen fra statens kunsthåndværk og designudvalg.

I forbindelse med COP15 afholdte Dansk Industri en udstilling i Forum under titlen *Bright Green Expo*. På udstillingen viste mere end 170 af verdens førende virksomheder deres "cutting-edge" klimaløsninger. Bio/bio-kompositemner blev på Bright Green Expo vist som en del af den stand, der repræsenterede Danmarks Tekniske Universitet ved RIA (Risø's Innovations Aktivitet), Risø DTU. Et billede fra standen er vist i Figur 1.1.3.

Parallelt med COP15 blev der i DKI-byen den 16. december 2009 afholdt en workshop "IDEAS AT WORK" arrangeret af CradlePeople, som en del af Klimaforum09. Arrangementet havde som hovedtaler Michael Baungarth, der er en af hovedpersonerne bag Cradle to Cradle tankegangen og design konceptet. Efterfølgende var der arrangeret workshops og ved arrangement blev 3D bio/bio-kompositemner fremvist, som eksempler på bæredygtige materialer. Der var meget stor interesse blandt de mere end 350 fremmødte deltagere, hvilket kan ses af billederne i Figur 1.1.4, hvor udstillingsbordet med emner befinder sig midt i folkemængden.

JEC er den største industrielle udstilling og konference i Europa med kompositter som tema og afholdes hvert år i Paris. Et oversigtsbillede fra udstillingsområdet er vist i Figur 1.1.5. I 2010 havde JEC deltagerrekord med mere end 27.500 deltagere fra hele verden. Projektets demoemner blev fremvist på en europæisk stand (M80) arrangeret af CELC, European Confederation of Flax and Hemp, som konkrete eksempler på bio/bio-kompositter.



Figur 1.1.3: COP15: Bright Green Expo, december 2009. Udstillingsstandere med projektets bio/bio-kompositemner tiltrak stor opmærksomhed på standen, der repræsenterede Danmarks Tekniske Universitet. Standen blev realiseret af RIA gruppen fra Risø DTU.



Fotos: CradlePeople



Figur 1.1.4: IDEAS AT WORK, tankefusion 4 i Klimaforum under COP15 2009, arrangeret af CradlePeople. På workshoppen blev emner fremvist for de mange interesserede deltagere i samarbejde med designerne Martin Larsen og Karina Rios Nielsen.



Copyright JEC Composites

Figur 1.1.5: JEC 2010: Udstilling af emner på Europas største konference og kompositudstilling i Paris med mere end 27.500 besøgende. Projektets emner blev fremvist på en europæisk stand arrangeret af CELC, European Confederation of Flax and Hemp, som konkrete eksempler på bio/bio-kompositter.

I relation til projektet var det oprindeligt tiltænkt at iværksætte en aktivitet, der skulle opsøge danske møbelvirksomheder og forsøge at implementere bio/bio-kompositter i designprodukter (møbler) sammen med disse. Denne aktivitet kunne imidlertid ikke realiseres. På trods af dette har projektet understøttet to designprojekter der omhandler møbler samt fremstillet dels små vindmøllevinger og dels en dropfod-skinne, som konkrete demoprojekter.

Nye biobaseret materialer blev identificeret internationalt og efterfølgende anskaffet og nye fremstillingsmetoder udviklet i tæt samarbejde med de aktører, ønsker og behov som projektet afdækkede.

En vigtig del af projektarbejdet har bestået i videnoverførelse til virksomheder og enkeltpersoner, som var interesseret i information om og muligheden for, anvendelse af bio/bio-kompositter. Der har været stor interesse fra ingeniører, designere og arkitekter, der ønsker at anvende nye og bæredygtige materialer i deres komponenter, både i projektperioden og efterfølgende. Flere virksomheder har været på Risø DTU for at blive orienteret om muligheder og begrænsninger for bio/bio-kompositter i projektperioden og i nogle tilfælde var det muligt at fortsætte med et konkret samarbejde.

Et eksempel på et konkret samarbejde udført i relation til projektet blev realiseret af den rådgivende ingeniørvirksomhed MOLGARD APS, organisationen Dansk Komptencecenter for Affald (DAKOFA) repræsenteret ved Amager forbrænding og Renosam samt Risø DTU. Efter indledende møder blev designeren Søren Ulrik Petersen knyttet til gruppen og sammen med MOLGARD udviklede han et kit; "Det læredygtige møbel", der kort kan beskrives som et koncept, der kan anvendes til undervisning af skoleklasser,

med henblik på at skabe interesse omkring genanvendelse af materialer og skrald. Grundlæggende var ideen at bruge låget og gevinddelen fra plastflasker til at samle/bygge komponenter. Plastflaskerne skæres op i bunden og krympes ved hjælp af varme omkring f.eks. en rulle avispapir.

En række studerende har lavet studie relevant arbejde, som blev vejledt, støttet og supporteret af projektet.

Fire studerende fra RUC (TekSam B1), Josefine Dalsgaard, Louise Stenander, Lene Pfeiffer og Kristina Hansen, lavede indledningsvis et studie med titlen "Cradle to Cradle – en bæredygtig udvikling?", der stillede spørgsmål ved bæredygtigheden af PLA komposit-materialet, da plasten er baseret på majs og derfor kan have indflydelse på fødevarer priser og tilgængelighed. Desuden blev cradle to cradle principperne vurderet og nødvendigheden af at påvirke hele produktionskæden i en bæredygtig retning påpeget.

Et kandidatspeciale af Troels Bach Nielsen fra DTU med titlen: "Fracture mechanical characterization and modelling of bio-based fibre composites", undersøgte de procesrelaterede vanskeligheder ved fremstilling af en 100 % bio-baseret hærdeplast komposit med udgangspunkt i en furan resin baseret på furfurylalkohol, der bla kan udvindes fra bagasse. Under hærdeforløbet udskilles vand og dette skal fjernes, hvis kompositter med god kvalitet skal fremstilles, hvilket er meget vanskeligt. Der forskes i skrivende stund fortsat i at udvikle dette koncept.

Fra DTU har to studerende, Alexandra Liv Vest Løvdal og Louise Løcke Laursen, lavet deres bachelorprojekt med titlen: "Mekanisk karakterisering af biopolymere", der omhandlede bio-baseret termoplast kompositter og mekaniske egenskaber ved forhøjet temperatur. Deres bachelorprojekt blev udført med stor succes og resulterede bla i resultater til en international artikel.

Endelig lavede DTU studerende Karen Marie Hasling et kandidat-speciale med titlen: "Functional fiber composites". Med ønske om at kunne fremstille innovative materialer til specielt bygningsindustrien undersøgte hun inkorporation af nye funktionelle elementer i traditionelle fiberkompositter. Resultatet af undersøgelsen blev et koncept, der bestod af heksagonale kompositmoduler med termokrome print i det øverste lamina, kombineret med integrerede tekstile varmelegemer. Udover det eksperimentelle arbejde, omfattede arbejdet en diskussion vedrørende bæredygtighedsaspektet såvel som markedspotentialet af sådanne koncepter. Projektarbejdet blev belønnet med F&U prisen 2010 af Plastindustriens kompositsektion.

1.2 Resultater: Effektmål og målopfyldelse

Etablering af grundviden for generel bedre forståelse af bio/bio-kompositter er genereret. Fiberkompositter baseret på termoplastisk og termohærdende bio-polymer er fremstillet og mekaniske egenskaber målt. Der er udviklet den nødvendige procesteknologi for både termoplast og hærdeplast naturfiber kompositter. Testlaminater er fremstillet under kontrollerede forhold, karakteriseret og dokumenteret.

For de termoplastiske bio-polymerer er det specielt overraskende, at tilsætningen af en bio-baseret nano filler ikke resulterede i forbedret temperateregenskaber, f.eks. i form af en højere HDT (Heat Distortion Temperature) temperatur. Nano-filler materialet medfører at viskositeten af plasten øges. Viskositeten kan sænkes ved at øge procestemperaturen. Test resultater har vist at en øget procestemperatur generelt medfører at

stivheden af kompositten forbedres, men på bekostning af en overordnet reduktion af styrken.

Et kompositmateriale baseret på væv med fibre i både skud og kæde retningen, f.eks. en lærredsbinding, vil ikke nødvendigvis have de samme egenskaber i begge hovedretningerne. Måleresultater fra et referencemateriale med et indhold af jute på 33 vol-% er vist i Tabel 1.2.1, der er en gengivelse af Tabel 4.1.1.

Komposit	Test retning	Laminat tykkelse [mm]	Træk styrke [MPa]	Stivhed E-modul [GPa]	Brudforlængelse [%]
Jute/PLA 4032D	Skud	2.34	78 ± 2	8.2 ± 0.3	1.81 ± 0.06
	Kæde	2.22	59 ± 3	6.8 ± 0.3	1.59 ± 0.08

Tabel 1.2.1: Trækstyrke, E-modul og brudforlængelse i skud og kæde retningen for referencematerialet Jute/PLA 4032D med et fiberindhold på ca. 33 vol-%.

Forskellen i styrke og stivhed i de to hovedretninger skyldes, at vævet ikke har den samme mængde af naturfiber i de to hovedretninger. Ved modtagekontrollen, se evt. Appendix 1, blev der målt et forhold på 70/30 i fiberindhold mellem skud og kæde retningen.

Der er målt mekaniske egenskaber i form af trækstyrke og stivhed ved forskellige temperaturer i intervallet fra 5 °C – 80 °C for kompositter med termoplastisk matrixmateriale. Et eksempel på disse resultaterne er vist i Tabel 1.2.2, som er en gengivelse af resultaterne fra Tabel 4.3.1.1.

Jute/PLA 4032D, fiberandel 37 vægt-%								
Temperatur (°C)	5	25	30	40	50	55	60	80
Trækstyrke(MPa)	86	80	82	75	58	50	37	39
Stivhed (GPa)	8.1	7.8	7.7	5.6	4.2	3.1	1.3	2.1

Tabel 1.2.2: Trækstyrke og stivhed (E-modul) i temperaturintervallet fra 5 °C til 80 °C for jute/PLA 4032D laminater med 37 vægt-% fiberindhold.

Egenskaberne for Jute/PLA 4032D i Tabel 1.2.1 kan betegnes som typiske. Udgangspunktet er en styrke på 80 MPa ved 25 °C, der falder til ca. 40 MPa ved 80 °C. Stivheden ved 25 °C er målt til 7.8 GPa og den falder til 2.1 GPa ved 80 °C. Det er desuden bemærkelsesværdigt at der ved 60 °C er målt de laveste egenskaber. Disse målinger er verificeret og den samme tendens er set for andre materialekombinationer og må derfor tages for pålydende.

De målte mekaniske egenskaber for jutefiberkompositterne med delvis bio-baseret hærdeplast, PolyLite 4729 og Supersap 1100, er næsten på højde med det tilsvarende petrokemiske halvfabrikat, Hexion 135/137. Dette fremgår af tabel 1.2.3, der er et uddrag af tabel 4.4.1 og 4.4.2, hvor jute kompositter med forskellig hærdeplast resin er sammenlignet. Ved 80 °C test temperaturer er PolyLite 4729 resinen bedre, i både styrke og stivhed, end den konventionelle Hexion 135/137. Det fremgår også at egenskaberne for alle de testede kompositter i Tabel 1.2.3 er temperaturafhængige og falder med stigende temperatur.

Komposit	Fiber indhold [vol-%]	Træk styrke [MPa]			E-modul [GPa]		
		25 °C	50 °C	80 °C	25 °C	50 °C	80 °C
Jute/Hexion 135/137	30	84	71	36	8.0	6.7	2.0
Jute/Polylite 4729	33	72	62	43	7.8	6.5	4.8
Jute/SuperSap 1100	32	82	63	33	7.6	5.4	1.2

Tabel 1.2.3: Trækstyrke og stivhed (E-modul) ved tre temperaturer i intervallet fra 25 °C til 80 °C for jute kompositter med termohærdende matrixmateriale. Det samme jutevæv er benyttet til sammenligning af den konventionelle epoxy Hexion 135/137 med de to delvis bio-baserede PolyLite 4729 og SuperSap 1100.

En tilsvarende sammenligning baseret på glasfiberlaminater med overvejende ensrettede (0°) fiber orientering er vist i Tabel 1.2.4, der er identisk med tabel 4.6.1, hvor den konventionelle polyester PolyLite 413-575 er anvendt og sammenlignet med PolyLite 4729 og Supersap 1100.

Komposit	Fiber indhold [vol-%]	Trækstyrke [MPa]		E-modul [GPa]	
		0°	90°	0°	90°
Glas/PolyLite 413-575	51	782 ± 38	49 ± 3	39.2 ± 1.2	12.0 ± 1.7
Glas/PolyLite 4729	54	773 ± 52	53 ± 5	40.7 ± 1.8	10.6 ± 0.1
Glas/SuperSap 1100	53	821 ± 4	44 ± 5	40.0 ± 1.8	10.3 ± 0.2

Tabel 1.2.4: Trækprøve resultater i 0°- og 90°-retningen for overvejende ensrettede glasfiber-kompositter. En konventionel polyester, PolyLite 413-575, er sammenlignet med en 57 % bio-baseret polyester, PolyLite 4729, samt en 53 % bio-baseret epoxy, SuperSap 1100.

Trækprøveresultaterne for de delvis bio-baserede kompositmaterialer i Tabel 1.2.4, PolyLite 4729 og Supersap 1100, er fuldt på højde med resultaterne for den konventionelle polyester PolyLite 413-575.

For kompositemner med en termoplastisk bio-polymer var målene: Etablering af en presseenhed, der kan bruges til undersøgelse af procesparametre for kompositter med op til 10 mm tykkelse, dels udvikling af håndteringen af halvfabrikata under processen og dels demonstration af processen på Risø DTU i forbindelse med fremstilling af et 3D-demoemne. Alle disse mål er opnået, se evt. Figur 1.2.1.



Figur 1.2.1: 3D-demoemner fremstillet på Risø DTU

Tilsvarende er der for bio-baseret hærdeplast afprøvet plast og formmaterialer, der gør det muligt at påvise potentialet for bio/bio-kompositter ved prototype fremstilling. Forme lavet ved 3D-print eller stereolithography er blevet anvendt med succes til kompositemner og i større skala er en form baseret på sammensatte MDF blevet anvendt.

Til en racerbil, der er drevet af en vindmølle, blev der fremstillet nye vinger. For at illustrere muligheden for anvendelse af bio-baseret plast blev disse fremstillet med kulfiber og en delvis biobaseret hærdeplast. Vinger monteret på racerbilen er vist i Figur 1.2.2.



Figur 1.2.2: WinDTUrbineracer med vindmøllevinger der blev fremstillet med kulfiber og en bio-baseret hærdeplast. Til bilen blev der fremstillet fire vinger som hver er 800 mm lang og vejer ca. 250 g.

Skallen til en stol "Care", der er designet med Cradle to Cradle paradigmet idealer, blev fremstillet med succes sammen med Christian Dyrman Hansen og Jasper Overgaard Schlichting fra Danmarks Designskole. Med prototypen håber designerne at kunne finde en producent og starte en produktion.

En "umulig" skammel, se Figur 1.2.3, i form af et emne med negative slipvinkler, blev fremstillet med succes i et udviklet nyt fremstillingskoncept. Efter designer Martin Larsen og design studerende Henk Hatzmann ide og ønske lykkedes det, ikke blot at lave emnet, med en udformning, der ikke er set tidligere, på grund af de negative slipvinkler, men også at fremstille et emne, hvor den unikke struktur i naturfiber materialet blev en del af materialets overfladestruktur. I praksis betyder det, at hvert emne der fremstilles ved denne metode vil blive unik, da gummiformen tillader halvfabrikatet og dermed væv-strukturen at blive gengivet i overfladen på emnet.



Figur 1.2.1: Skammel med negative slipform og med strukturen fra det væv der er benyttet til fremstilling af emnet i overfladen. Skammelen er resultatet af en ny procesmetode udviklet i projektet.

Ortopæd Ingeniørerne er en virksomhed i Roskilde, som forhandler en dropfodsskinne kaldet Flexbrace®. Dropfodsskinner blev forsøgsvis fremstillet, se Figur 1.2.3, med en bio-baseret hærdeplast af typen EPOBIOX™, da plasten ifølge databladet har en brudforlængelse på 12%.



Figur 1.2.3: Vakuum infusion af dropfodsskinne med delvis bio-baseret hærdeplast af typen EPOBIOX på Risø DTU i samarbejde med Henrik Østergaard og Lars Falkenmann fra Ortopæd Ingeniørerne i Roskilde.

Den fremstillede dropfodsskinne med en mere duktil plast kunne ikke klare de belastninger som emnet blev udsat for under test. I forlængelse af demoprojektet har Ragnhild Í Skorini fra DTU derfor lavet et Master speciale, der omfattede en Finite Element Modellering af emnet. Modellen gjorde det muligt at simulere lasten på emnet og vurdere hvilke fiber materialer der er bedst egnede til fremstilling af dropfodsskinne.

1.3 Konklusion og perspektiv

Projektet har bidraget til den generelt stigende interesse og forståelse for bæredygtige materialer, processer og produkter. Udstillingssøjler med emner og komponenter bliver jævnlig brugt og udlånt til arrangementer af typen "show and tell" på Risø DTU og internationalt på konferencer. Resultaterne fra projektet bliver stadigvæk formidlet til interesserede virksomheder, designere, arkitekter og gæster. I punktform kan det konkluderes at projektet har opnået følgende:

- Fremstillet og karakteriseret bio/bio-referencemateriale.
- Identificeret og kontaktet leverandører af halvfabrikater til fremstilling af bio/bio-kompositter.
- Fastlagt design af demoemne til 3D pressekonsolidering.
- Håndtering og pressekonsolidering af 3D demoemne udført.
- Procesparametre for pressekonsolidering af 5mm tykke laminaer fastlagt og 10mm laminat fremstillet.
- Forsøg med termohærdende bio-polymer udført med succes.
- Bio/bio-kompositter blev fremstillet og mekaniske egenskaber målt.
- De målte mekaniske egenskaber for delvis bio-baseret hærdeplast kompositter er næsten på højde med et tilsvarende petrokemisk halvfabrikat. En tendens, der forhåbentlig kan fortsættes i den fortsatte udvikling af 100 % bio-baseret hærdeplaster.
- Temperaturegenskaberne for naturfiberkompositter med hærdeplast og termoplast har stort set identisk fald i mekaniske egenskaber i området fra 25 – 80 °C.
- Processer og demoemner fremvist på Risø DTU.
- Emner fremvist under COP15 på Bright Green Expo og efterfølgende ved IDEAS AT WORK, tankefusion 4 i Klimaforum.
- Emner fremvist på JEC 2010 i Paris, Frankrig.
- Studerende fra RUC, DTU og Danmarks Designskole har lavet projektarbejde og specialer i tilknytning til projektet.
- Projektet har realiseret flere demoprojekter:
 - 3D bio/bio-komposit demoemner i samarbejde med Industriel designer Martin Larsen og fremstillet med naturfiberklæde af tekstildesigner Karina Rios Nielsen. Emner præmieret af Statens Kunsfond ved udstillingen på Biennalen for Kunsthåndværk og Design 2009, Trapholdt, Kolding.
 - Vindmøllevinger af kulfiber og bio-plast blev fremstillet til en racerbil på Danmarks Tekniske Universitet.
 - Dropfodsskinne med duktil bioplast blev fremstillet sammen med Ortopæd Ingeniørerne i Roskilde. Efterfølgende blev en FEM model udviklet for undersøgelse af last og materialer.

- Skallen til en stol baseret på en jutemåtte og biobaseret hærdeplast blev realiseret sammen med designerne Christian Dyrman Hansen og Jasper Overgaard Schlichting
- Et nyt proceskoncept blev udviklet i samarbejde med Industriel designer Martin Larsen, tekstildesigner Karina Rios Nielsen og designstuderende Henk Hatzmann, hvor det er muligt at fremstille unikke emner, med negativ slip-vinkel og væv struktur i overfladen. Processen blev verificeret ved fremstilling af en skammel.
- Ny viden om bio/bio-kompositmaterialer og processer i samspil med design giver mulighed for at skabe innovation i virksomheder og fremme konkurrenceevne, eksport og beskæftigelse. Figur 1.3.1.

Projektet gjorde det muligt, at behandle henvendelser, som typisk omfattede et besøg og gennemgang af muligheder og begrænsninger for bio/bio-kompositter på Risø DTU. Det er umuligt at rapportere hvilken effekt der direkte er kommet ud af disse besøg og henvendelser. Mange har uden tvivl ladet sig inspirere af projektaktiviteterne og resultaterne har virket som en katalysator i det fortsatte arbejde. Forskningsprojektet har hævet niveauet for forståelsen af bio/bio-kompositter og den genererede viden er med succes gjort synlig.



Figur 1.3.1 Ny viden om bio/bio-kompositmaterialer og processer i samspil med design giver mulighed for at skabe innovation i virksomheder og fremme konkurrenceevne, eksport og beskæftigelse.

2 Materialer - halvfabrikater

Et kompositmateriale er i denne sammenhængende kendetegnet ved, at det er sammensat af relativt lange forstærkningsfibre, der sammenføjes af et plastmateriale også kaldet matrix. Bio/bio-kompositmateriale er kendetegnet ved at både forstærkningsfibre og matrixmaterialet er baseret på vedvarende bio-ressourcer. Bio/bio-kompositter er potentiel CO_2 neutrale og bæredygtige.

Hvor anvendelse af bio-fibre, f.eks. hør, hamp og jute, til kompositmaterialer har været kendt i flere år, er anvendelsen af bio-polymere stadig relativt ny og udforsket. Internationalt er der meget stor fokus på udvikling af nye bæredygtige bio-plastmaterialer, som kan erstatte konventionelle petrokemiske plastmaterialer. Denne interesse er dels baseret på den stødt stigende oliepris og dels ønsket om at kunne producere på basis af fornybare og bæredygtige ressourcer og samtidig reducere CO_2 udslippet.

2.1 Fibre

Naturfiber referencematerialet blev et Jute-væv fra Nevotex Danmark af typen 100/16, artikelnummer 2416100. Juteklædet er en lærredsbinding, se Figur 2.1.1, hvilket giver et relativt stærkt, ensartet og lidt stabilt/stift stof. Klædet blev leveret i ruller af 50 m længde med en bredde på 100 cm. Den nominelle arealvægt var opgivet til 480 g/m^2 . Ved modtagekontrol blev arealvægten bestemt til 380 g/m^2 , hvilket er betydeligt mindre. Juteklædet blev valgt fordi det var et relativt billigt standardprodukt og et halvfabrikat, som formodentlig vil kunne anskaffes i ønsket mængde over en længere tidsperiode. Juteklædet kostede ved anskaffelsen 15 kr/m^2 , hvilket svarer til en pris på ca. 40 kr/kg .



Figur 2.1.1 Referencematerialet, Jutevæv med målt arealvægt på 380 g/m^2 .

Det fremgår af Figur 2.1.1, at stoffet har forskellige tråde i skud- og kæde-retningen, hvilket svarer til henholdsvis den langs- og tværgående retning. Dette har stor betydning for de mekaniske egenskaber af det

fremstillede kompositmateriale. Et hjælpeværktøj, til karakterisering og modtagekontrol af halvfabrikater, blev udviklet i et regneark. En udskrift af denne skabelon er vedlagt i Appendix 1: Modtagekontrol. De grundlæggende informationer er sammenfattet i tabel 2.1.1:

Produkt	Jute væv 100/16
Leverandør	Nevotex Danmark Erhvervsparken 3 8400 Ebeltoft
Arealvægt	480 g/m ² (nominelt)
Pris	15 kr/m ² ≈ 40 kr/kg (Arealvægt 380 g/m ²)
Fiber orientering	Lærredsbinding med en andel på 0.7/0.3 i henholdsvis skud- og kæde-retningen.
Bemærkning	Billigt "standard" referencemateriale Se modtagekontrol i Appendix 1 for yderligere information.

Tabel 2.1.1: Karakteristika for Jute-væv 100/16 fra Nevotex Danmark

Til fremstilling af demoemner blev der yderligere anskaffet tre forskellige typer af halvfabrikata. Dels en tilfældig orienteret "needled" måtte, fra den hollandske virksomhed ENKEV Naural Fibres, dels garner med forskellige farve fra den Schweiziske virksomhed Burkhard-Dreier AG og endelig to typer væv fra den engelske leverandør Composites Evolution.

Stofferne fra Composites Evolution sælges under handelsnavnet Biotex og udmærker sig ved at naturfibrene ikke er snoet i samme grad, som det er kendt fra de tekstile naturfibre. Vævene sælges som "rene" naturfiber væv samt i hybride kombinationer, hvor termoplastiske fibre er blandet ind i garnet. Karakteristika for nogle af de anskaffede halvfabrikater fremgår af tabel 2.1.2 – 2.1.5.

Produkt	Needled green jute
Leverandør	ENKEV BV De Toek 2, P.O. Box 3 1130 AA Volendam The Netherlands
Arealvægt	300 g/m ²
Pris	1.5 EUR/m ² => 5.0 EUR/kg = 37 kr/kg
Fiber orientering	Random = tilfældig orienteret
Bemærkning	Fragt 72kg, 324 EUR

Tabel 2.1.2: Karakteristika for tilfældig orienteret jutemåtte fra ENKEV BV

Produkt	Langflachszwirne Leinen 16/2 roh
Leverandør	Burkhard-Dreier AG Lochbachstrasse 1, Postfach CH-3414 Oberburg Schweiz
Finhed	4800 m/kg = 208 tex (tex = g/1000m)
Pris	31.0 EUR/kg = 231 kr/kg
Bemærkninger	Tvundet rå/ufarvet hør garn

Tabel 2.1.3: Karakteristika for hørgarn fra Burkhard-Dreier AG

Produkt	Biotex flax fabric Hopsack 4/4
Leverandør	Composites Evolution Ltd 4A Broom Business Park Bridge Way, Chesterfield S41 9QG UK
Arealvægt	510 g/m ²
Fiber orientering	0° og 90°
Bemærkning	Benyttet til fremstilling af skammel

Tabel 2.1.4: Karakteristika for Hopsack 4/4 hør klæde fra Composites Evolution

Produkt	Biotex 40% flax/PLA fabric 3H satin
Leverandør	Composites Evolution Ltd 4A Broom Business Park Bridge Way, Chesterfield S41 9QG UK
Arealvægt	420 g/m ²
Nominel tykkelse	0.31 mm (uden porøsitet)
Fiber orientering	0° og 90°
Bemærkning	Væv baseret på hybrid-garn, hvor både fibre og matrix er blandet i et forhold, der giver et fiberindhold på 36 vol-%

Tabel 2.1.5: Karakteristika for 3H Satin klæde baseret på hør/PLA hybridgarn fra Composites Evolution

I tabel 2.1.6 er karakteristika for det overvejende ensrettede glasfiber væv, der er benyttet sammen med bio-baseret hærdeplaster angivet. Vævet svarer til den type halvfabrikat, der anvendes til fremstilling af den bærende bjælke i vindmøllevinger.

Produkt	Glasfibervæv L1200/G50-E07
Leverandør	Devold AMT AS N-6030 Langevåg Norge
Arealvægt	1250 g/m ²
Fiber orientering	1152 g/m ² i 0°-retningen 52 g/m ² i 90°-retningen 50 g/m ² i CS (±45°) retningen
Bemærkning	Vævet bliver betragtet som 0° pga den overvejende andel af fiber i denne retning

Tabel 2.1.6: Karakteristika for L1200/G50-E07 glasfiber væv fra Devold AMT

2.2 Matrix

De to hovedtyper af plast, hærdeplast og termoplast, er grundlæggende vidt forskellige. Hærdeplast er kendetegnet ved en irreversibel kemisk reaktion (krydsbinding) under opvarmning, mens termoplast er kendetegnet ved et reversibelt smelte/størkne forløb under

opvarmning/afkøling, som kan gentages. Fælles for de to typer plast gælder det, at de kun kan vurderes egnet som matrixmateriale, hvis de under fremstillingsprocessen bliver så lav viskos (tyndtflydende), at det er muligt at omslutte og væde de mange enkelte forstærkningsfibre. For hærdeplaster er det som regel muligt, at opnå en tilstrækkelig lav viskositet ved en procestemperatur, der er tæt på rumtemperatur, hvor plasten også hærder og efterfølgende efter hærdes (post cure) under øget varmepåvirkning. I modsætning til dette kræver termoplaster typisk en betydelig opvarmning, da viskositeten afhænger af procestemperaturen og falder med stigende temperatur. Ved en procestemperatur over 200 °C i for lang tid vil naturfibre typisk blive termisk nedbrudt. Det er derfor ønskeligt at identificere en termoplastisk bio-polymer, der kan opnå tilstrækkelig lav viskositet under 200 °C og samtidig efterfølgende har tilstrækkelige gode mekaniske egenskaber og herunder temperaturbestandighed.

2.2.1 Bio-baseret termoplast

Den i 2009 mest udbredte og dominerende type bio-baseret termoplast er Poly Lactid Acetat (PLA) fra NatureWorks®. PLA betegnes praktisk talt som CO₂-neutral og er attraktiv på grund sin gode mekaniske styrke og fordi den kan udvindes af fornybare ressourcer. Det er et kendt problem at PLA har en begrænset temperaturbestandighed. Internationalt forskes der i at øge temperaturbestandigheden, da det vil åbne op for flere anvendelse. Der er således udviklet forskellige typer af PLA.

I projektet er der med udgangspunkt i NatureWorks® PLA 2002D opsøgt og identificeret alternative bio-polymerer, med fokus på at øge temperaturbestandigheden. Undersøgelsen har omfattet NatureWorks® PLA 4032D, FKUR Biograde® 200C samt en række udviklingsmaterialer fra den japanske virksomhed Toray. Nogle af disse halvfabrikater har det kun været muligt at skaffe som små plast piller (granulat). For at kunne undersøge plastmaterialet var det nødvendigt først at fremstille en folie ud fra granulatet. Foliefremstillingen blev foretaget i samarbejde med DTU-MEK, der råder over en lille ekstruder, som kan fremstille folier i en bredde på 110-140mm. Et billede af foliefremstillingen er vist i Figur 2.2.1.

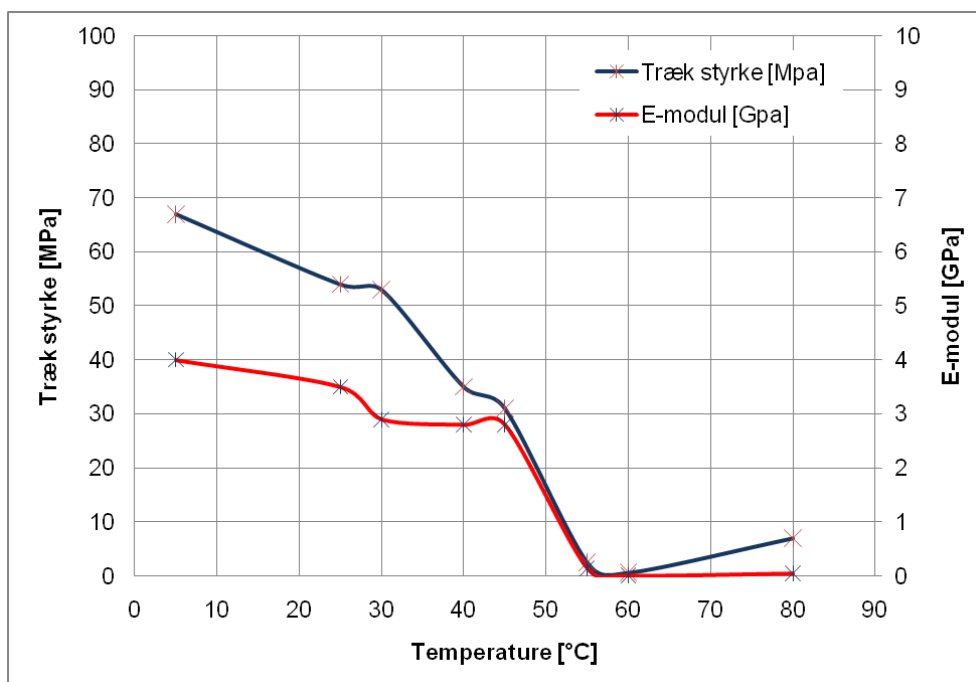


Figur 2.2.1 Foliefremstilling på ekstruder. Granulaterne hældes i tragten og smeltes fortløbende i snekken, der har tre varmezoner. For enden af snekken sidder en flad dyse. Plasten presses ud af dysen og bliver ført rundt om rullerne midt i billede, hvor folien sammenpresses og afkøles, før den oprulles, som det ses på billedets nederste højre hjørne.

NatureWorks® PLA 4032D blev valgt som matrix referencemateriale og i den forbindelse blev der ved pressekonsolidering fremstillet 2mm tykke plastplader, hvoraf der blev udskåret og testet emner i henhold til ISO 527 standarden. Tilsvarende er der for FKUR Biograde® 200C fremstillet og testet plastprøver uden forstærkning. De væsentlige informationer for de undersøgte biobaserede termoplast materialer er samlet i Tabel 2.2.1 – 2.2.4 og Figur 2.2.2 - 2.2.3.

Produkt	NatureWorks® PLA 4032D, Folie
Leverandør	I.L.P.A. S.r.l. Divisione ILIP Via Castelfranco, 52 40053 Bazzano (BO) Italy
Bredde	920mm
Nominel tykkelse	0.37mm
Pris	6.0 EUR/kg = 45 kr/kg
Bemærkninger	Hvid folie, 65kg, Fragt 275 EUR Densitet 1.24 g/cm ³ T _g : 55-62 °C T _m : 165-173 °C

Tabel 2.2.1: Karakteristika for NatureWorks® PLA 4032D folie fra ILIP (Italien)



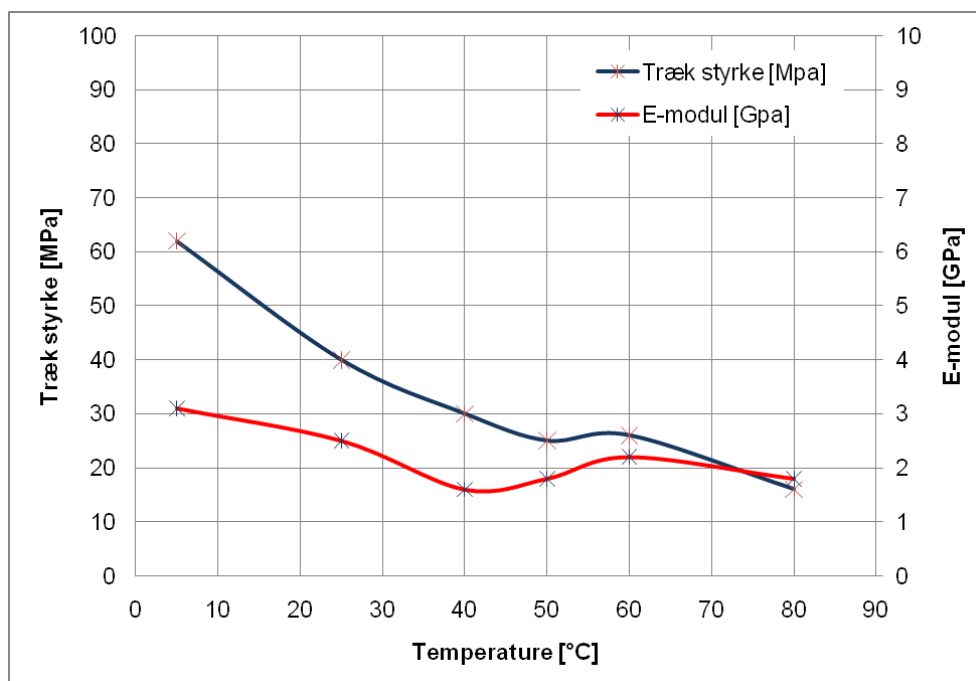
Figur 2.2.2: Træk styrke og stivhed (E-modul) for PLA 4032D som funktion af temperaturen i intervallet fra 5°C til 80°C. Målt i henhold til ISO 527 standarden på ca. 2mm tykke plast emner. Hvert punkt er gennemsnittet af 5 prøver.

Produkt	NatureWorks® PLA 2002D, Folie
Leverandør	Færch Plast A/S Rasmus Færchs Vej 1 7500 Holstebro Danmark
Bredde	600mm
Nominal tykkelse	0.45mm
Bemærkninger	Transparent folie

Tabel 2.2.2: Karakteristika for NatureWorks® PLA 2002D folie fra Færch Plast

Produkt	Biograde® C 7500, Granulat
Leverandør	FKuR Kunststoff GmbH Siemensring 79 47877 Willich Germany
Type	Granulat
Pris	5.23 EUR/kg = 39 kr/kg
Bemærkninger	Folie fremstillet på DTU-MEK ud fra granulat, bredde 135mm, tykkelse 0.5mm

Tabel 2.2.3: Karakteristika for Biograde® 200C granulat fra FKUR



Figur 2.2.3: Træk styrke og stivhed (E-modul) for FKUR Biograde® 200C som funktion af temperaturen i intervallet fra 5°C til 80°C. Målt i henhold til ISO 527 standarden på ca. 2mm tykke plast emner. Hvert punkt er gennemsnittet af 5 prøver.

Produkt	PLA CA24-002, Granulat
Leverandør	Toray Industries Inc. 1-1, Nihonbashi-Muromachi 2-chome Chuo-ku, Tokyo 103-8666 Japan
Bredde	115mm
Tykkelse	0.44mm
Bemærkninger	Materiale ikke kommerciel tilgængeligt. 100% bio-baseret halvfabrikat med filler. Folie fremstillet på DTU-MEK ud fra granulat. Det var ikke muligt at fremstille folie direkte fra CA24-002 og denne blev derfor "fortyndet" med PLA 4032D til et indhold på 25 vægt-% filler. Den fremstillet folie er relativ stiv og blev klippet i længder på ca. 1m. Tykkelse 0.44mm, bredde 115mm. En procestemperatur på 190 °C – 200 °C blev anvendt ved ekstruderingen.

Tabel 2.2.4: Karakteristika for PLA CA24-002 granulat fra Toray Industries Inc

2.2.2 Bio-baseret hærdeplast

Hærdeplaster har tidligere været forbundet med et dårligt arbejdsmiljø, hvor det ofte medførte arbejde med organiske opløsningsmidler, f.eks. styren, eller risiko for udvikling af eksem, f.eks. epoxy-hærder. Nye lukkede og forbedret procesmetoder medfører at disse arbejdsproblemer kan minimeres. Bio-baseret hærdeplaster til kompositmaterialer er relativt nye og der kendes kun enkelte eksempler på anvendelse sammen med glasfibre til bådskrog, se Figur 2.2.2.1. Plasteren hedder Envirez® 86400 INF og producenten er Ashland fra USA. Den øgede interesse for miljø og bæredygtige teknologier betyder at det må forventes at flere industrier, f.eks. vindmølleindustrien, også interesserer sig for bio-baseret hærdeplaster. For at understøtte dette har projektet også undersøgt kompositmaterialer, hvor der er anvendt kul- og glasfibre sammen med en bio-baseret hærdeplast til fremstilling af emner.



Figur 2.2.2.1: Bådskrog med Envirez® bio-baseret resin. Kilde:CompositesWorld 7/22/2008

De bio-baserede hærdeplaster er, i modsætning til termoplasterne, kendetegnet ved, at de som udgangspunkt kun er delvis bio-baseret. For eksempel er den omtalte Envirez® 86400 INF 12% bio-baseret. Med dette som udgangspunkt blev andre hærdeplaster med en større bio-baseret andel identificeret og afprøvet. Desuden blev et laminat baseret på en kommerciel epoxy, der ikke er bio-baseret fremstillet som reference for hærdeplast laminaterne. *Karakteristika for de undersøgte hærdeplaster er samlet i tabel 2.2.6 – 2.2.10*

Produkt	Envirez® 86400 INF
Forhandler	Ashland, forhandles af: Gel-Top A/S Storhaven 10 7100 Vejle Danmark
Oplyst bio-baseret andel	12%
Gel-time	22min, 1.5 wt% catalyst (Butanox M50)
Viskositet, Brookfield #3	150 mPas
Bemærkninger	Velegnet til vakuum infusion. Vil hærde ved rumtemperatur og kan (skal ikke) efterhærdes ved 60°C. I litteraturen er eksempler på anvendelse til fremstilling af chassis dele på landbrugsmaskiner og bådskrog.

Tabel 2.2.6: Karakteristika for Envirez 86400 INF fra Ashland, der i Danmark forhandles af Gel-Top A/S i Vejle.

Produkt	Epikote Resin MGS RIM 135/RIM H 137
Leverandør	IMCD Danmark A/S Fabriksvej 10 3000 Helsingør Danmark
Oplyst bio-baseret andel	0% - Petrokemisk (reference)
Gel-time	3 -4 timer (RIM H 137)
Viskositet	450 mPas (20 °C) 300 mPas (25 °C)
Bemærkninger	Epoxy resin. Epikote RIM 135 kan tilsættes en anden hærder (RIM H 134), der giver mulighed for at reducere geltid til 0.5 time. Materialet kan processes ved rumtemperatur og en forøgelse af temperaturen med 10°C vil halvere potlife.

Tabel 2.2.7: Karakteristika for Epikote Resin MGS RIM 135/RIM H 137 der i Danmark forhandles af IMCD Danmark A/S

Produkt	EPOBIOX™
Leverandør	Amroy Europe Oy P.O. Box 144 FI – 15101 Lahti Finland
Oplyst bio-baseret andel	70% from natural industrially grown and harvested natural oils like for example epoxidised pine oil waste
Gel-time	1 – 4 timer
Viskositet	1000 – 2000 mPas (20 °C) 200 - 500 mPas (40 °C)
Bemærkninger	Epoxy resin

Tabel 2.2.8: Karakteristika for EPOBIOX™ fra Amroy Europe Oy

Produkt	Super Sap™ 100/1100 Hardener
Leverandør	Entropy Research Labs, LLC 41 Federal St Unit 10 San Francisco, CA 94107 USA
Oplyst bio-baseret andel	53%
Gel-time	20 min
Viskositet (mix)	2000 cPs = 2000 mPas
Pris	Super Sap 100: 4.65 USD/lb Super Sap hardner – Med: 7.40 USD/lb
Mix ratio	2:1
Bemærkninger	Epoxy resin

Tabel 2.2.9: Karakteristika for Super Sap™ 100/1100 Hardener fra Entropy Research

Produkt	Polylite® PO-4729
Leverandør	REICHHOLD P.O.Box 2061 3202 sandefjord Norge
Oplyst bio-baseret andel	~57%
Gel-time	12-16min
Viskositet	200mPas
Bemærkninger	Polyester resin for infusion. Modifieret til projektet ud fra PO-4727

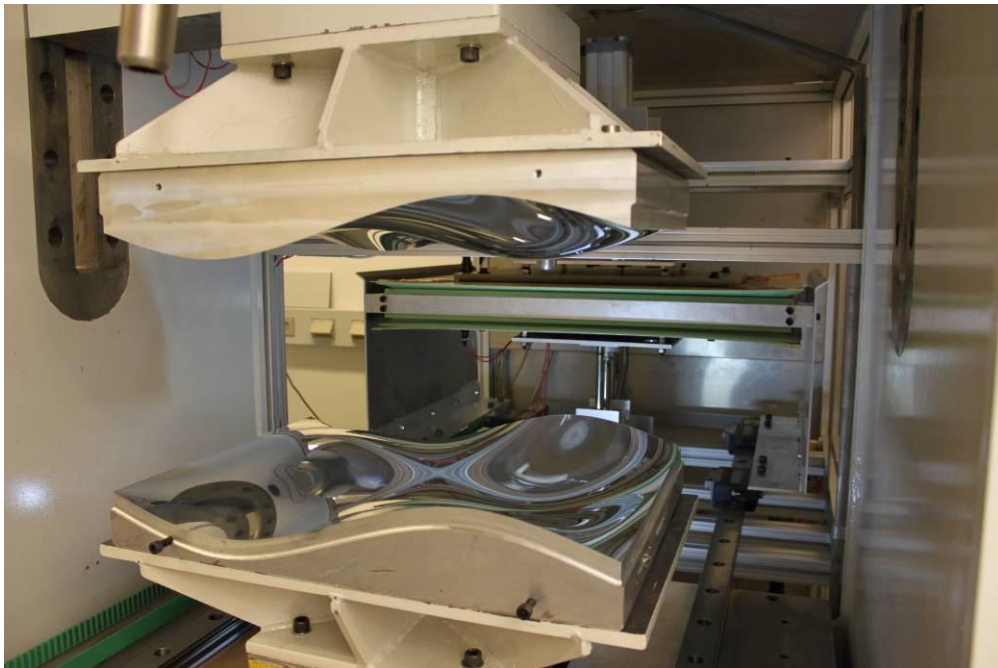
Tabel 2.2.10: Karakteristika for PolyLite® PO-4729 fra REICHHOLD

3 Metoder

3.1 Fremstilling

Pressekonsolidering og vakuum infusion blev benyttet til fremstilling af testemner for henholdsvis de termoplastiske og termohærdende kompositter. Fibrene skæres ud fra halvfabrikata under hensyn til de ønskede fiberretninger og antallet af lag. Tidligere forsøg har vist, at der i praksis, er en øvre grænse for, hvor højt et fiber volumen indhold, der kan opnås med naturfibre. Laminater baseret på klæde og tilfældig orienteret måtte er derfor fremstillet med et tilsigtet fiberindhold på 30 – 35 vol-% for at opnå en materialekvalitet uden porøsiteter og gode mekaniske egenskaber.

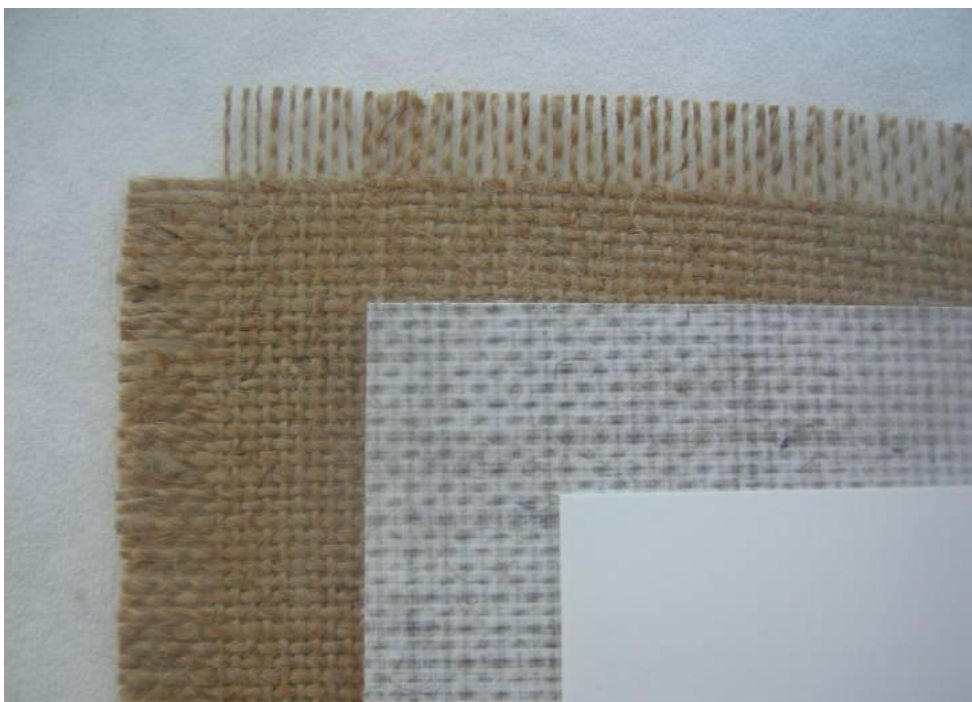
Pressekonsolidering er specielt anvendelig for kompositter med termoplastisk matrix materiale, se Figur 3.1.1. Udgangspunktet er en stak af fiber og plastmateriale, hvor der skiftevis ligger et lag af fiber og plast. Metoden kaldes også "film stacking", da plasten tilføres i form af tynde lag folie eller "film". Overfladen på et kompositemne kræver typisk ekstra matrix for at blive helt tæt (fuldt vædet). Det kan derfor anbefales, at starte og slutte et oplæg med et eller flere lag plast, da det giver en mere ensartet og fuldt vædet overflade på den konsoliderede komposit. Det bør også tilstræbes, at oplæg er symmetrisk i tykkelsesretningen, da en uensartet fiber/matrix fordeling efter konsolidering kan medfører, at laminatet krummer.



Figur 3.1.1: Pressekonsolidering af kompositmateriale med termoplast. I baggrunden ses varmeenheden, hvor materialet kan opvarmes under vakuum. Forrest ses presseenheden med monteret formdele. En transportør/vogn transporterer materialet mellem de to enheder. På billede er vognen i varmeenheden, der er lukket og hulrummet evakueret, hvilket kan ses da de lysegrønne fleksible vakuumpakninger er presset sammen.

Når stakken af fiber og matrix (oplæg) er etableret bliver den placeret mellem to teflon-slipfolier i en transportør, der automatisk håndterer materialet under hele presseprocessen. Næste trin i processen er en opvarmning af materialet under vakuum. Transportøren er udstyret med to fleksible silikonepakninger, der gør det muligt at evakuerer hulrummet mellem de to varmeplaner. Varmeplanerne er forudindstillet på den ønskede procestemperatur, f.eks. 190 °C. Når transportøren med materialet er kørt ind mellem varmeplanerne, lukker disse sammen om silikonepakningerne og hulrummet evakueres, samtidig med at opvarmningen påbegyndes. Under opvarmningen vil termoplasten smelte og væde lagene af fibermateriale. Som følge af varmeenhedens udformning er oplægget under tryk og det er overvejende i varmeenheden, kvaliteten af kompositmaterialet etableres. Opvarmningen afsluttes efter en forudindstillet tid, f.eks. 5 min, hvorefter hulrummet mellem varmeplanerne ventileres og transportøren automatisk fører materialet til pressepositionen. I presseenheden sidder det bevægelige stempel med krydshoved i bunden og top-parten er stationær. Når pressen lukkes vil stemplet løfte materialet ud af transportøren og presse det mod top-parten, hvorved materialet afkøles og konsolideres under tryk, f.eks. 2.67 N/mm², i et forudindstillet tidsrum på typisk 1 min ved 30 °C. Afkølingen af materialet sker ved simpel varmeledning i pressedelene, der er lavet af aluminium.

De vigtigste bestanddele ved pressekonsolideringen er illustreret i Figur 3.1.2. Bagerst i billede ses fibermaterialet i form af juteklædet og øverst ses en hvid PLA folie. Resultatet af en pressekonsolidering, kompositmaterialet, ses i midten, hvor strukturen fra juteklædet tydeligt kan ses i plasten, som omslutter fibermaterialet.



Figur 3.1.2: I midten ses det færdige kompositmateriale fremstillet ud fra lag af juteklædet (i baggrunden) og lag af den hvide PLA folie (forrest).

Pressekonsolidering er først og fremmest anvendelig til fremstilling af emner i relativ store styk antal. Dette skal ses i lyset af at formdelene både skal kunne tåle konsolideringstrykket og samtidig være bestandig over for procestemperaturen, hvorfor det typisk vil være metaldele. I modsætning til dette kræver vakuum infusion med hærdeplast ikke høj temperaturbestandighed. Trykket er reduceret til vakuum og relativ billige formdele kan derfor fremstilles. Vakuum infusion er således særdeles anvendelig ved udvikling af nye emner, til prototypefremstilling samt ved fremstilling af meget store eller komplekse emner, der ikke kan rummes af en presseenhed.

Vakuum infusion er en udbredt fremstillingsteknik til hærdeplast laminater. Metoden udmærker sig ved, at det er en lukket proces og dermed, at det er muligt at forbedre arbejdsmiljøet i forhold til tidligere åbne processer, som f.eks. håndoplæg. Ved oplægning og indpakning af fibermaterialet er der teoretisk ubegrænset tid til rådighed, da matrix først tilføres, når vakuum indpakningen er afsluttet. Vakuum indpakningen udformes så matrix suges ind i fibermaterialet gennem en "Inlet" slange. Hjælpematerialer i form af fordeler slanger og net i vakuumindepakningen spreder matrixmaterialet ud over hele emnet og afsluttes i et bremsende lag, der er forbundet med en "Outlet" slange. Placeringen af hjælpematerialerne er af vital betydning for en succesfuld procesafvikling. Outlet slangen er forbundet til en vakuum-pumpe via en matrix-fælde, der fanger den plast, der eventuelt måtte blive suget ud af emnet.

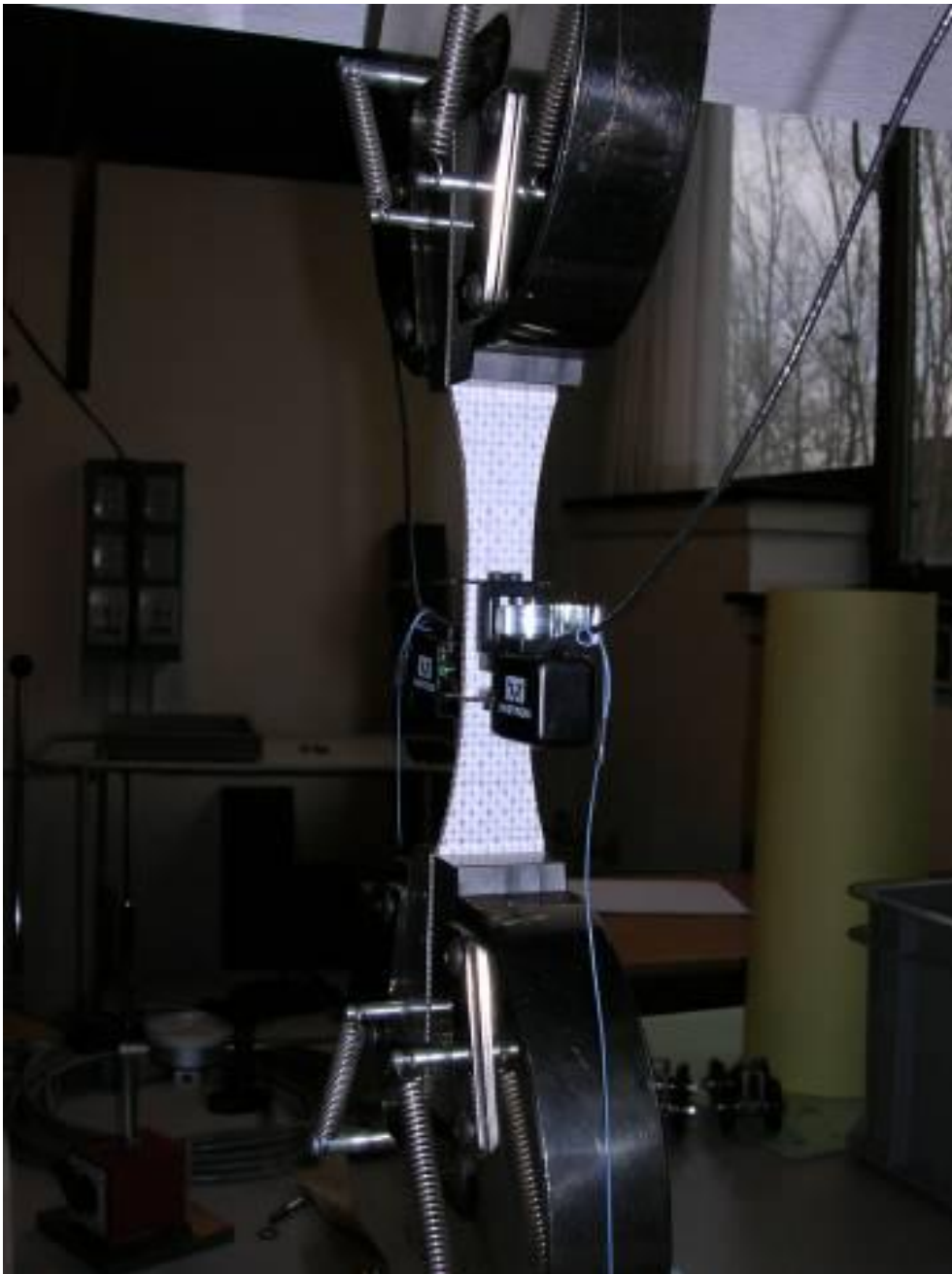
3.2 Mekanisk test

Standarden ISO 527-4 blev benyttet som udgangspunkt for trækprøvning. Rektangulære stave, 25 mm x 180 mm, blev udskåret i en af hovedretningerne fra laminaterne med en hårdmetalklinge. Hver stav blev efterfølgende bearbejdet på en CNC maskine til en "kødbens-facon", for at opnå et veldefineret 30 mm langt og 15 mm bredt rektangulært "gauge-område" på midten af prøven. Når prøveemnet var opspændt i kæberne, blev extensometre med 25 mm gauge monteret på begge sider af prøven i gauge-området. Ved test af rene plastprøver over 45 °C har det været nødvendigt at anvende video-extensometre, da plastmaterialet har været så blødt at knivene på de traditionelle extensometre beskadigede emnerne. Prøverne der blev testet ved forhøjet temperatur, blev konditioneret ved at lade dem ligge i ovnen, der var monteret på prøvestanden, under opvarmningen og frem til de var testet. Efter opspænding i kæberne og når ovnen var lukket, blev der ventet i ca. 5 minutter, for at sikre en homogen temperatur i prøven og testkammeret, før selve testen blev sat i gang.

ISO 527 standarden foreskriver en konstant vandring af stemplet under test og samtidig registrering af last og længdeændring. Lastniveauet blev målt ved hjælp af en kalibreret load cell. Sammenhørende værdier for last og længdeændring blev målt og efterfølgende databehandlet, hvorved emnets styrke og stivhed kunne bestemmes i henhold til ISO 527 standarden. Til beregningerne blev den specifikke prøves areal benyttet. Arealet blev beregnet på baggrund af tre individuelle målinger af henholdsvis tykkelse og bredde i gaugeområdet, for hver prøve.

Test blev hovedsageligt foretaget på en Instron 1115 maskine med en 10 kN eller 25 kN load cell og en hastighed på 1 mm/min eller 2 mm/min. Til hver bestemmelse er tilsigtet et minimum af 5 prøver til beregning af gennemsnit og standardafvigelse.

Et eksempel på en opspændt prøve er vist i Figur 3.2.2, hvor der er monteret extensometre på begge sider af prøven.



Figur 3.3.1: Trækprøve ved rumtemperatur med extensometre monteret på begge sider af prøven i gauge området. Trækegenskaber er målt som gennemsnittet af 5 prøver.

4 Resultater – mekaniske egenskaber

Styrken og stivheden af et kompositmateriale er domineret af fibrenes egenskaber, der typisk er størrelsesorden bedre end matrixmaterialet. Matrixmaterialets evne til at omslutte og væde fibre og ikke mindst vedhæftningen mellem fibre og matrix er af vital betydning for kompositens egenskaber. Et godt kompositmateriale er således kendetegnet ved, at matrixmaterialet overfører de påførte kræfter fra en given belastning til fiberet. Forudsætningen for dette er, at vedhæftningen mellem fiber og matrix er tilstrækkelig god.

I det følgende er resultater fra test af fremstillede kompositmaterialer gengivet. Indledningsvis er kompositmateriale baseret på juteklædet og PLA referencematerialet testet i de to hovedretninger, skud og kæde, for klædet. For at rationalisere omfanget af mekanisk test er sammenligningen af materialerne efterfølgende overvejede foretaget på baggrund af test i juteklædets skud retning.

4.1 Referencevæv, skud- og kæderetningen

Laminater baseret på Nevotex jute-væv og NatureWorks® PLA 4032D matrix (Jute/PLA 4032D) blev fremstillet ved pressekonsolidering. Ved oplæg af laminat blev der anvendt 3 lag Jute klæde og 4 lag PLA folie. Procesbetingelserne var 190 °C i 5 minutter under vakuum (20 mBar) efterfulgt af konsolidering ved et tryk på 2.67 N/mm² i 1 min ved 30 °C.

Udskæringen af juteklædet blev foretaget under hensyn til skud og kæde retningen, se evt. Figur 2.1.1, således at der efterfølgende kunne udskæres og testes prøver i de to hovedretninger. Begge laminater blev fremstillet med et fiberindhold på ca. 37 vægt-%, hvilket svarer til 33 vol-%, under antagelse af at der ikke er porøsiteter i laminatet. Fugtindholdet i jute materialet blev målt til 6 – 9 % fugt. Da fugt kan skade PLA materialet under opvarmningen, blev jutematerialet tørret før oplæg. Målt trækprøve resultater er gengivet i tabel 4.1.1.

Komposit	Test retning	Laminat tykkelse [mm]	Træk styrke [MPa]	Stivhed E-modul [GPa]	Brudforlængelse [%]
Jute/PLA 4032D	Skud	2.34	78 ± 2	8.2 ± 0.3	1.81 ± 0.06
	Kæde	2.22	59 ± 3	6.8 ± 0.3	1.59 ± 0.08

Tabel 4.1.1: Trækstyrke, E-modul og brudforlængelse i skud og kæde retningen for referencematerialet Jute/PLA 4032D med et fiberindhold på ca. 33 vol-%.

Ved modtagekontrol af Jute vævet blev der målt et forhold på 70/30 i andelen af fibre i skud og kæde retningen (warp/weft), jvnf. Appendix 1. Det betyder også at det er forventeligt at egenskaberne i skud retningen er bedre end i kæde retningen. Umiddelbart skulle forholdet mellem stivheden afspejle fiberandelen på 70/30. Årsagen til at det ikke er tilfældet kan muligvis forklares med at skud fibre er mere bugtet (crimp) end kæde fibre. Ved modtagekontrollen blev der målt et crimp på 4.2 % og 2.7 % for henholdsvis skud og kæde garnet, jvnf. Appendix 1.

4.2 HDT – heat distortion temperature – ISO 75-3

Heat distortion temperature, heat deflection temperature eller blot HDT er en ofte benyttet egenskab, der giver udtryk for temperaturbestandigheden af et materiale. Testen for bestemmelse af HDT er beskrevet i standarden ISO 75, der er underopdelt i tre sektioner, hvori nødvendige konditioner for testen er beskrevet. For kompositter med lange fibre skal HDT temperaturen bestemmes i henhold til ISO 75-3.

HDT testen kan kort beskrives som en 3-punkts bøjeprobe, hvor prøven opvarmes med en specificeret hastighed på 120 °C/time, mens den er belastet med en kraft, der er defineret ud fra materialets bøjestivhed. Prøven blødgøres som følge af opvarmningen og den temperatur, hvor emnet har en defineret standard nedbøjning (Δs), betegnes som HDT temperaturen.

Test i henhold til ISO75-3 blev udført af Teknologisk Institut og den indbefatter, at der først udføres en 3-punkts bøjeprobe i henhold til ISO 178 for bestemmelse af bøjestykke og stivhed, hvoraf lastniveauer, der skal benyttes til selve HDT testen, kan bestemmes.

To materiale kombinationer blev testet, dels referencematerialet Jute/PLA 4032D og dels en komposit baseret på Jute vævet og PLA CA24. Specielt for PLA CA24 gælder det, at den er forstærket med små partikler (filler) for at forbedre temperaturbestandigheden. Filler typen er fortrolig, men blev af leverandøren oplyst til også at være bio-baseret. Det var ikke muligt at ekstrudere folie direkte fra PLA CA24 granulatet, der var leveret med 50 vægt-% filler. Granulatet blev derfor "fortyndet" med granulat af PLA 4032D til et fillerindhold på 25 vægt-%. Den fremstillede folie var 115mm bred, ca. 0.44mm tyk og relativ stiv, hvorfor den blev klippet i længder på ca. 1 m, når den kom ud af ekstruderen.

Til begge oplæg blev der benyttet 3 lag Jute klæde og fire lag plast folie. Konditi

onerne for fremstillingen var 5 min ved 190 °C og vakuum i varmeanheden, efterfulgt af konsolideringen i pressen i 1 min ved 30 °C og et tryk på 2.67 N/mm². En del af PLA CA24 materialet blev presset ud af emnet under konsolideringen og de to fremstillede laminaer er meget ens med en tykkelse på henholdsvis 2.37mm og 2.36mm for jute/PLA 4032D og Jute/PLA CA24 laminatet. Fiberindholdet i begge laminaer blev beregnet til 36 vægt-% og prøveemner fremstillet og udskåret således, at test og sammenligningen blev foretaget i Jute vævets skud retning, hvilket svarer til Jute vævets tværgående retning.

Testbetingelserne for bøjepøverne i henhold til ISO 178 (1993) og HDT i henhold til ISO 75-3 (2004) fremgår af den vedlagte prøvningsrapport i Appendiks 2. Resultater fra testen fremgår af tabel 4.2.1.

Komposit	Bøje Styrke ISO 178 [MPa]	Bøje Stivhed ISO 178 [GPa]	Brudforlængelse ISO 178 [%]	HDT ISO 75-3 [°C]
Jute/PLA 4032D	110 ± 5	5.5 ± 0.4	3.6 ± 0.2	56 ± 0.3
Jute/ PLA CA24	99 ± 4	5.9 ± 0.3	3.1 ± 0.3	54 ± 0.1

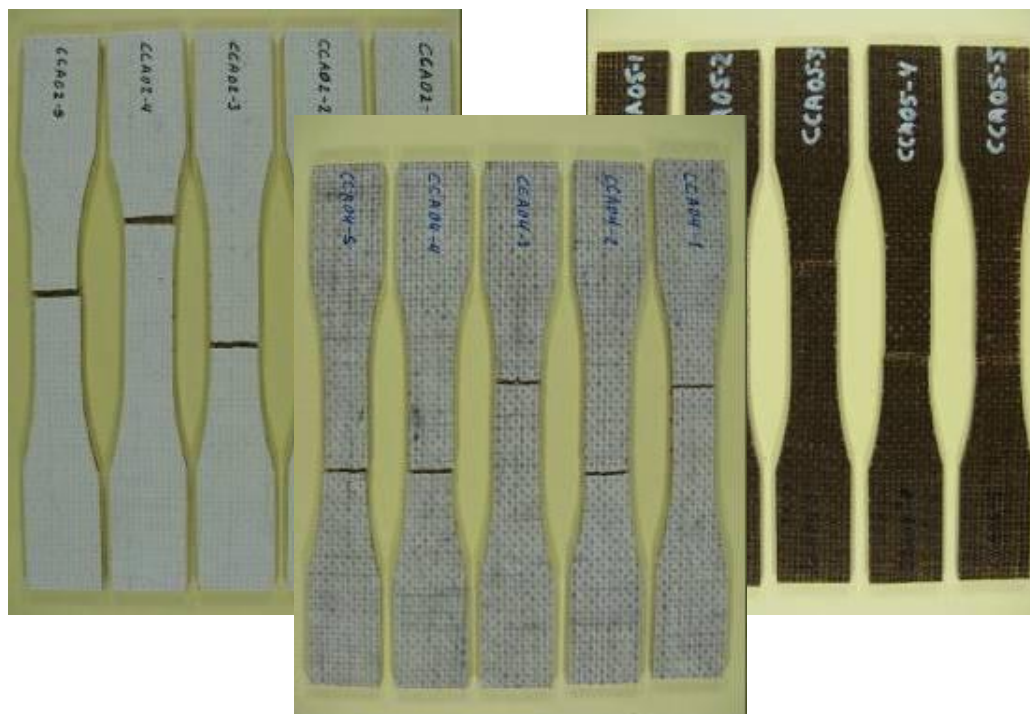
Tabel 4.2.1: Bøjestykke, -stivhed og brudforlængelse samt HDT for Jute/PLA 4032D og Jute/PLA CA24 materialerne med et fiberindhold på 36 vægt-%.

Tilsætningen af små partikler i PLA CA24 plasten har forbedret stivheden af komposit materialet med ca. 10 %, men på bekostning af en tilsvarende ca. 10 % reduktion af styrken, når der sammenlignes med PLA 4032D kompositmaterialet. Det fremgår også af tabel 3.2.1, at den bestemte HDT for de to materialer, henholdsvis 56 °C og 54 °C, stor set er ens og partiklerne har ikke medført en forbedring af temperaturbestandigheden.

4.3 Egenskaber for termoplast fiberkompositter

Sammenligning af de anskaffede termoplastiske matrixmaterialer er foretaget på baggrund af kompositter fremstillet ud fra jute referenceklædet. Der er tilsigtet et fiberindhold på 30 - 35 vol-% og en laminatdykkelse på 2 mm for alle kombination. Til hvert laminat er der anvendt tre lag af juteklæde, der før oplæg blev tørret i en vakuumovn ved 40 °C natten over. Pressekonsolidering af laminaterne med termoplastisk matrix blev foretaget på baggrund af en opvarmning af materialet under vakuum i et temperaturinterval, der varierede fra 190 °C til 225 °C. Tiden for opvarmningen blev for samtlige prøveemne laminater fastlagt til 5 minutter, efterfulgt af en afkøling ved 30 °C under tryk i 1 minut. Konsolideringstrykket lå i intervallet fra 0.7 – 2.7 N/mm². Nøgledata er gengivet for de respektive laminater sammen med resultaterne fra den mekaniske test.

Ved fremstillingen blev der taget højde for vævets skud og kæde retning, da testemner efterfølgende udelukkende er udskåret i vævets skudretning. Eksempler på testede emner, hvor bruddet i emnet er synligt, fremgår af Figur 4.3.1.



Figur 4.3.1: Prøveemner fra tre testserier med fem prøver i hver. Til venstre ses jute/PLA 2002D, til højre jute/PLA CA24 og i midten referencematerialet jute/PLA4032D

4.3.1 Jute/PLA 4032D

Materialer:

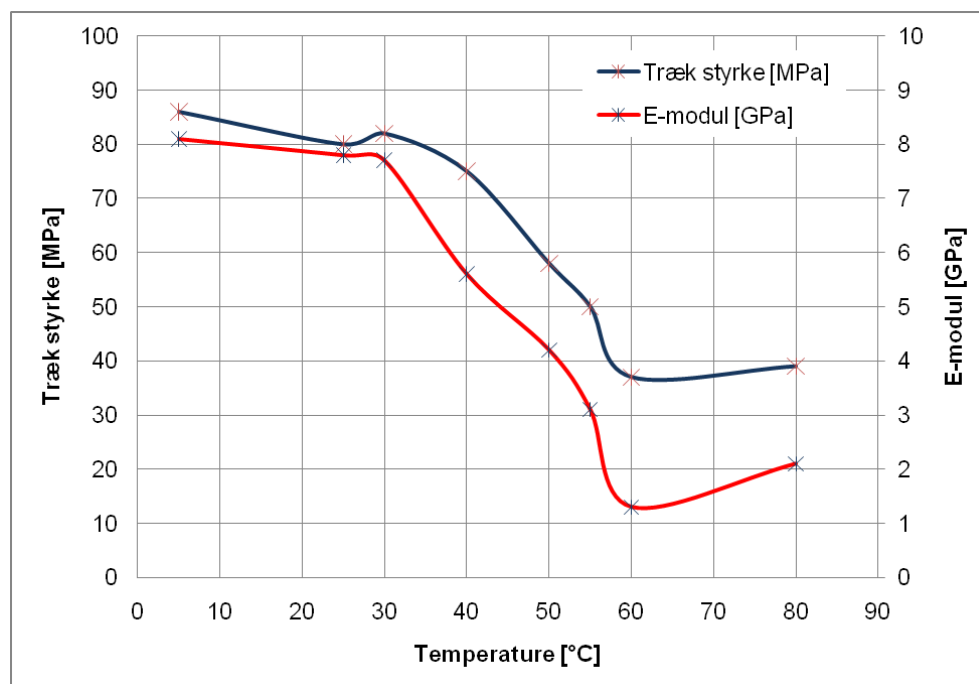
- 3 stk Juteklæde 100-16 fra Nevotex
 - Arealvægt: 384 g/m² (tørret 360 g/m², 6% fugt)
 - Densitet: 1.5 g/cm³.
- 4 stk PLA 4032D folie fra NatureWorks
 - Tykkelse: 0.37 mm
 - Densitet: 1.24 g/cm³
 - Glasovergangstemperaturen, T_g: 55 - 62 °C
 - Smeltetemperaturen, T_m: 165 - 173 °C

Oplæg med 3 stk juteklæde og 4 stk PLA 4032D giver en fiberandel på 37 vægt-%, hvilket svarer til 33 vol-% og en laminatdensitet på 1.32 g/cm³, hvis der ikke er porøsiteter i laminatet. Opvarmning af materialet blev foretaget ved 190 °C i 5 min under ~20 mBar vakuum. Umiddelbart herefter blev komposit materialet presse-konsolideret ved 30 °C i 1 minut. Trykket under konsolideringen var 2.7N/mm².

Der er målt trækegenskaber, styrke og stivhed (E-modul), ved forskellige temperaturer i intervallet fra 5 °C – 80 °C og resultaterne er vist i Tabel 4.3.1.1 samt grafisk i Figur 4.3.1.1.

Jute/PLA 4032D, fiberandel 37 vægt-%								
Temperatur (°C)	5	25	30	40	50	55	60	80
Styrke (MPa)	86	80	82	75	58	50	37	39
E-modul (GPa)	8.1	7.8	7.7	5.6	4.2	3.1	1.3	2.1

Tabel 4.3.1.1: Trækstyrke og stivhed (E-modul) ved temperaturer i intervallet fra 5 °C til 80 °C for jute/PLA 4032D laminater med 37 vægt-% fiberindhold.



Figur 4.3.1.1: Grafisk plot af trækstyrke og stivhed ved temperaturer i intervallet fra 5 °C til 80 °C for jute/PLA 4032D laminater med 37 vægt-% fiberindhold.

4.3.2 Jute/PLA 2002D

Materialer:

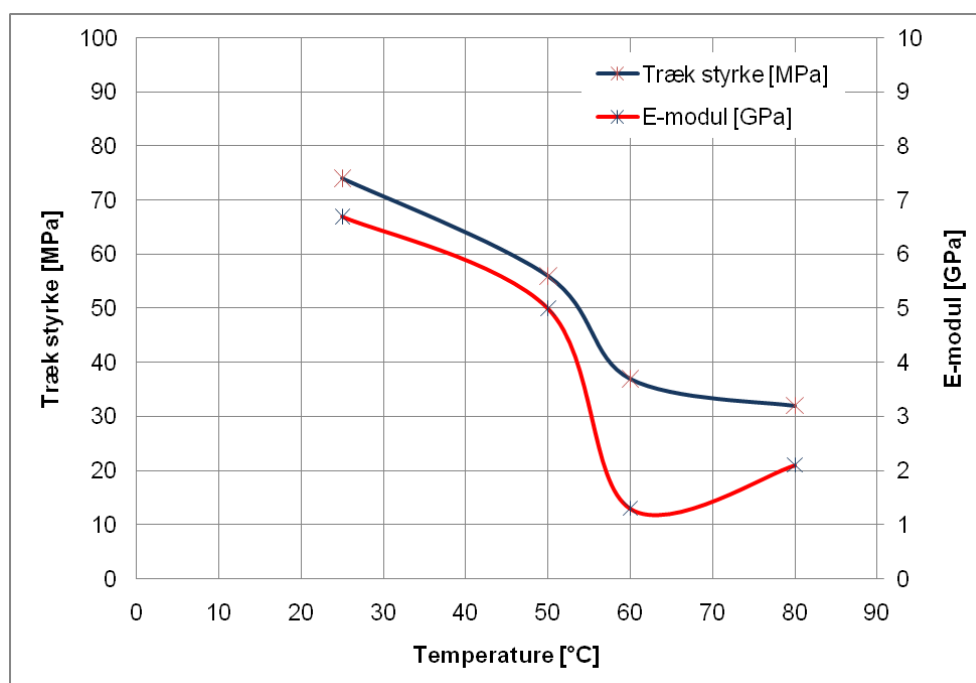
- 3 stk Juteklæde 100-16 fra Nevotex
 - Arealvægt: 384 g/m² (tørret 360 g/m², 6% fugt)
 - Densitet: 1.5 g/cm³.
- 4 stk PLA 2002D folie fra NatureWorks
 - Tykkelse: 0.45 mm
 - Densitet: 1.24 g/cm³
 - Glasovergangstemperaturen, T_g: 58 °C
 - Smeltetemperaturen, T_m: 150 – 160 °C

Oplæg med 3 stk juteklæde og 4 stk PLA 2002D giver en fiberandel på 33 vægt-%, hvilket svarer til 29 vol-% og en laminatdensitet på 1.32 g/cm³, hvis der ikke er porøsiteter i laminatet. Opvarmning af materialet blev foretaget ved 190 °C i 5 min under ~20 mBar vakuum. Umiddelbart herefter blev komposit materialet presse-konsolideret ved 30 °C i 1 minut. Trykket under konsolideringen var 2.67N/mm².

Der er målt trækegenskaber, styrke og stivhed (E-modul), ved forskellige temperaturer i intervallet fra 25 °C – 80 °C og resultaterne er vist i Tabel 4.3.2.1 samt grafisk i Figur 4.3.2.1.

Jute/PLA 2002D, fiberandel 33 vægt-%				
Temperatur (°C)	25	50	60	80
Styrke (MPa)	74 ± 3	56 ± 3	37 ± 1	32 ± 1
E-modul (GPa)	6.7 ± 0.2	5.0 ± 0.2	1.3 ± 0.2	2.1 ± 0.1

Tabel 4.3.2.1: Trækstyrke og stivhed (E-modul) ved temperaturer i intervallet fra 5 °C til 80 °C for jute/PLA 2002D laminat med 33 vægt-% fiberindhold.



Figur 4.3.2.1: Grafisk plot af trækstyrke og stivhed ved temperaturer i intervallet fra 25 °C til 80 °C for jute/PLA 2002D laminater med 33 vægt-% fiberindhold.

4.3.3 Jute/Biograde C7500

Materialer:

3 stk Juteklæde 100-16 fra Nevotex

Arealvægt: 384 g/m² (tørret 360 g/m², 6% fugt)

Densitet: 1.5 g/cm³.

4 stk Biograde C7500 folie, fremstillet ud fra granulat fra FKUR

Tykkelse: 0.5 mm

Densitet: 1.29 g/cm³

Glasovergangstemperaturen, T_g: 111 °C

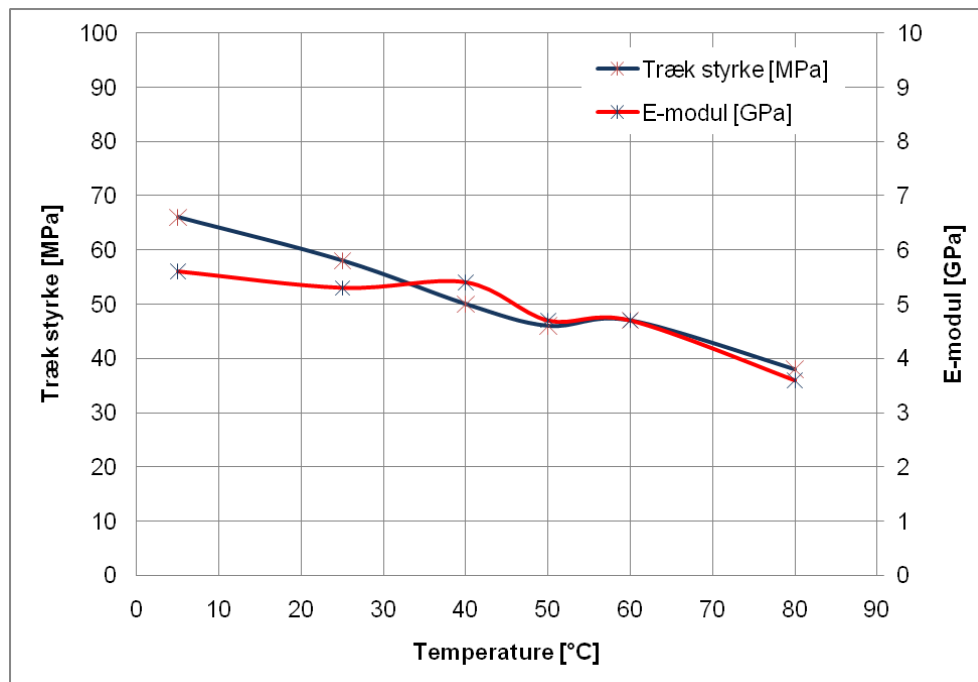
Smeltetemperaturen, T_m: >180 °C

Oplæg med 3 stk juteklæde og 4 stk Biograde C7500 giver en fiberandel på 35 vægt-%, hvilket svarer til 32 vol-% og en laminatdensitet på 1.36 g/cm³, hvis der ikke er porøsiteter i laminatet. Opvarmning af materialet blev foretaget ved 225 °C i 5 min under ~20 mBar vakuum. Umiddelbart herefter blev komposit materialet presse-konsolideret ved 30 °C i 1 minut. Trykket under konsolideringen var 3.14 N/mm².

Der er målt trækegenskaber, styrke og stivhed (E-modul), i intervallet fra 5 °C – 80 °C og resultaterne er vist i Tabel 4.3.3.1 samt grafisk i Figur 4.3.3.1.

Jute/Biograde C7500– procestemperatur 225°C, fiberandel 35 vægt-%						
Temperatur (°C)	5	25	40	50	60	80
Styrke (MPa)	66	58	50	46	47	38
E-modul (GPa)	5.6	5.3	5.4	4.7	4.7	3.6

Tabel 4.3.3.1: Trækstyrke og stivhed (E-modul) ved temperaturer i intervallet fra 5 °C til 80 °C for jute/Biograde C7500 laminat med 35 vægt-% fiberindhold.



Figur 4.3.3.1: Grafisk plot af trækstyrke og stivhed ved temperaturer i intervallet fra 25°C til 80 °C for jute/Biograde C7500 laminater med 35 vægt-% fiberindhold.

4.3.4 Jute/PLA CA24

Materialer:

- 3 stk Juteklæde 100-16 fra Nevotex
 - Arealvægt: 384 g/m² (tørret 360 g/m², 6% fugt)
 - Densitet: 1.5 g/cm³.
- 4 stk PLA CA24 folie, fremstillet ud fra granulat fra Toray
 - Tykkelse: 0.44 mm
 - Densitet: 1.3 g/cm³
 - Glasovergangstemperaturen, T_g: >62 °C

Oplæg med 3 stk juteklæde og 4 stk PLA CA24 (140 mm x 220 mm) giver en fiberandel på 32 vægt-%, hvilket svarer til 29 vol-% og en laminatdensitet på 1.36 g/cm³, hvis der ikke er porøsiteter i laminatet. Denne PLA er filler forstærket med en naturfiber, hvilken det drejer sig om er ikke oplyst fra producentens side. Da filleren medfører at viskositeten af matrix materialet øges er der lavet forsøg med forhøjet proces-temperaturer med henblik på at sænke viskositeten, forbedre materialekvaliteten og de mekaniske egenskaber. Opvarmning af materialet blev således foretaget ved henholdsvis 190 °C, 210 °C og 220 °C i 5 min under ~20 mBar vakuum. Umiddelbart herefter blev komposit materialet presse-konsolideret ved 30 °C i 1 minut. Trykket under konsolideringen var 6.5 N/mm².

Der er målt trækegenskaber, styrke og stivhed (E-modul), i intervallet fra 25 °C – 80 °C for hvert af de fremstillede laminater og resultaterne er vist i Tabel 4.3.4.1 – 4.3.4.3.

Jute/PLACA24 – procestemperatur 190 °C					
Temperatur (°C)	25	40	50	60	80
Styrke (MPa)	52 ± 5	52 ± 3	47 ± 7	36 ± 1	30 ± 2
E-modul (GPa)	7.1 ± 2	8.1 ± 0.2	4.7 ± 2	1.3 ± 0.8	2.0 ± 0.5

Tabel 4.3.4.1: Jute/PLA CA24, Styrke og E-modul i intervallet fra 5 °C til 80 °C, estimeret fiberindhold 32 vægt-%, procestemperatur 190 °C.

Jute/PLACA24 – procestemperatur 210 °C					
Temperatur (°C)	25	40	50	60	80
Styrke (MPa)	58 ± 7	50 ± 2	38 ± 2	31 ± 2	30 ± 2
E-modul (GPa)	8.7 ± 0.4	8.6 ± 0.9	4.3 ± 0.8	1.6 ± 0.1	3.0 ± 0.3

Tabel 4.3.4.2: Jute/PLA CA24, Styrke og E-modul i intervallet fra 5 °C til 80 °C, estimeret fiberindhold 32 vægt-%, procestemperatur 210 °C.

Jute/PLACA24 – procestemperatur 220 °C					
Temperatur (°C)	25	40	50	60	80
Styrke (MPa)	54 ± 1	48 ± 4	33 ± 5	27 ± 1	29 ± 3
E-modul (GPa)	9.8 ± 0.5	9.0 ± 0.8	3.5 ± 0.6	1.6 ± 0.2	3.7 ± 0

Tabel 3.3.4.3: Jute/PLA CA24, Styrke og E-modul i intervallet fra 5 °C til 80 °C, estimeret fiberindhold 32 vægt-%, procestemperatur 220 °C.

En øget procestemperatur medfører generelt at stivheden af kompositten forbedres, men på bekostning af en overordnet mindre af styrken.

4.4 Egenskaber for jute/hærdeplast kompositter

Sammenligning af de anskaffede termohærdende matrixmaterialer er foretaget på baggrund af kompositter fremstillet ud fra jute referencevævet. Til hvert laminat er der anvendt tre lag juteklæde, der er klippet i rektangulære stykker på 300 mm x 450 mm (skud x kæde) og kæde retningen er angivet på laminatet. Før oplæg blev jute materialet tørret i en vakuumnovn ved 40 °C natten over.

Vakuuminfusion ved rumtemperatur blev benyttet til fremstilling af kompositter baseret på termohærdende matrix. Vakuuminpakningen og placeringen af hjælpematerialer var grundlæggende ens for de fremstillede laminater. De undersøgte matrix materialer hærder alle ved rumtemperatur, så de kan afformes, og blev efterfølgende efterhærdet natten over ved 60 °C i 18 – 24 timer.

Udskæringen af prøveemner og trækprøver blev udført med udgangspunkt i ISO 527. Test blev foretaget på en Instron 1115 maskine med en 10kN Load cell og en hastighed på 1 mm/min. For at rationalisere omfanget af mekanisk test er sammenligningen af materialerne udelukkende foretaget på baggrund af test i jute vævets skud retning. Der er målt trækegenskaber, styrke og stivhed (E-modul), i intervallet fra 25 °C – 80 °C for hvert af de fremstillede laminater og resultaterne er samlet i Tabel 4.4.1 og Tabel 4.4.2.

Komposit	Fiber vægt [g]	Laminat tykkelse [mm]	Fiber andel [vol-%]
Jute/Envirez	151.9	2.62	29
Jute/Polylite 4729	154.0	2.32	33
Jute/Hexion 135/137	152.0	2.52	30
Jute/Epobiox	151.2	2.48	30
Jute/SuperSap 1100	151.0	2.34	32

Tabel 4.4.1: Fiberindholdet er beregnet på baggrund den målte fibervægt (tør) og den målte tykkelse af laminaterne. Der er opnået sammenligneligt fiberindhold i laminaterne på 29 – 33 vol-%.

Komposit	Træk styrke [MPa]			E-modul [GPa]		
	25°C	50°C	80°C	25°C	50°C	80°C
Jute/Envirez	63	56	39	7.2	5.8	3.7
Jute/Polylite 4729	72	62	43	7.8	6.5	4.8
Jute/Hexion 135/137	84	71	36	8.0	6.7	2.0
Jute/Epobiox	81	38	22	7.5	1.2	1.0
Jute/SuperSap 1100	82	63	33	7.6	5.4	1.2

Tabel 4.4.2: Trækstyrke og stivhed (E-modul) ved tre temperaturer i intervallet fra 25°C til 80°C for jute kompositter med termohærdende matrixmateriale.

Trækprøveresultaterne for de delvis bio-baserede polyester og epoxy kompositmaterialer i Tabel 4.4.2 er kun delvis på højde med resultaterne for den konventionelle epoxy, Hexion 135/137. Det fremgår også at egenskaberne for alle de testede kompositter er meget temperaturafhængig.

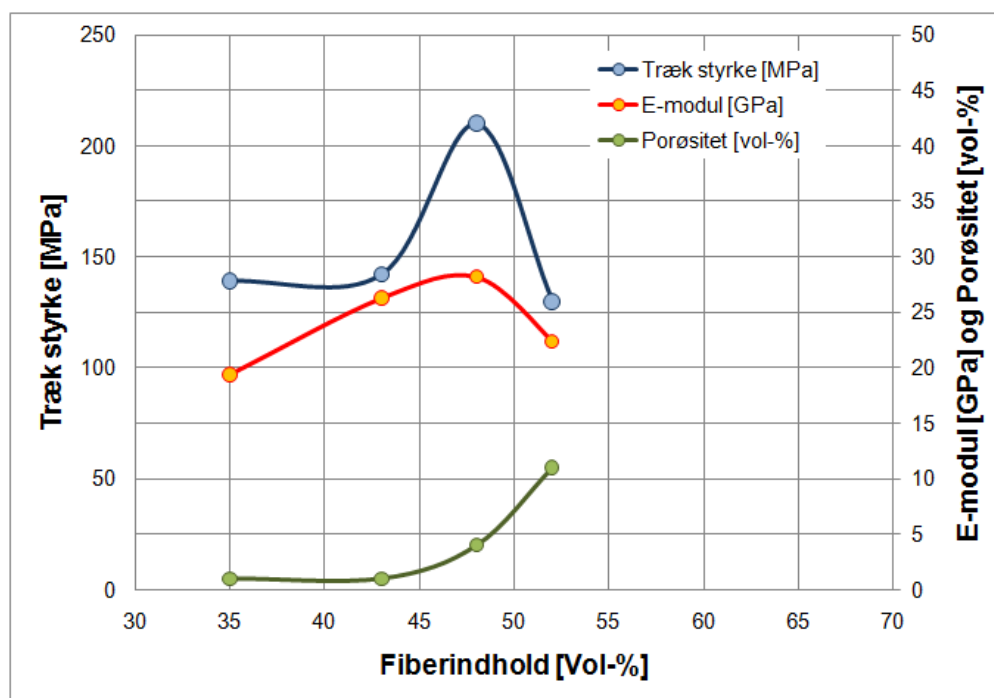
4.5 Ensrettede hørfiber- kompositter med varierende fiberindhold

En testserie der omfattede ensrettede hørfiber kompositter blev fremstillet med et tilsigtet varierende fiberindhold i intervallet fra 35 vol-% til 60 vol-%. Laminaterne blev fremstillet ved kontrolleret at vikle et garn af hørfiber omkring en metalramme og efterfølgende benytte rammen som et lag af fibermateriale i forbindelse med oplæg og pressekonsolidering. Ved at ændre på antallet af viklinger var det muligt at variere fiberindholdet i de fremstillede laminater. Materialer benyttet til laminater:

Hørgarn, Langflachszwirne Leinen 16/2 fra Burkhard-Dreier AG

PLA 4032D folie fra NatureWorks

Opvarmning af materialet blev foretaget ved 190 °C i 5 min under ~20 mBar vakuum. Umiddelbart herefter blev komposit materialet presse-konsolideret ved 30 °C i 1 minut. Der er målt trækegenskaber, styrke og stivhed (E-modul), i laminaternes hovedretning (0°) på baggrund af prøver der var 25 mm x 180 mm, bearbejdet til "kødben facon", se afsnit 3.2. Resultaterne er vist i Figur 4.5.1.



Figur 4.5.1: Målt trækstyrke, E-modul og porøsitetsindhold for ensrettede (0°) hørfiber kompositter med PLA matrix..

Som forventet er der i praksis en øvre grænse for, hvor højt et fiberindhold, der kan kompakteres i kompositmaterialet. Dette kommer til udtryk som et kraftigt stigende porøsitetsindhold og reducerede mekaniske egenskaber. For det undersøgte materiale er de bedste egenskaber målt ved et fiberindhold på 48 vol-%, hvor porøsitetsindholdet er målt til 4 vol-%, trækstyrken er bestemt til 210 MPa og Stivheden til 28 GPa. Prøverne er alle brækket i opspændingen, uden for gauge området, og derfor vi den reelle styrke af kompositmaterialet være højere.

4.6 Egenskaber for 0°- glasfiber kompositter

Kompositter baseret på et glasfibervæv, med fibre overvejende orienteret i den langsgående retning, og hærdeplast blev fremstillet og testet. Glasfibervævet fra Devold AMT er benævnt L1200/G50-E07. Den totale arealvægt for vævet er oplyst til 1250 g/m², hvoraf de 1152 g/m² er orienteret i 0°- retningen, der svarer til vævets kæde-retning. Den resterende del af glasset er ligeligt fordelt med ca. 50 g/m² i 90°- og ±45° retningen.

Som matrixmateriale blev SuperSap 1100 epoxy, der ifølge leverandøren Entropy Research er 53 % bio-baseret, sammenlignet med en 57 % bio-baseret polyester, PolyLite 4729, fra Reichhold. En ikke bio-baseret konventionel polyester, PolyLite 413-575, også fra Reichhold, blev brugt til fremstilling af referencelaminater. Vakuuminfusionen af emnerne blev foretaget med to lag glasfiber og en forventet laminatrykkelse på ca. 2mm. De fremstillede laminater har et estimeret fiberindhold på 51 – 54 vol-%. Fiberindholdet er estimeret ud fra tykkelsen af laminaterne og glasvævets arealvægt.

Rektangulære prøveemner blev fremstillet i både 0°- og 90°-retningen med dimensioner på henholdsvis 15 mm x 250 mm og 25 mm x 250 mm. Tabs blev monteret på begge prøvetyper og trækprøver blev udført med følgende konditioner:

Test maskine SN: 88r1362

Load cell SN: UK 058, 25kN

Strain sensor: 2 Extensometer, SN:1862 og SN:1931

Gauge længde: 25mm

Displacement rate: 0.033 mm/s = 2 mm/min

E-modulet er beregnet i området fra 0.05 % til 0.25 % strain.

Resultater er gengivet i tabel 4.6.1.

Komposit	Fiber indhold [vol-%]	Trækstyrke [MPa]		E-modul [GPa]	
		0°	90°	0°	90°
Glas/PolyLite 413-575	51	782 ± 38	49 ± 3	39.2 ± 1.2	12.0 ± 1.7
Glas/PolyLite 4729	54	773 ± 52	53 ± 5	40.7 ± 1.8	10.6 ± 0.1
Glas/SuperSap 1100	53	821 ± 4	44 ± 5	40.0 ± 1.8	10.3 ± 0.2

Tabel 4.6.1: Trækprøve resultater i 0°- og 90°-retningen for overvejende ensrettede glasfiber-kompositter. En konventionel polyester, PolyLite 413-575, er sammenlignet med en 57 % bio-baseret polyester, PolyLite 4729, samt en 53 % bio-baseret epoxy, SuperSap 1100.

Trækprøveresultaterne for de delvis bio-baserede kompositmaterialer i Tabel 4.6.1, PolyLite 4729 og Supersap 1100, er fuldt på højde med resultaterne for den konventionelle polyester PolyLite 413-575. Det skal bemærkes, at en test af vedhæftningen mellem fiber og matrix, f.eks. ved en forskydningsprøve eller udmattelsestest muligvis vil afsløre, om der er væsentlig forskel på de undersøgte materialer. Det anbefales derfor at foretage disse test som en naturlig fortsættelse af projektarbejdet.

5 Fremstillingsprocesser for 3D emner

Bio/bio-kompositter forventes blandt andet at kunne anvendes til fremstilling af skalmøbler. Det skal blandt andet ses i lyset af de fysiske begrænsninger, der er relateret til konventionel møbelfiner, der normalt vil revne og sprække, hvis det udsættes for dobbeltkrumme flader, det vil sige bøjes i mere end én retning ad gangen, som det er vist i Figur 5.1.



Foto: Reholz

Figur 5.1: Konventionel møbelfiner revner og sprækker på langs af fibre, hvis strukturen indeholder dobbeltkrumme områder. Under den yderste møbelfiner på billedet ses et lag af kerne-finer, der også er sprækket i den modsatte retning.

Problemet kan delvis løses ved samtidig at slidse møbelfineren på langs og på tværs af fiberretningen. Sådanne 3D formfinere forhandles af den tyske virksomhed Reholtz GmbH og resultatet er vist i Figur 5.2.

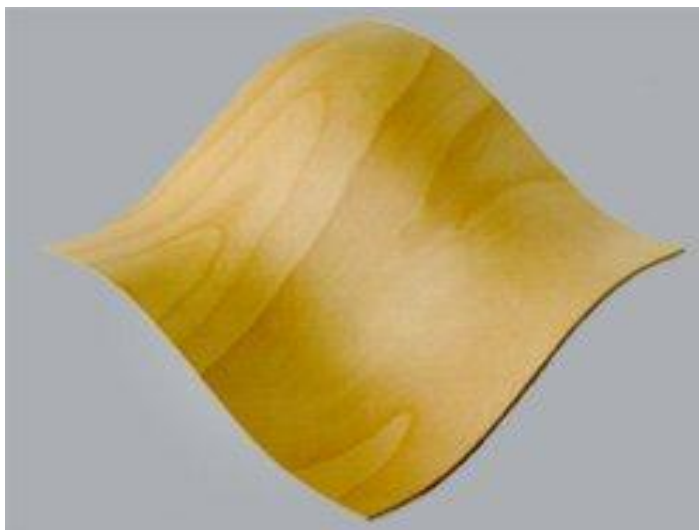


Foto: Reholz

Figur 5.2: Reholtz® 3D formfiner. Ingen revner og sprækker i strukturen af det samme emne som i Figur 5.1.

Møbelfremstilling baseret på konventionel træfiner foregår ved, at enkelte lag af finer påføres en varmhærdende lim og stables i den ønskede sekvens (oplæg) og kort herefter placeres i en presseenhed, hvor stakken formgives og hærdes i et varmt formværktøj under tryk. Ved etablering af oplæg skal kernefineren retningsorienteres i forhold til den yderste møbelfiner. Naturligt forekommende sprækker på langs af fiberretningen i kernefineren skal fordeles, så de gør mindst mulig skade i de krydslagte lag. Stablingen af de enkelte lag finer er derfor et typisk tidskrævende arbejde, der kræver en visuel menneskelig vurdering, der svært kan automatiseres og rationaliseres.

Fiberkompositmaterialer ligger ikke under for de geometriske begrænsninger i udformningen og vurderes bedre egnet for automatisering, da halvfabrikata kan fremstilles mere homogent. Procesteknisk er specielt termoplast velegnet til automatisering og masseproduktion, som det er kendt fra f.eks. sprøjttestøbning. Ulempen for termoplast er formomkostningerne, der typisk er relativ høje, eftersom temperaturen og trykket er højt, og metalforme er derfor som regel en nødvendighed.

I et udviklingsforløb er der tit ønske om og behov for at kunne fremstille en tidlig prototype af emnet. Dyre formomkostninger og vanskelige proces-betingelser ved relativ høje temperaturer gør det uhensigtsmæssig at anvende termoplastmaterialer til prototyper. I stedet kan termohærdende kompositmaterialer med fordel anvendes, da de kan fremstilles ved rumtemperatur, ikke kræver et højt tryk og formdele kan fremstilles ud fra meget billige materialer. På den måde kan termoplast- og hærdeplast-kompositter supplere hinanden. Projektet har undersøgt muligheden for at fremstille hærdeplastkompositter med billige formdele samt udviklet et pressekoncept for fremstilling af termoplastkompositter, der egner sig til masseproduktion.

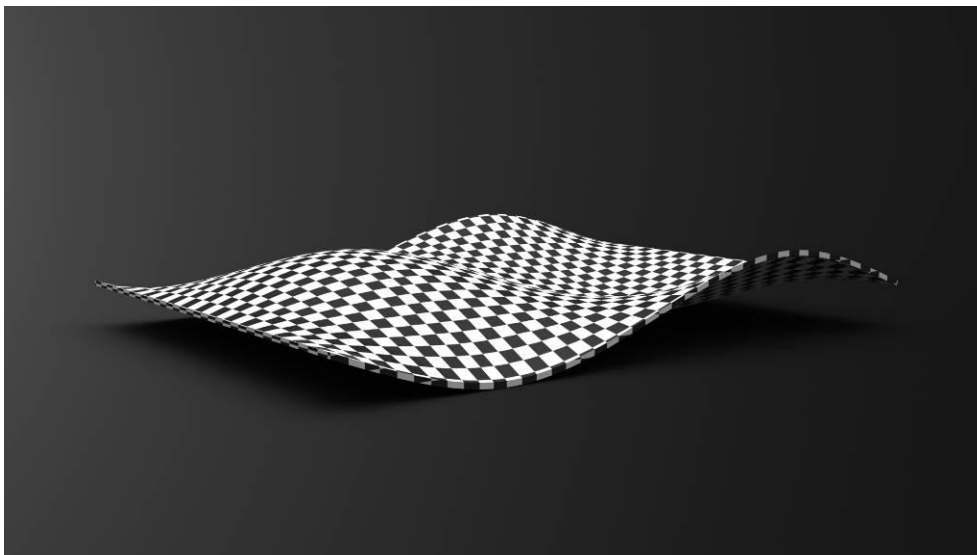
5.1 Presseenhed – 3D termoplastkompositter

En presseenhed, der kunne håndtere 1 mm - 3 mm tykke laminater i en kombineret vakuum/varme-zone med et areal på 300 mm x 300 mm blev ombygget med henblik på illustration af en potentiel presseproces til masseproduktion af kompositemner. Ved møbel fremstilling ligger den ønskede tykkelse på kompositmaterialet i området fra 2 mm til 10 mm. Foruden øget emnetykkelse var det samtidig ønskeligt at øge arealet af varme/vakuums-zonen til 400 mm x 600 mm, for en mere realistisk undersøgelse og demonstration af presseprocessen.

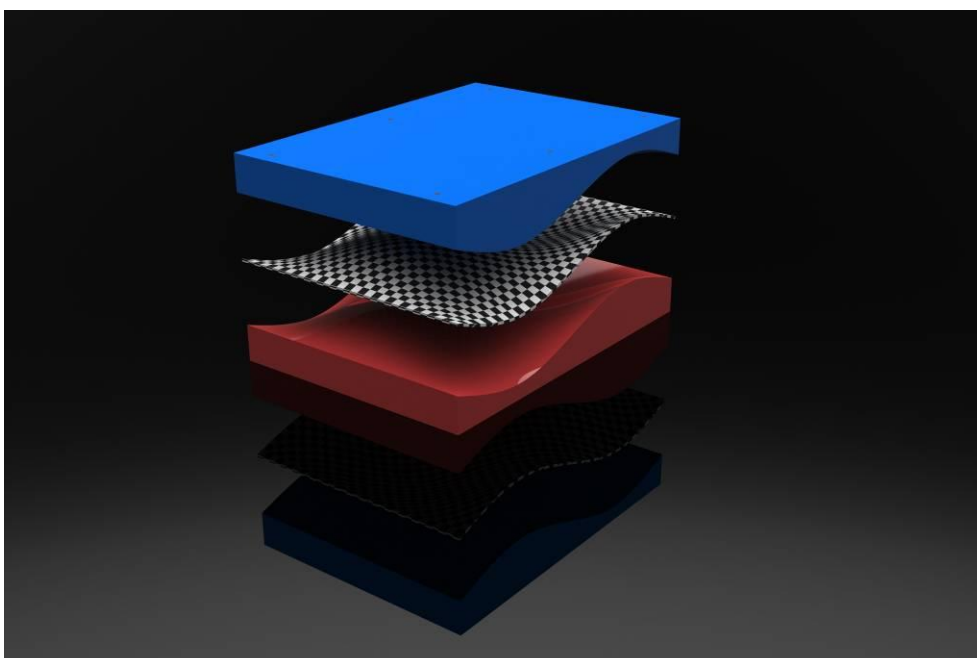
Presseprocessen er beskrevet i afsnit 3.1, hvor det fremgår at en vital del af processen er opvarmningen af oplæget i vakuum/varme-zonen. Håndtering af materialet i forbindelse med pressekonsolidering kræver, at det er muligt at flytte en opvarmet klæbrig stak af naturfibre og plast fra vakuum/varme-zonen til presseenheden, hvor materialet afkøles og konsolideres. For emner med 3D geometri er det ikke muligt at håndtere det opvarmede materiale mellem to slipfolier, da slipfolierne vil krølle og blive deformeret i presseenheden. Varmelegemerne er derfor udstyret med en slipfolie, i form af et teflonbelagt glasvæv, der automatisk trækkes af det opvarmede materiale, når det flyttes fra varme/vakuums-zonen til presseenheden. Ved den efterfølgende afkøling og konsolidering i presseenheden vil der for 3D-emner let kunne forekomme uønskede folder og indeslutninger i materialet. Emnegeometrien har stor indflydelse på en

hensigtsmæssig håndtering af materialet, hvis folder skal undgås og en ensartet emnetykkelse/konsolidering opnås.

Til undersøgelse af presseprocessen blev der valgt et demoemne, der vurderes at være teknisk udfordrende og relevant. Emnegeometrien blev designet af industriel designer Martin Larsen på baggrund af et ønske om at kunne illustrere kompositmaterialets dobbeltkrumme muligheder samt de fysiske rammer for pressen. Det valgte demoemne er vist i Figur 5.1.1 og på baggrund af dette kunne udformningen af formdelene fastlægges, som illustreret i Figur 5.1.2.



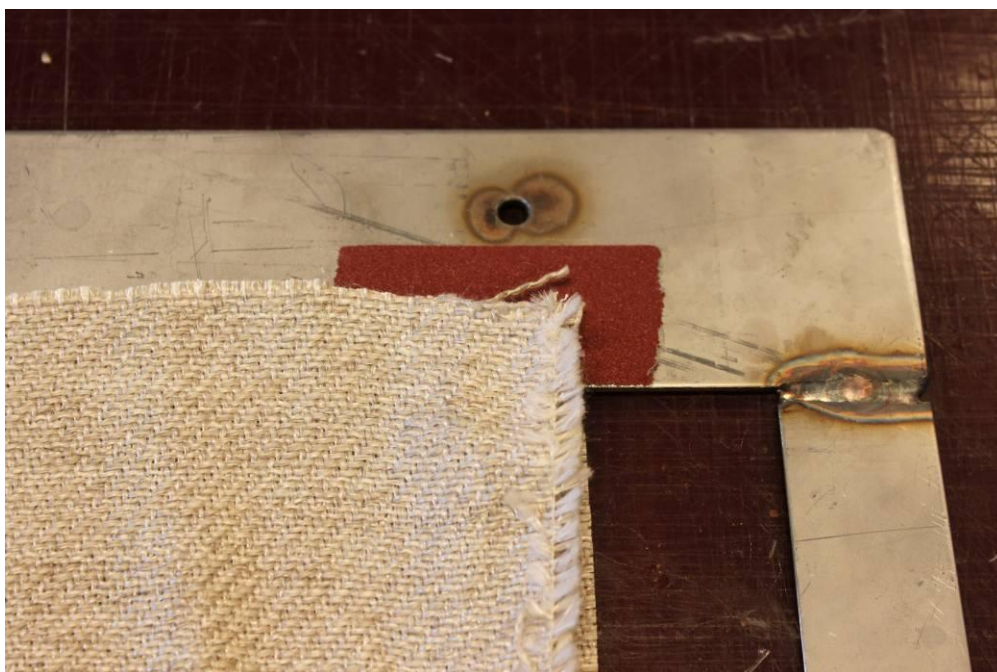
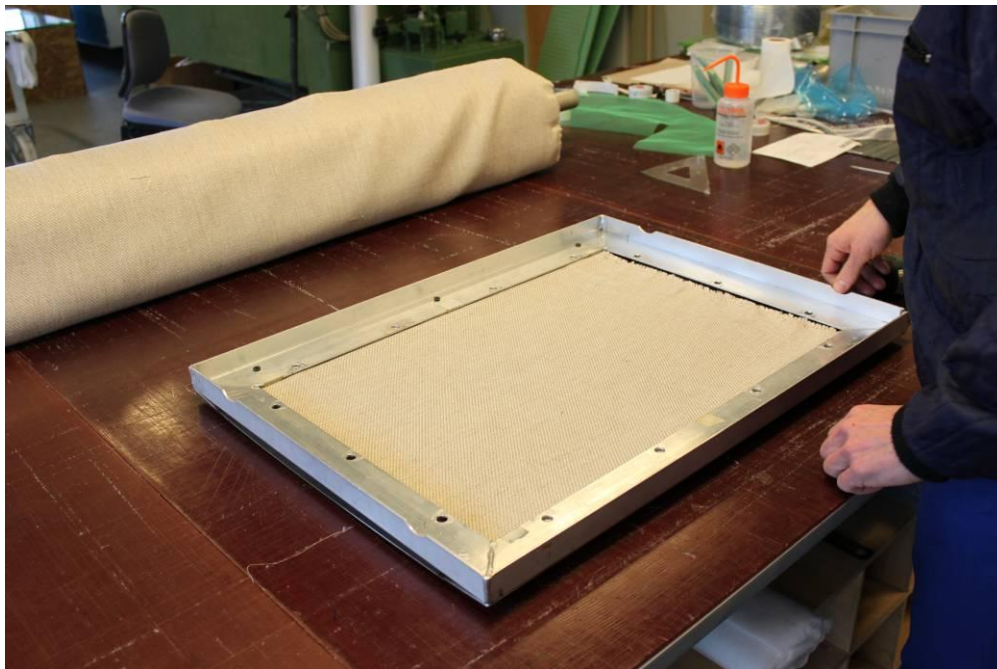
Figur 5.1.1: 3D-demoemne designet af industriel designer Martin Larsen.



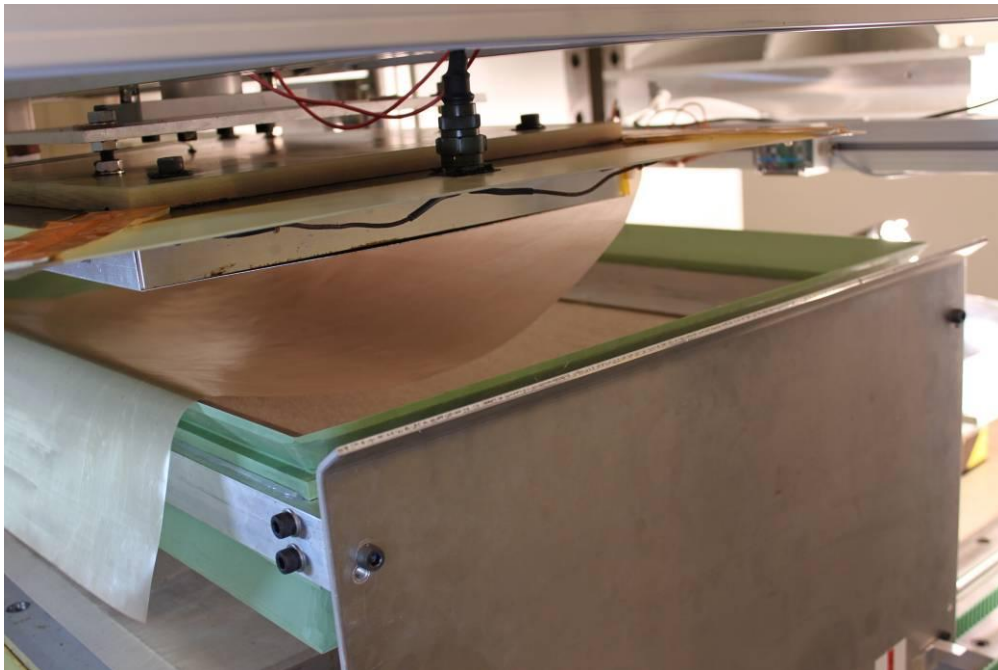
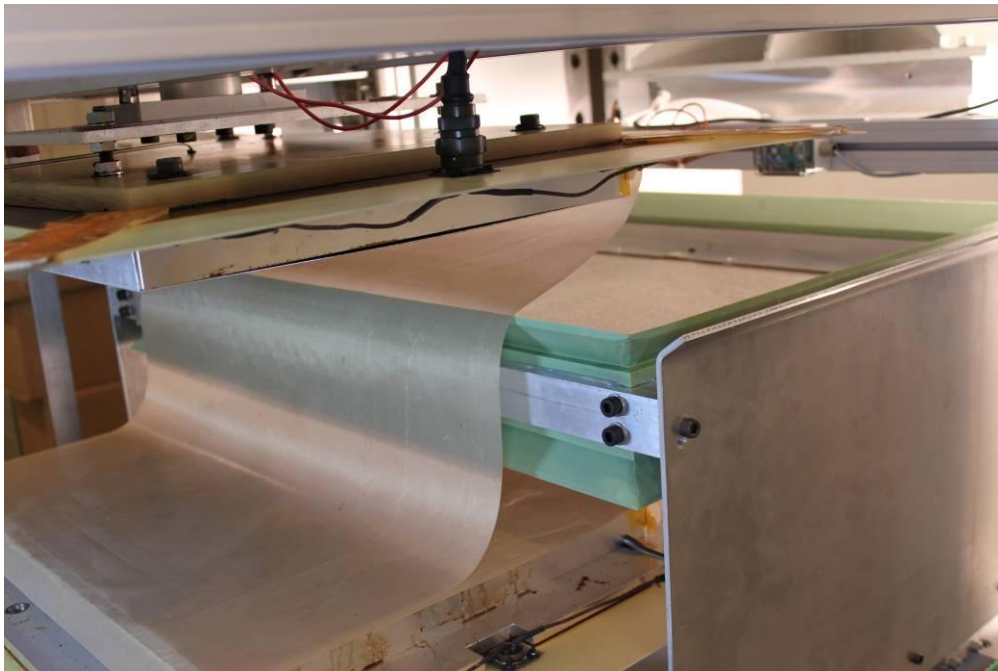
Figur 5.1.2: Formdele markeret med rød og blå. Emnet er designet symmetrisk og med en tilsigtet emnetykkelse på 5 mm.

Formdele til demoemne blev fremstillet af Michael Olsen La Vie A/S på baggrund af tegningsoplæg. Omkostningerne var 36.000,- dkr for begge formdele, der blev leveret højglanspoleret og med gevind for montering.

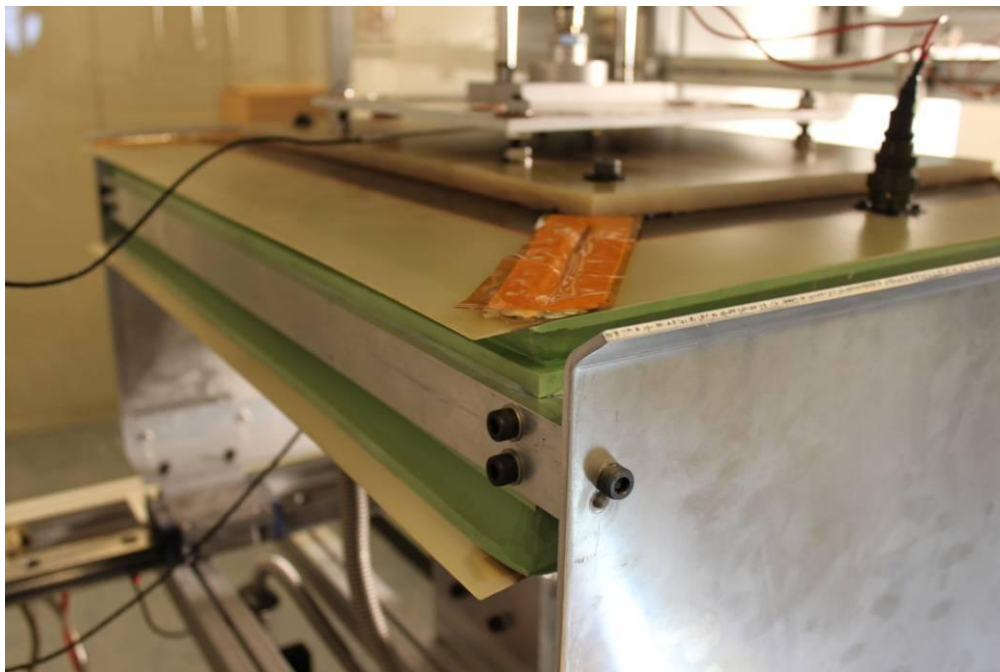
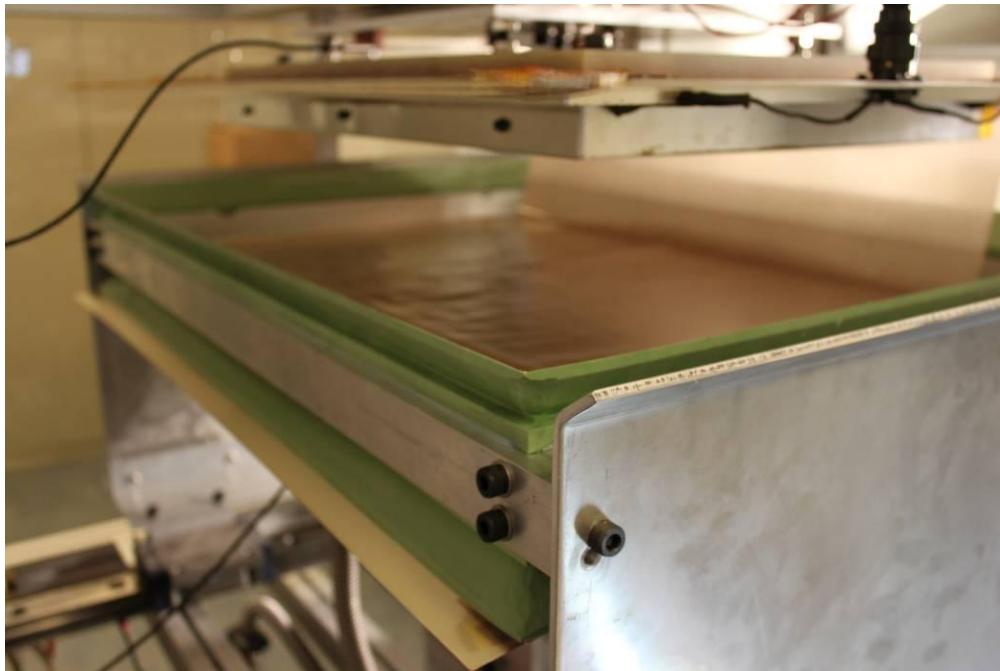
De vigtigste trin i pressekonsolideringen af et 3D emne er beskrevet ved hjælp af billederne i Figur 5.1.3 – 5.1.10 og den tilhørende udførlige billedtekst.



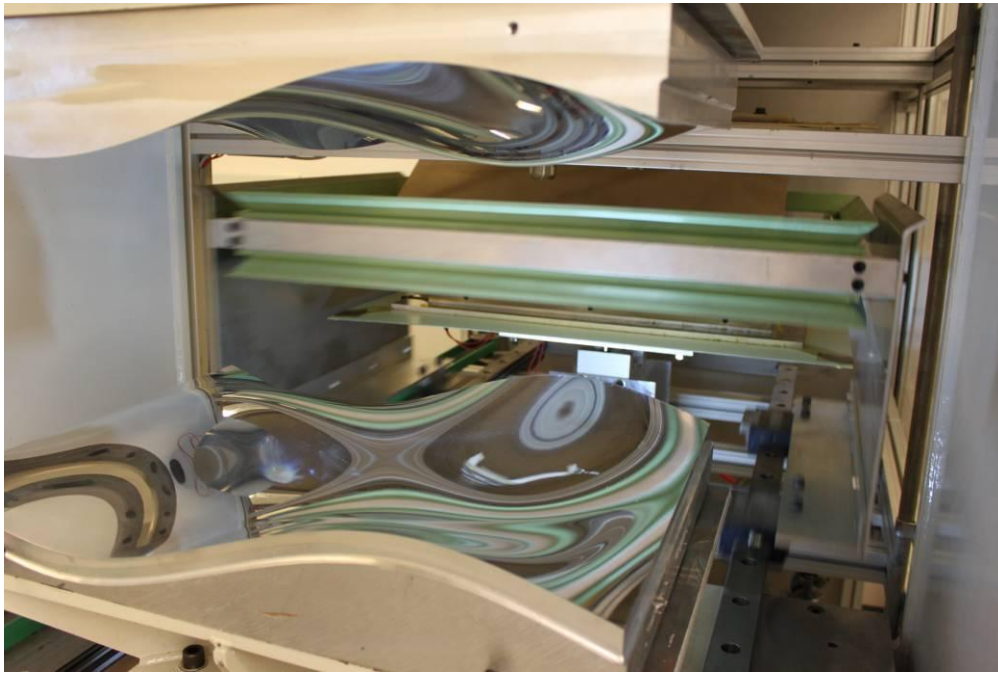
Figur 5.1.3: Øverst: Opspænding af etableret oplæg i ramme. Det er vigtigt at fastholde materialet så der ikke kommer folder i det konsoliderede emne, samtidig med at det skal være muligt at drapere og formgive emnet. Nederst: Klædet er fikseret punktvis over diagonalen mellem to rammer, der på den ene side er belagt med en ru overflade (rødt sandpapier).



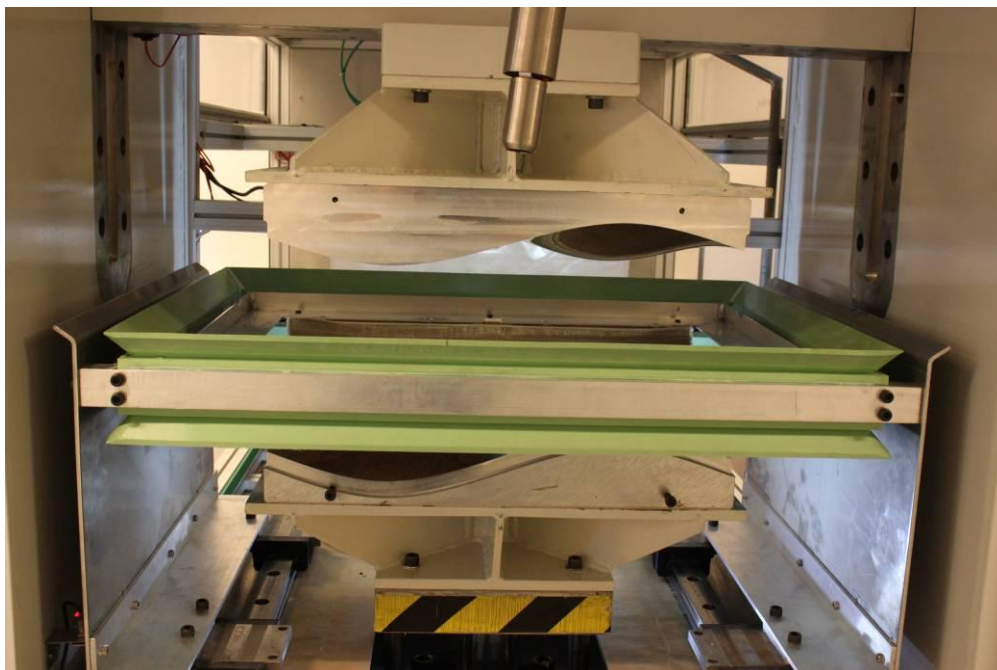
Figur 5.1.4: Øverst og nederst: Transportøren med opspændt oplæg på vej ind i varme/vakuum-zonen. Transportøren er udformet som en ramme, der automatisk og med høj hastighed bliver trukket horisontalt mellem oplæg, varme og presseenheden. På billederne kører transportøren fra højre mod venstre og den øverste slipfolie bliver automatisk trukket på plads. De fleksible vakuumpakninger (lysegrønne profiler), der er monteret på begge sider af transportørens ramme, gør det muligt at etablere et vakuum i hulrummet mellem varmeplanerne. Muligheden for kontaktopvarmning under vakuum er en unik facilitet for presseenheden. Vakuomet under opvarmningen bevirker dels at fugt og luft fjernes fra laminatet og dels at den termiske nedbrydning af plastmaterialet bliver reduceret.



Figur 5.1.5: Øverst og nederst: Materialet i varmeenheden. Når de to varmeplaner er lukket om transportøren med materialet, åbner en ventil, som starter evakueringen af hulrummet ved hjælp af en tilsluttet vakuumpumpe. Silikonepakningen er udformet så den er fleksibel og kan følge materialets vandring under opvarmningen. Det betyder at oplæget hele tiden er under tryk mens det varmes op og dette er af vital betydning. Indre spændinger i termoplastmaterialet vil relaxeres (trække sig sammen) under opvarmningen, og hvis oplæget ikke er fastholdt (under tryk) vil det medføre at klæde og fiber oplægning bliver uhomogen med folder i store eller mindre dele af oplæget. En forudindstillet timer med den ønskede tid for opvarmningen afslutter opvarmningen og hulrummet ventileres.



Figur 5.1.6: Øverst: Processen ses fra fronten. Opvarmningen af materialet er afsluttet og hulrummet mellem varmeplanerne ventileret. På billede er varmeplanerne flyttet tilbage og transportøren ved automatisk at flytte materialet til presseenheden. Nederst: Transportøren på vej ind mellem formparterne. Slipfolien er hængslet i forkanten på varmelegemet og bliver samtidig trukket af overfladen på begge sider af det opvarmede klæbrige materiale. Afstanden mellem varmelegemer og presseenhed er afstemt, så slipfolierne er trukket helt af når transportøren er på plads mellem formparterne.



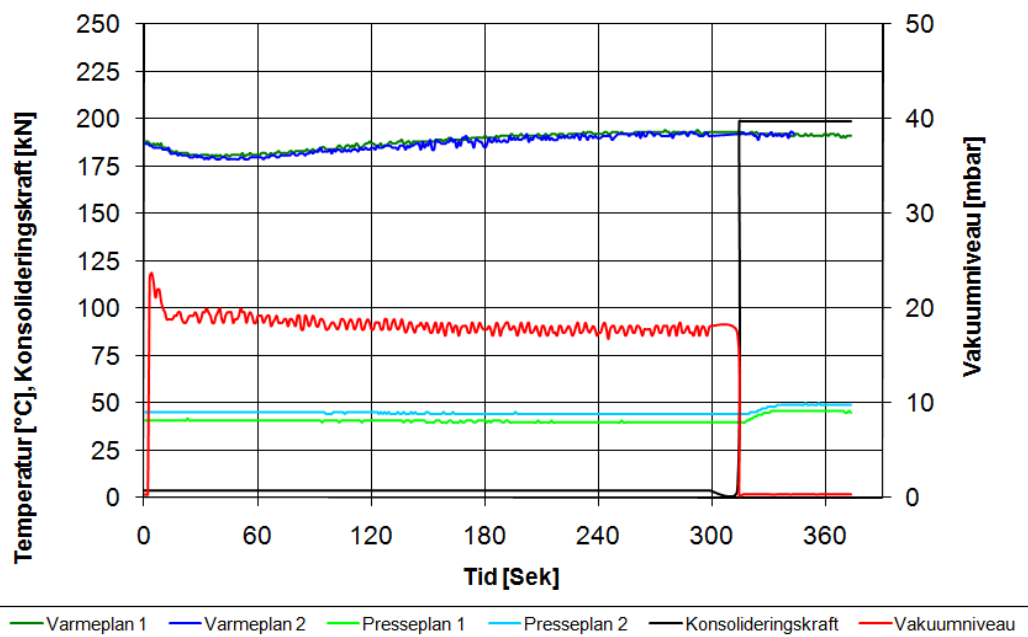
Figur 5.1.7: En induktiv føler er indbygget som sikkerhedsanordning på transportørens position. Føleren lyser rød når den er aktiveret og kan ses i nederste venstre hjørne på billede. Den øverste formpart er monteret på en stationær tvær bom. Den nederste formpart sidder på pressestempet, der løfter rammen med materialet ud af transportøren.



Figur 5.1.8: Pressestempet med den nederste formpart er ved at løfte materialet og rammen ud af transportøren. Når formdelene lukker sammen formgives kompositmaterialet. Trykket og afkølingen af materialet bevirker at kompositmaterialet konsolideres.



Figur 5.1.9: Pressekonsolideret emne af bio/bio-kompositmateriale i presseenheden. Emne og ramme kan let fjernes fra transportøren og en ny proces påbegyndes. Kanten på emnet kan efterfølgende trimmes ved mekanisk bearbejdning.



Figur 5.1.10: Logfil fra typisk pressekonsolidering af et emne. Temperaturen i varmeenheden er plottet som Varmerplan 1 og Varmerplan 2, temperaturen på presseenheden tilsvarende som presseplan 1 og preseplan 2. Vakuumniveauet er kun relevant i varmeperioden på 300 sek og tilsvarende er konsolideringskraften på presseplanet kun relevant under konsolideringen og afkølingen af materialet.

Figur 5.1.10 viser en logfil fra en pressekonsolidering, hvor der er anvendt en varmetid på 5 minutter (300 sek) ved en temperatur på 190 °C efterfulgt af 60 sekunder konsolidering ved 40 °C. Temperaturen på varmeplanerne (varmeplan 1 og varmeplan 2) falder, når det kolde materiale kommer ind i varmenheden, for efterfølgende at stige til det oprindelige niveau. Den røde graf viser vakuumniveauet i opvarmningsenheden, og kan af tekniske årsager, først måles nøjagtigt, når det er under 28 mbar. Det tager kun ca. 5 sek. at nå ned på dette vakuumniveau. En lille øgning af vakuumniveauet kan typisk ses som følge af afdampning af fugt fra materialet. I det aktuelle tilfælde sker det i løbet af de første 90 sekunder. Tiden fra varmeperioden på 300 sek er afsluttet og til materialet er under fuldt tryk i presseenheden (konsolideringskraft = 200 kN) tager kun 14 sekunder. I løbet af de 14 sekunder er varmenheden ventileret, varmeplanerne trykket tilbage, vognen med materialet flyttet til presseenheden og formdelene lukket sammen. Den hurtige sekvens skal sikre, at materialet afkøles mindst muligt før det er presset i facon mellem formdelene. Der er ikke anvendt aktiv køling på formdelene (Presseplan 1 og Presseplan 2) og det afspejler også at temperaturen på henholdsvis 40 °C og 45 °C stiger med ca. 5 °C under de 60 sekunder konsolidering. Umiddelbart herefter returnerer pressestemplet og emnet kan afformes.

I en industriel proces vil pressekonceptet med fordel kunne modificeres således at flere varmenheder føder den samme presseenhed. Cyklustiden vil kunne reduceres til den tid som pressen bruger på at konsolidere et emne. Med udgangspunkt i procesdata fra Figur 5.1.10 vil tre varmenheder og aktiv køling gøre det muligt at fremstille emner med en cyklustid på 100 sek.

5.1.1 Pressekonsolidering af tykke laminaer

Kompositplader bestående af 9 stk PLA 4032D og 8 stk jute-referencevæv blev fremstillet. Den nominelle tykkelse blev beregnet til 5.25 mm, hvilket svarer til en fiberandel på 41 vægt-%. Opvarmning af materialet blev foretaget ved 190 °C i 5 min og 10 min under vakuum. Umiddelbart herefter blev kompositmaterialet konsolideret ved 30 °C i 1 minut. Tykkelsen af de fremstillede laminaer er målt til henholdsvis 5.52 mm og 5.56 mm, hvilket svarer til 35 vol-% fiberindhold og 5 – 6 vol-% porøsitet.

Komposit	Test retning	Varme tid [min]	Laminat tykkelse [mm]	Træk styrke [MPa]	Stivhed E-modul [GPa]
Jute/PLA 4032D	Skud	5	2.34	78 ± 2	8.2 ± 0.3
	Skud	5	5.56	77 ± 3	7.7 ± 0.2
	Skud	10	5.52	77 ± 5	8.1 ± 0.5

Tabel 5.1.1: Trækstyrke, E-modul og brudforlængelse i skud retningen for Jute/PLA 4032D med varierende varmetid og laminat tykkelse.

Resultaterne i tabel 5.1.1 viser at en varmetid på 5 minutter for et 5 mm tykt laminat ligger i underkanten med hensyn til at opnå den fulde stivhed for kompositmaterialet. Standardafvigelserne er dog så store at resultaterne ikke er signifikant forskellige. Ved at øge varmetiden, for det 5mm tykke emne, fra 5 minutter til 10 minutter, er der målt styrke og stivhed, der svarer til egenskaberne for det 2 mm tykke laminat.

5.2 Formmateriale til bio-hærdeplast

Til fremstilling af demoemner med bio-baseret hærdeplast er der anvendt en række forskellige formmaterialer. Det er kendetegnet for alle demoemnerne, at det kun var nødvendigt at have en enkelt formpart og en vakuumpose blev benyttet som modpart. Det måske billigste af de anvendte formmaterialer var gips, der blev brugt til afstøbning af et kundespecifikt underben. Gipsafstøbningen blev efterfølgende benyttet til fremstilling af en dropfodsskinne, se Figur 5.2.1.



Figur 5.2.1: Underben støbt i gips til fremstilling af en kundespecifik dropfodsskinne.

Gipsafstøbningen blev forseglet med et tyndt lag plast før selve oplægningen af fibermaterialet og infusionen af hærdeplasten. Til hver dropfodsskinne blev der anvendt ny gipsform, da formen går til under afformningen og derfor kun kunne bruges til en enkelt afstøbning.

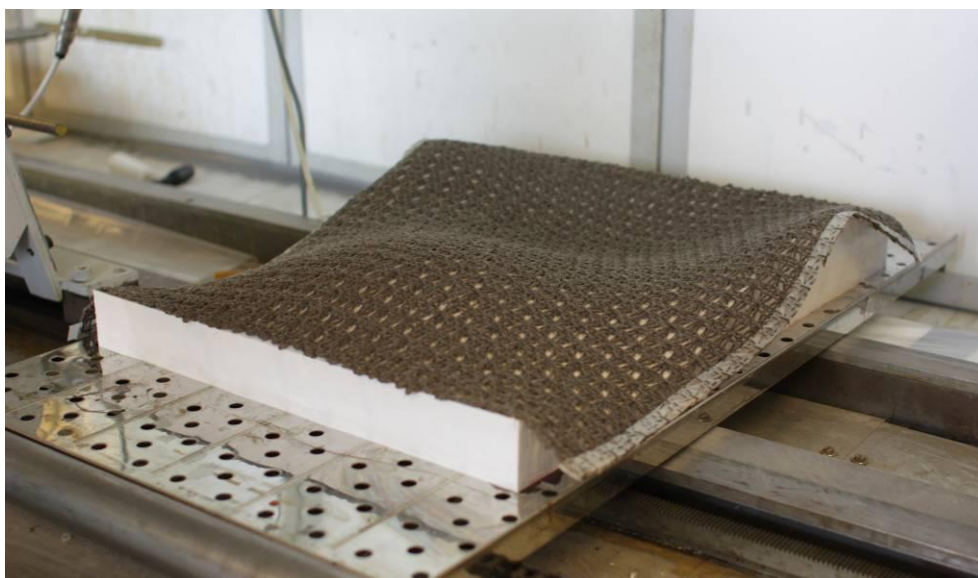
En anden kompliceret form blev fremstillet af designstuderende Christian Dyrman Hansen fra Danmarks Designskole. Billige MDF plader blev limet sammen og efterfølgende bearbejdet til den ønskede geometri. Da fræsere ikke kunne håndtere hele emnet, blev formen opdelt i sekvenser, der blev bearbejdet individuelt og efterfølgende limet sammen. Der blev benyttet flere lag lak og en masse slibearbejde for at lukke den porøse/åbne overflade på formen. Efter påføring af først fire lag Zyvac Sealer og efterfølgende tre lag Zyvac Multi Shield slipmiddel blev en lille støbeprøve lavet i formen med succes. MDF formen og to af de støbte støleskaller kan ses på Figur 5.2.2.



Figur 5.2.2: Nederst til højre ses form til stoleskal fremstillet af MDF, der er limet sammen, bearbejdet og lakeret med flere lag lak for at blive tæt. To skaller fremstillet i formen kan ses på bordet ved siden af.

Silikonegummi har i mange år været anvendt til fremstilling af støbeforme. Fordelen ved silikonegummi er dels at det er meget elastisk/fleksibel og dels det indbyggede slip, som gør det muligt at fremstille kompliceret støbeforme, med gengivelse af meget fine detaljer.

I projektet blev der fremstillet flere forme af silikonegummi. Indledningsvis blev en afstøbning af det fremstillede 3D demoemne foretaget med henblik på at afprøve silikonegummi som modpart under fremstilling. Silikonformen blev også benyttet til støbt af et emne med meget åben struktur og dette er vist i Figur 5.2.3.



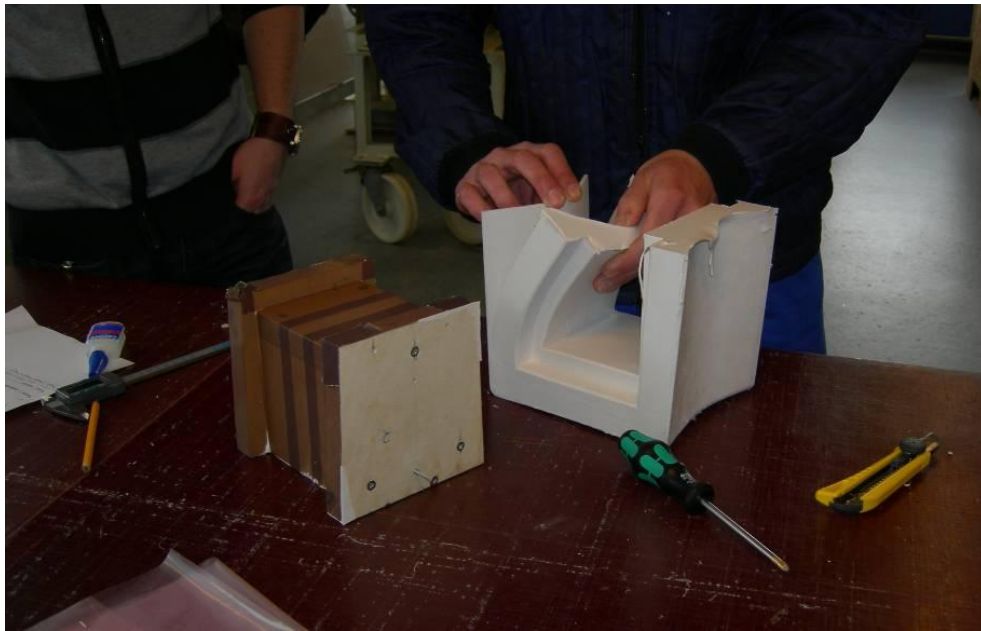
Figur 5.2.3: Silikonegummi form og fremstilling af emne med meget åben struktur. Emnet blev fremstillet til udstillingen på Trapholdt.

De nedskalerede SLA modeller blev både benyttet til visuel vurdering af selve emnegeometrien og til praktiske forsøg ved udvikling af en ny proces teknologi. På baggrund af SLA modellen blev en silikonegummiform støbt, Figur 5.2.6.



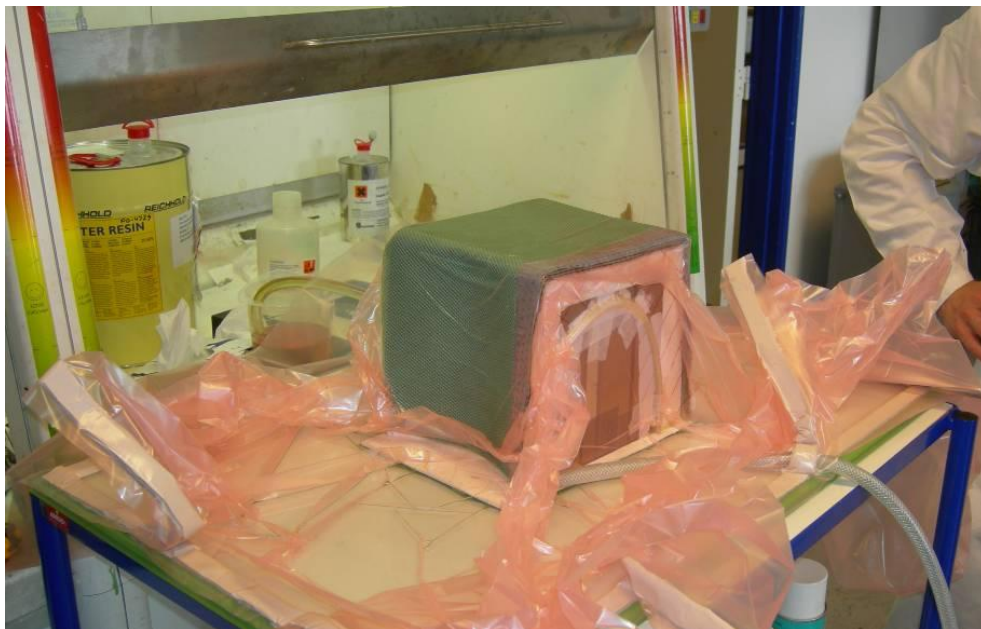
Figur 5.2.6: Støbning af silikonegummi i form fremstillet ved hjælp af krydsfiner og en SLA model af en skammel. Formen er skråstillet for at undgå luftindeslutninger når silikonegummimassen hældes i formen.

Silikonegummiformen blev understøttet af en kerne fremstillet af krydsfiner. Kernen var udformet med slipvinkler og teflon-tape så den let kunne fjernes, hvorefter det var muligt at afforme selve silikoneemnet fra SLA modellen, Figur 5.2.7.



Figur 5.2.7: Kernen af krydsfiner blev først fjernet og efterfølgende kunne silikonegummi formen let afformes fra SLA modellen.

Silikonegummiemnet og kernen blev efterfølgende brugt til en proces-simulering af skamlen ved vakuum infusion med naturfiber, Figur 5.2.8. Proces simuleringen afslørede problemer med folder på den udvendige side af de fremstillede emner og på baggrund af dette blev det besluttet at ændre fremstillingskonceptet til det, der er beskrevet i afsnit 6.5.



Figur 5.2.8: Vakuum infusion på silikonegummiform. På venstre side af emnet kan folder i oplæg og indpakkingsmaterialer ses og det var disse folder i det fremstillede emne, som medførte at fremstillingskonceptet blev ændret.

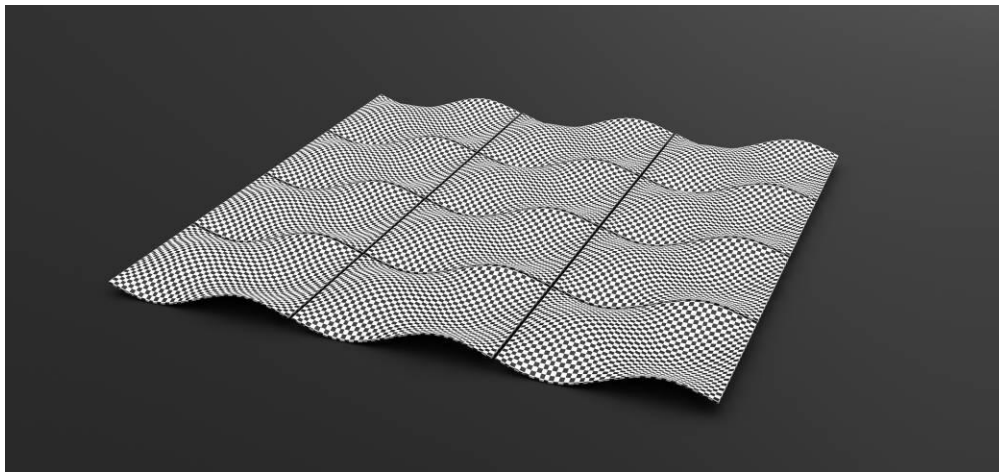
6 Videnoverførelse

En vigtig del af projektarbejdet bestod i at synliggøre resultaterne og sikre videnoverførelse til virksomheder og enkeltpersoner, som var interesserede i information om mulighederne for anvendelse af bio/bio-kompositter. Der var meget stor interesse fra ingeniører, designere og arkitekter, der gerne ville anvende nye og bæredygtige materialer i deres komponenter. En række demoprojekter blev realiseret på baggrund af henvendelserne, med henblik på at konkretisere den etablerede viden og synliggøre potentialet for bio/bio-kompositmateriale. Demoprojekterne har omfattet et 3D-demoemne, en dropfodsskinne, vindmøllevinger til en racerbil, skallen til en stol samt en skammel med en unik overflade struktur.

6.1 3D-demoemne

Industriel designer Martin Larsen og tekstildesigner Karina Nielsen Rios var begge ca. halvvejs i et 3 års stipendiat fra Statens Kunstfond. De ønskede begge at indgå i et samarbejde med fokus på anvendelse af naturfibre i relation til et møbeldesign. Demoprojektet blev konkretiseret ved tilmelding til den censurerede udstilling på Trapholdt: Biennalen for Kunsthåndværk og Design 2009, der havde bæredygtighed som tema.

Et generisk 3D-emne blev udformet, så det er muligt at placere flere emner samtidig ved siden af hinanden, som "byggeklodser", og derved generere et bølget landskab, som illustreret i Figur 6.1.1.



Figur 6.1.1: Konceptet for 3D-demoemnet er et landskab med dobbeltkrumme flader der er skabt ved at lægge flere emner ved siden af hinanden.

Til fremstilling af demoemnerne blev der både anvendt klæder fremstillet af tekstildesigner Karina Nielsen Rios og kommercielle standard halvfabrikater. Til de håndfremstillede klæder blev der anvendt hørgarn fra Burkhard-Dreier AG. Eksempler på nogle af de fremstillede væv er vist i Figur 6.1.2.



Figur 6.1.2: Øverst og midt: Eksempler på Karina Nielsen Rios håndfremstillede væv af hørgarn. Nederst: Oven på vævet ligger en støbeprøve, der illustrer farveændringen når fibermaterialet bliver vædet med hærdeplast resinen.

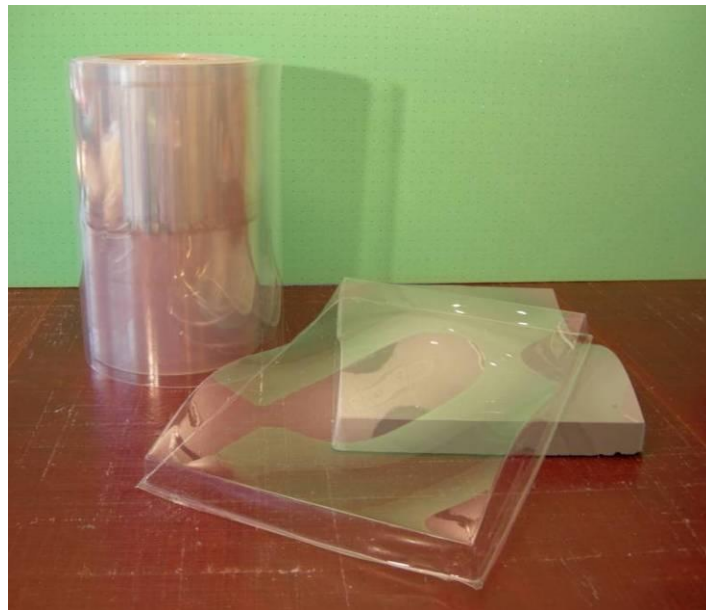


Figur 6.1.3: Øverst og nederst: Uønskede folder i overfladen af det konsoliderede emne. Folderne fremkommer når plasten smelter og materiales kompakteres under processen.

Til fremstilling af de første emner blev der anvendt en enkel side form, hvor der oven på oplæget blev placeret en indpakningsfolie, der konsoliderede emnet mod formparten. Alle oplæg var baseret på "film stacking" og på grund af den dobbeltkrumme form geometri var det umuligt at få den relative stive plastfolie til at følge emnegeometrien. Det medførte at der i de konsoliderede emner kom uønskede folder i overfladen, se Figur 6.1.3. Forsøg på at undgå folderne ved hjælp af strækbare indpakningsfolier virkede ikke. I stedet blev der med delvis succes fremstillet emner, hvor plastmaterialet blev slidet og tilpasset emnegeometrien, som illustreret i Figur 6.1.4.

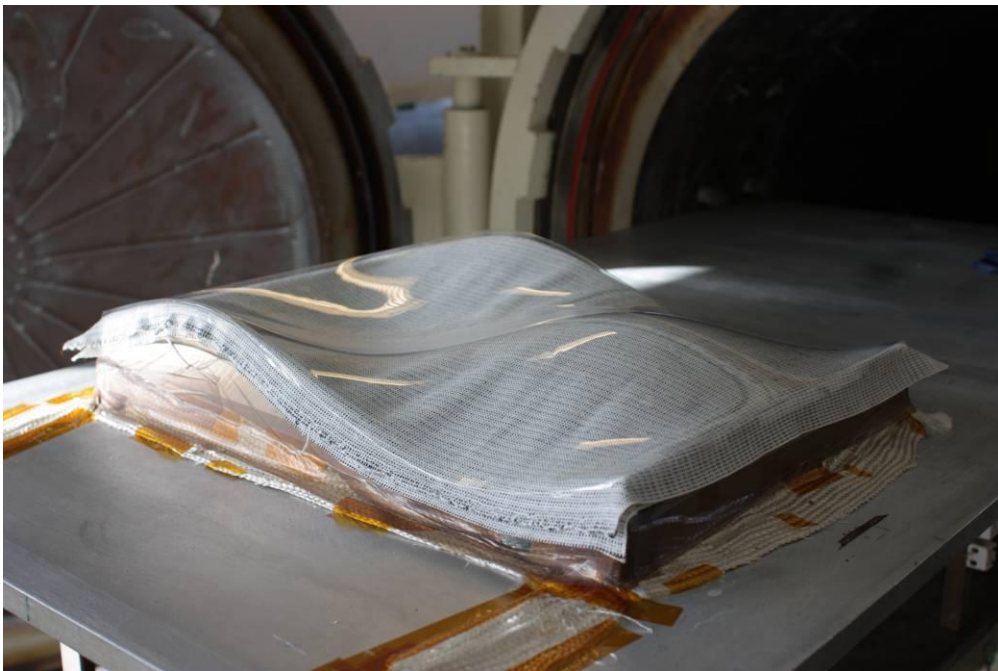


Figur 6.1.4: Slidser i plastfolien gjorde det muligt at få den til at følge emnegeometrien. Materialekvaliteten var kun delvis tilfredsstillende, da det var meget vanskelig at styre slidserne og der forekom en uhomogen fordeling af plastmaterialet i de konsoliderede emner.



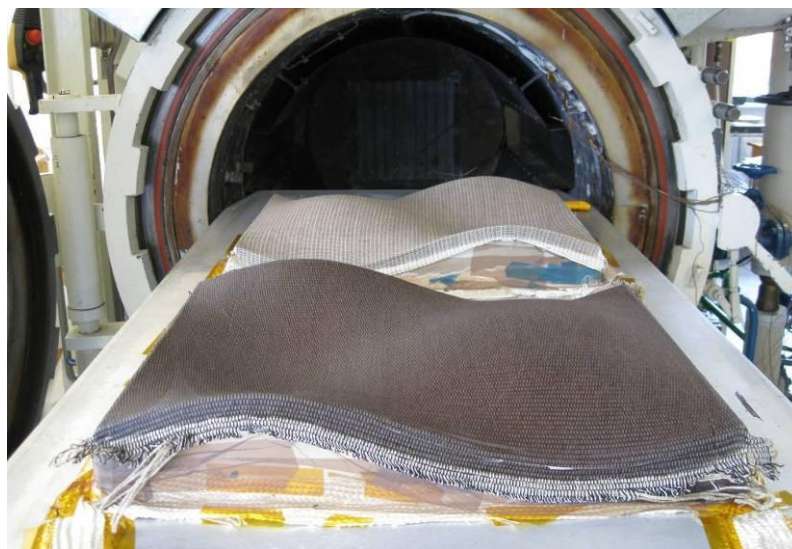
Figur 6.1.5: Rulle med transparent PLA folie, vakuumformet plastfolie med emne geometrien og epoxy afstøbningen. Vakuumformningen blev foretaget over en afstøbning af RENCAST (epoxy med aluminium filer) hos FORMATEK a/s i Roskilde.

Folderne i de dobbeltkrumme emner blev undgået ved at anvende plastfolier, der var for formet ved vakuumformning. til den ønskede emne geometri, se Figur 6.1.5. Eksempler på anvendelse af for formede plastfolier er vist i Figur 6.1.6

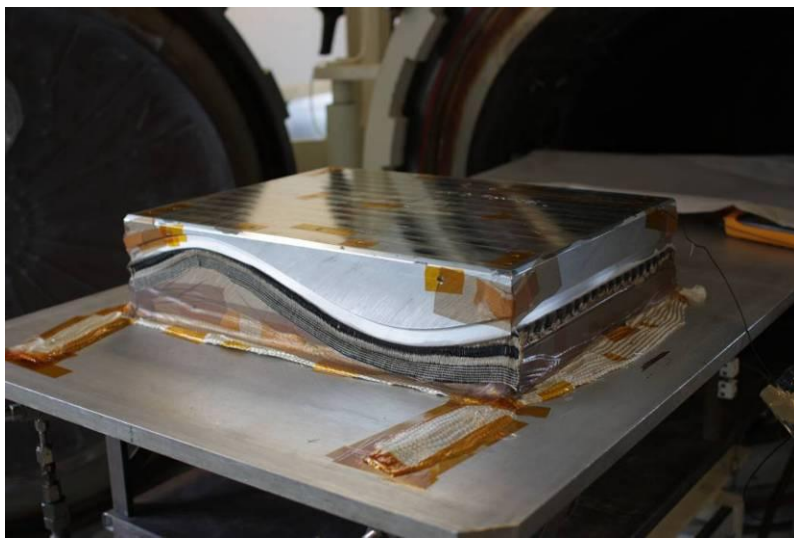
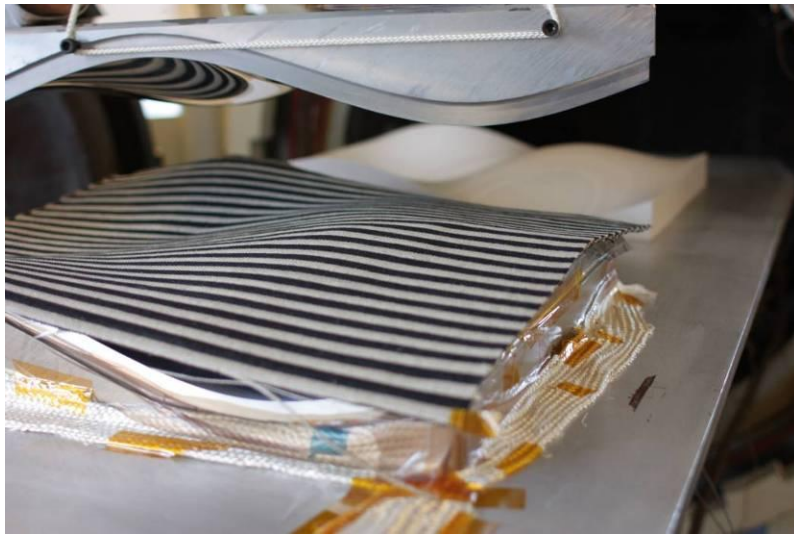


Figur 6.1.6: Øverst og nederst: Oplæg med for formede plastfolier gjort det væsentlig lettere at vakuumpakke de enkelte oplæg og samtidig blev det muligt at konsolidere emner uden folder i overfladen.

Folierne gjorde det væsentlig lettere at etablere et oplæg, der kunne vakuumpakkes med minimale folder i indpakningsfolien. Ved at placere en peel-ply slipfolie mellem oplæg og indpakningsfolie, blev det muligt helt at undgå folder i de konsoliderede emner, se billedserien i Figur 6.1.7. Peel-ply slipfolien medfører også at overfladen på emnet bliver mat, hvilket visuelt kan være ønskeligt, da strukturen i vævet bliver mere tydelig. De fremstillede formparter var begge poleret og blanke i overfladen, hvorfor kompositemnerne på denne side og blev blanke.



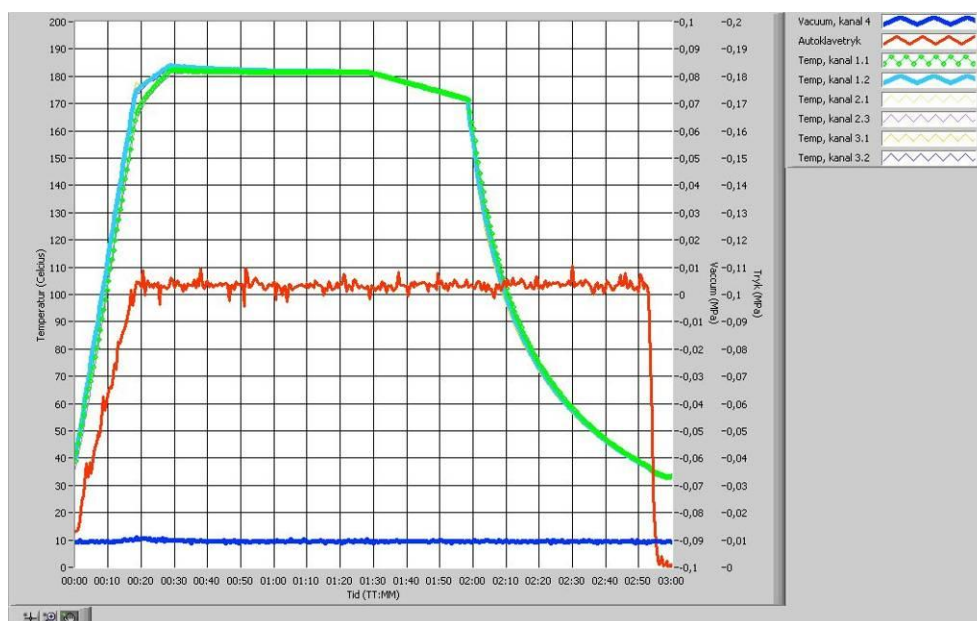
Figur 6.1.7: Øverst: Oplæg af to emner. Midt: Vakuumpakning af emner med minimale folder i indpakningsfolien og nederst: Konsoliderede emner uden folder i overfladen.



Figur 6.1.8: Øverst og midt: Efter oplæg af materiale bliver den øverste form forsigtigt løftet på plads ved hjælp af en kran. Nederst: Vakuumpakning af formdelene med transparent vakuumfolie (Airtech, Wrightlon 5400) og hvid tætningsmasse (Airtech, GS 43 MR).

Kompositemner, der er blanke på begge sider, blev også fremstillet. Til dette blev der anvendt dobbelte forme. Oplæg blev etableret med væv og pre-formede plastfolier på den nederste formpart, hvorefter den øverste formpart forsigtigt blev løftet på plads. Skarpe kanter på formværktøjet blev afdækket med glasvæv og en porøs slipfolie, der dækkede begge formdele, blev placeret over formparterne før disse blev vakuumpakket. De beskrevne procestrin er illustreret i billedserien i Figur 6.1.8.

Autoklavekonsolidering af emnet blev foretaget ved 180 °C over en samlet proces tid på 3 timer. Et typisk plot af en procesafvikling er illustreret i Figur 6.1.9. De målte temperaturer i plottet er alle fra overfladen på formparten og oplæg, da en termoføler i selve emnet ikke kunne accepteres, eftersom emnet skulle anvendes til udstillingsbrug. For at sikre at det koldeste sted i materialet havde opnået den ønskede procestemperatur på minimum 170 °C, blev der anvendt 10 °C "overtemperatur", dvs. en autoklavetemperatur på 180 °C. Opvarmningen til 180 °C blev foretaget over 30 min og denne temperatur blev holdt i 60 min, hvorefter temperaturen i autoklaven blev sænket til 170 °C over 30 min. Under hele procesafviklingen var materialet under vakuum (blå kurve i Figur 6.1.9). En meget svag ændring i vakuumniveauet kan ses efter ca. 20 min og det er et udtryk for at vandet, der var bundet i materialet, fordamper under opvarmningen og fjernes med vakuum tilslutningerne. Vakuumniveauet var ca. -0.09 MPa under hele procesafviklingen. For at sikre en god konsolidering af emnet blev autoklaven desuden sat under 0.10 MPa overtryk, hvilket kan ses som den røde kurve på plottet i Figur 6.1.9.

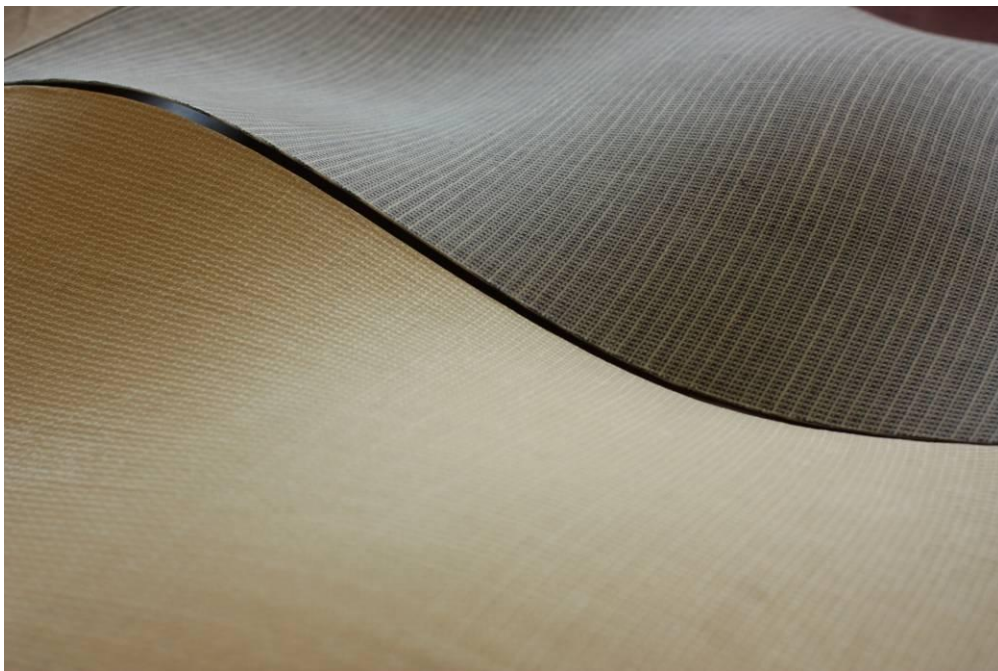


Figur 6.1.9: Autoklavekonsolidering af demoemner. Blå kurve = vakuum, rød Kurve = tryk og øvrige er temperaturmålinger på formpart.

Efter autoklavekonsolidering blev emnerne afformet, se Figur 6.1.10, og efterfølgende bearbejdet på siderne for at fremstå præsentable, Se Figur 6.1.11. Til bearbejdningen blev der benyttet en hårdmetal fræser styret af en CNC maskine, der kunne følge emnets kant i alle tre akser.



Figur 6.1.10: Afformning af autoklavekonsolideret emne. Den øverste formparat blev håndteret med en kran og skånsomt placeret i den hvide silikone part bagerst på autoklaveordet for at undgå ridser i den polerede overflade.



Figur 6.1.11: Emner med CNC bearbejdede kanter fremstår præsentable.

Til udstillingen på Trapholdt: Biennalen for Kunsthåndværk og Design 2009, blev der fremstillet emner ud fra forskellige væv og plast materialer. Ved anvendelse af de specielt designede og fremstillede væv var det muligt, at lave en bred vifte af emner med meget forskellig udseende. Afsnit 6.1 har

udelukkende omfattet emner med termoplastik matrix materiale, desuden blev en del af 3D-demoemnerne fremstillet på basis af de termohærdende plastmaterialer og vakuum infusion. Vakuum infusion med hærdeplast blev også benyttet til fremstilling af de øvrige demokomponenter og dette er beskrevet efterfølgende i afsnit 6.2 – 6.5.

I samråd med designerne, Martin Larsen og Karina Nielsen Rios, blev de fremstillede 3D-demoemner vurderet og de bedst egnede udvalgt og sendt til udstillingen. Udvælgelsen af demoemner på Risø DTU er illustreret i Figur 6.1.12.

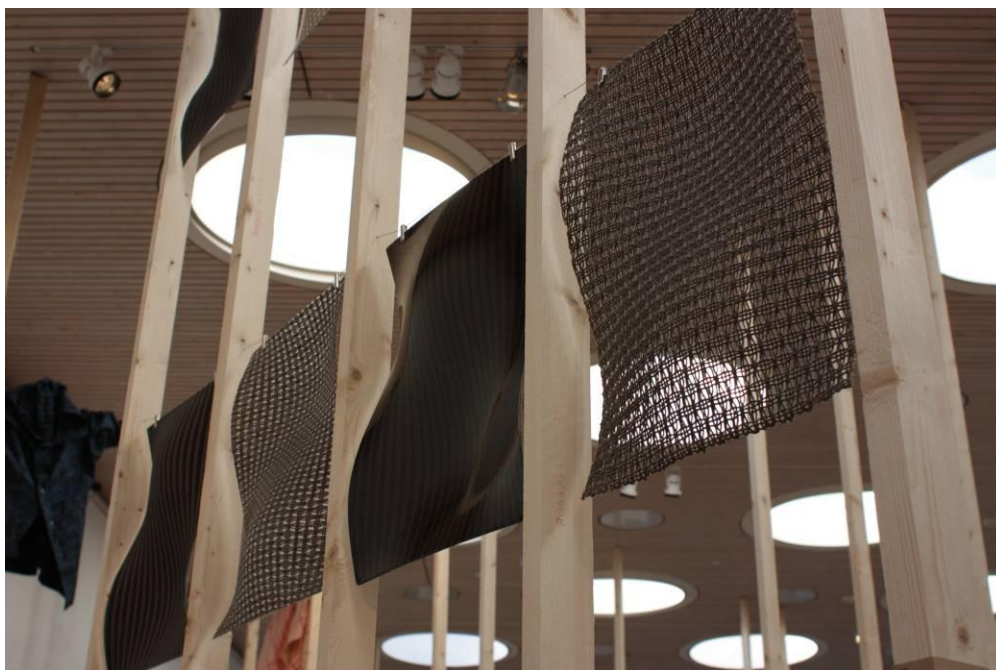


Figur 6.1.12: Industriel designer Martin Larsen i gang med at fotografere emner i forbindelse med udvælgelsen af de bedst egnede bio/bio-komposit 3D-demoemner. Som det fremgår, blev der fremstillet emner med meget forskellig udtryk i den samme emnegeometri.

Billeder af emnerne som de fremstod på Trapholdt, Binnalen for Kunsthåndværk og Design 2009 er vist i Figur 6.1.13 og Figur 6.1.14.



Figur 6.1.13: 3D-demoemner på Binnalen for Kunsthåndværk og Design 2009, Trapholdt, der havde bæredygtighed som tema. Bio/bio-kompositemnerne opnåede den hæder, at blive tildelt en pris fra Statens Kunstfond.



Figur 6.1.14: Nærbilleder af de udstillede 3D-demoemner af bio/bio-komposit fra udstillingen på Trapholt. Udstillingsarkitekt Jeanne Betak Cleemann i samarbejde med Line Hangaard Nielsen

Efterfølgende blev der til fremvisning af emnerne fremstillet to standere og disse var blandt andet i anvendelse ved udstilling af emner i forbindelse med COP 15 på Bright Green Expo, se evt Figur 1.1.3.

6.2 Dropfodsskinne

Den aktuelle dropfodsskinne Flexbrace® er udviklet til at styre og løfte foden i ankelleddet på en biomekanisk korrekt måde af Roskilde virksomheden Ortopæd Ingeniørerne. Dropfodsskinnen er udviklet over en længere periode og bliver lavet efter en individuel gipsafstøbning for at optimere funktion og komfort, se evt. også Figur 5.2.1.

Det var ønskeligt at prøve at øge levetiden på den udviklede skinne, ved at fremstille den med en resin, som havde en større brudforlængelse, da de konventionelle emner, i nogle tilfælde, knækkede i brug, formodentlig som følge af lokal overbelastning og en relativ sprød matrix. Det blev derfor besluttet at fremstille dropfodsskinnen med den bio-baseret EPOBIOX resin. EPOBIOX resin er interessant, fordi den, ifølge databladet, har en brudforlængelse på 12 – 15 %.

Dropfodsskinner blev fremstillet ved vakuum infusion med de samme forstærkningsmaterialer, som anvendes til de konventionelle emner. Fremstillingen er illustreret i billedserien i Figur 6.2.1 – 6.2.3.



Figur 6.2.1: Dropfodsskinne oplagt på kundespecifik gipsafstøbning ved brug af konventionelle forstærkningsmaterialer. Øverst til venstre ses "inlet" slangen, der forgrener sig over både sål og vrist. Umiddelbart oven på oplæget blev der placeret en peel-ply slipfolie og for at lette afformningen blev der mellem peel-ply og det grønne fordelernet placeret en tynd hul-slipfolie. Hulfolien medfører at fordelernet nemmere kan fjernes når plasten er hærdet. Da EPOBIOX resinen er relativt høj viskøs er stort set hele emnet dækket med det grønne fordelernet. "Outlet" slangen kan ikke ses på billede, men den var placeret umiddelbart i underkanten af billede og kan ses på Figur 6.2.2.



Figur 6.2.2: Vakuump infusion af dropfodsskinnen. Vædningen af fibrene kan ses som de mørkere områder på emnet. Flowfronten blev med succes etableret med en forgrenet "inlet" slange og en "outlet" slange placeret i hele omkredsen for enden af gipsafstøbningen.



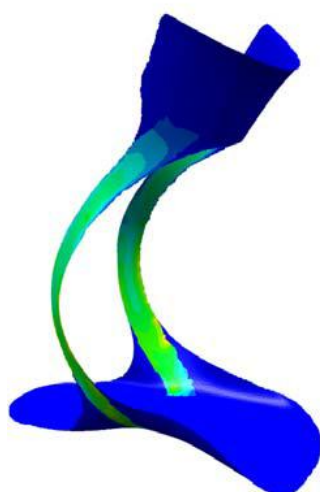
Figur 6.2.3: Hjælpematerialerne er fjernet fra dropfodsskinnen, der blev fremstillet uden ydre dekorativt lag således at kulfiber indlæg tydeligt kan ses.

Det konsoliderede emne blev bearbejdet af Ortopæd Ingeniørerne til den endelige geometri, som kan ses på Figur 6.2.4, hvorefter rem til fastspænding på benet blev nittet på emnet.



Figur 6.2.4: Til venstre emne baseret på EPOBIOX og til højre et tilsvarende konventionelt emne før montering af spændrem og foring med sål.

Under test af den fremstillede dropfodsskinne blev det konstateret, at der opstod uønsket revner og brud. Dette var sammenfalden med muligheden for at forsætte projektarbejdet ved en Finite Element modellering af emnet med henblik på undersøgelse af lastniveauerne. Dette afstedkom et samarbejde med Lars Falkenman, Ortopæd Ingeniørerne, hvor DTU studerende Ragnhild Í Skorini lavede et Master speciale. Med udgangspunkt



i dropfodsskinnens funktion og geometriske udformning blev der foretaget en parameterundersøgelse. Undersøgelsen omfattede en vurdering af anvendte materialer samt geometri i forhold til de mekaniske belastninger skinnen bliver udsat for af patienten. Specialet blev udført med Lars Pilhgård Mikkelsen, Risø DTU, som hovedvejleder og det kunne konkluderes at Finite Element modelleringen er et stærkt værktøj i materialeudvælgelse processen. På baggrund af simuleringerne og beregningerne er det muligt at begrænse omfanget af praktiske forsøg og forbedre materialevalget. Resultater er yderligere beskrevet i artiklen "Biomechanical study of a drop foot brace".

Figur 6.2.5: Finite Element modellering af dropfodsskinne

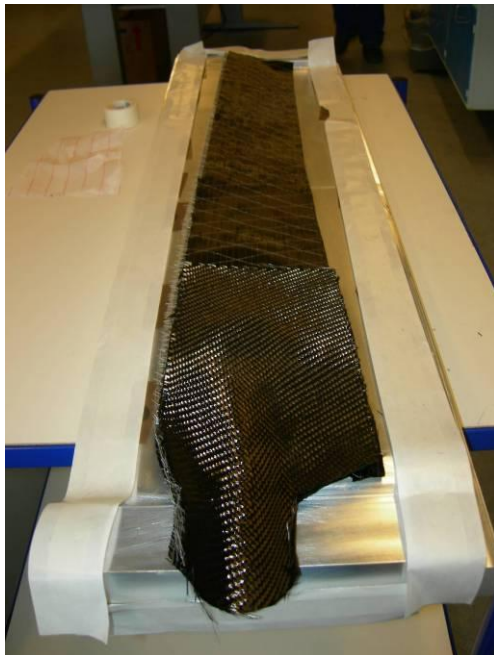
6.3 Vindmøllevinger til en racerbil

Studerende fra Danmarks Tekniske Universitet har i en årrække deltaget i en international konkurrence, WindTurbineRace, hvor specielt designet vinddrevne køretøjer kører om kap mod vinden. Drivkraften etableres ved hjælp af en vindmølle placeret på bilen. Se Figur 6.3.1.



Figur 6.3.1: WindTurbineRace. Specielt designet køretøjer kører om kap med en vindmølle, placeret på køretøjet, som eneste drivmiddel.

En væsentlig del på vindmøllen er de vinger som høster energien ud af vinden. Designet af vingen og formdelene var fastlagt ved henvendelsen til Risø DTU. I rotoren indgår fire ens vinger. Hver vinge er ca. 800 mm lang. En lav vægt af vingerne er ønskelig, da det øger effektiviteten og dermed konkurrenceevnen. Til femstilling af vingerne blev det besluttet at anvende dels et kulfibervæv med en lærredsbinding og dels en ensrettet kulfibertape. Oplægningen af fibermaterialet bestod af yderste et lag kulfibervæv i hele længden (800mm), dernæst fire lag kulfiber-tape, der blev aftrappet i længder på ca. 800 mm, 600 mm, 400 mm og 200 mm længde. I rodende blev der afslutningsvis lagt to lag kulfibervæv, for at opnå en laminatrykkelse på ca. 2 mm. Oplægningen af fibermaterialet, se Figur 6.3.2, blev fastlagt på baggrund af et skøn samt ønsket om laminatrykkelse i rod enden, hvor vingen efterfølgende skal limes fast til den indsats, der gør det muligt at montere vingen på narvet. Til vakuum infusion blev det besluttet at anvende EPOBIOX™. Resinen er relativ tyktflydende og har en viskositet på 1000 - 2000 mPas ved 20 °C. Basen blev derfor forvarmet til 40 °C, hvorved viskositeten kunne sænkes til 200 – 500 mPas. I første forsøg blev et fordelingsnet, der dækkede hovedparten af bredden på vingen anvendt, se Figur 6.3.2. Det medførte uvædede fibre i overfladen på den side af kompositten, der vender mod formparten. Årsagen til de uvædede fibre blev vurderet som en følge af at plasten løber for hurtigt henover emnet. Ved at reducere fordelingsnettet til at dække ca. halvdelen af bredden på emnet kunne emner med fuldt vædet fibre fremstilles. Hver vinge består af to skaller, der kunne fremstilles samtidig i de to formparter, hvilket er vist i Figur 6.3.3.

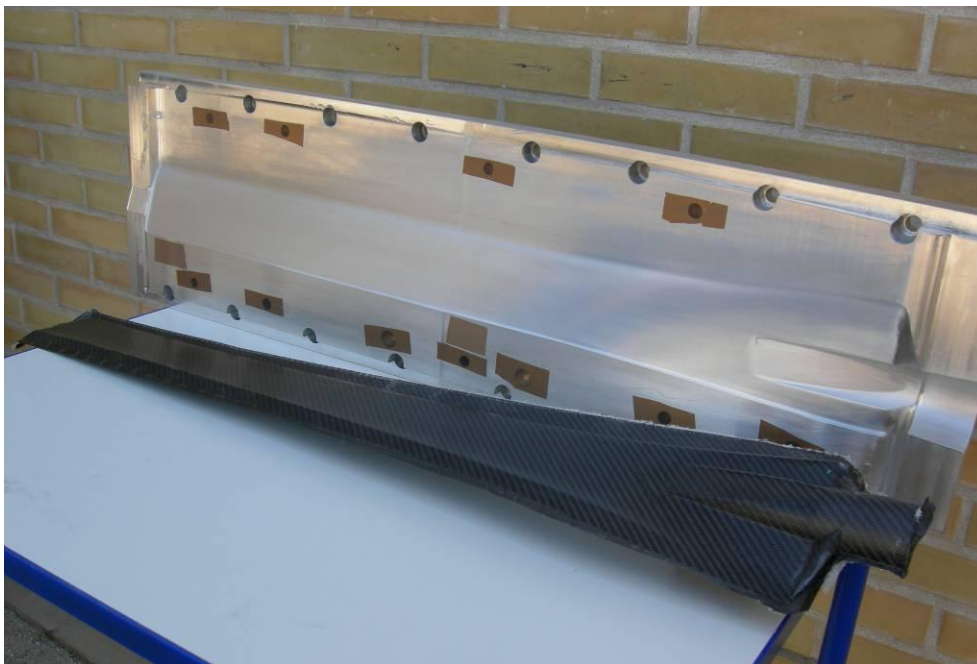


Figur 6.3.2: Venstre: Oplægning af kulfibervæv og ensrette tape i formparten. Højre: Vakuumindekning, hvor "inlet" og "outlet" slangerne er placeret på hver af vingen. Det grønne fordelingsnet dækker uhensigtsmæssig det meste af bredden på vingen.



Figur 6.3.3: Vakuumindekning af begge vingeform og samtidig vakuuminfusion. Fordelingsnettet dækker kun ca. halvdelen af bredden på vingen, hvilket resulterede i en bedre vædning af fibrene i overfladen på emnet.

For at reducere hærdetiden og samtidig opnå bedre mekaniske egenskaber blev vingedelene efter infusion opvarmet med 80 °C varm luft i en ovn. Ved denne fremgangsmåde var det muligt at fremstille to emner i den samme form på en normal arbejdsdag. Et billede af en konsolideret vingeskal, der er afformet, er vist i Figur 6.3.4.



Figur 6.3.4 Afformet vingeskal og aluminiumsform.

Til bilen blev der fremstillet 2 x 4 skaller, som efterfølgende blev bearbejdet og samlet til fire færdige vinger. Den enkelte vinge er 800 mm lang og vejer samlet ca. 250 g.

6.4 Skallen til en stol

Kontakten til Christian Dyrman Hansen og Jasper Overgård Schlichting, se evt Figur 6.4.1, blev etableret i forbindelse med Cradle to Cradle konferencen, IDEAS AT WORK, i Klimaforum under COP15 2009. De havde tidligere designet en stol, døbt "Care", ud fra Cradle to Cradle paradigmet's idealer, hvilket betyder at delelementerne fra stolen skal kunne indgå i enten en biologisk eller teknologisk cyklus. I den første udformning var skallen til Care fremstillet i glasfiber. Et samarbejde blev etableret med henblik på at afklare muligheden for at fremstille stolen af bio/bio-komposit i en form fremstillet af MDF plade, se evt også afsnit 5.2.

I et forsøg på at opnå en ensartet overflade på ydersiden af skallen blev det besluttet at anvende en tilfældig orienteret måtte i stedet for et væv. Jute måtten "Needled green jute" fra hollandske Enkev BV blev anvendt og havde desuden den fordel, at det var et relativt billigt halvfabrikat (37 kr/kg) sammenlignet med de vævede halvfabrikater.



Figur 6.4.1 Jasper Overgård Schlichting og Christian Dyrman Hansen med et fælles designprojekt "Dark Lady" som blev fremvist på Danmarks Designskole under COP 15.

Det var fordelagtigt at anvende flere mindre stykker måtte med et lille overlap ved etablering af oplæg, se Figur 6.4.2, i den dobbeltkrumme form. De enkelte stykker måtte blev revet fra hinanden, i stedet for at klippe, med det formål at skjule overlap mellem de enkelte lag.

Ved vakuum infusion af emnet var inlet placeret på midten i bunden af emnet og outlet blev etableret langs hele den øverste ydre kant af oplæget. For at eliminere eventuelle utætheder i MDF formparten blev hele formparten indesluttet i en vakuumpose under indpakningen. Denne indpakningsmetode øgede sandsynligheden for en proces uden læk i indpakningen væsentlig, på bekostning af noget ekstra vakuum dug. Metoden gør det letter at etablere vakuumindepakningen og til prototype fremstilling kan den klart anbefales.

Som matrixmateriale blev EPOBIOX™ anvendt og identisk med vingeprofilerne opvarmet til 40 °C under vakuum infusionen og efterfølgende hærdet ved 80 °C.

Emnetykkelsen blev næsten 10 mm og var tykkere end forventet. Det var vanskeligt at få emnet til at slippe formen, da det var meget stift. Forsøgene viste også, at det med den anvendte oplægningsteknik, hvor jutefiber måtten blev revet fra hinanden, var muligt at fremstille emner uden synlige samlinger i overfladen. Den ene af de fremstillede stoleskaller er vist i Figur 6.4.3, hvor kanterne er ved at bliver bearbejdet.



Figur 6.4.2 Christian Dyrman Hansen får hjælp af en studiekammerat under oplægning af den tilfældige orienterede jutefibermåtte "Needled green jute" fra hollandske Enkev BV. Ved at rive de enkelte stykker fra hinanden under oplægningen blev det muligt at fremstille et emne, hvor samlinger ikke kunne ses i overfladen på det konsoliderede emne.



Figur 6.4.3 Bearbejdning af kanten på skallen til "Care". Flot og ensartet overflade uden synlige samlinger blev opnået med en tilfældig orienteret jute måtte.

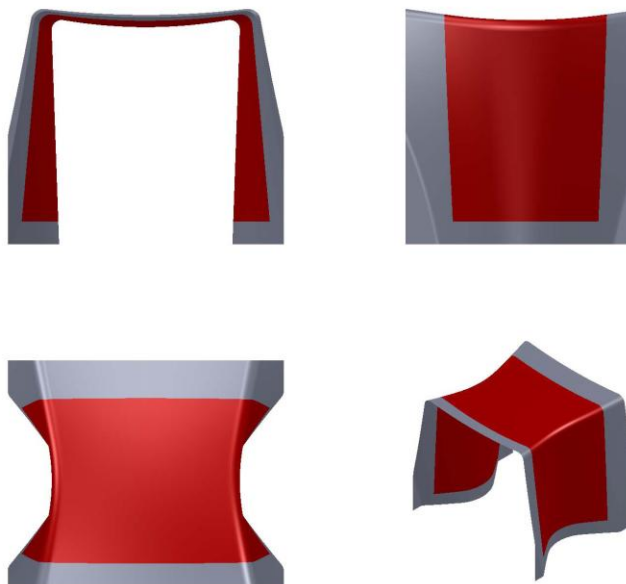
6.5 Skammel

Et nyt fremstillingskoncept, der gjorde det muligt at fremstille emner med negative slipvinkler, hvor det er materialets unikke struktur, der kan ses i overfladen blev udviklet til fremstilling af en skammel. Konceptet blev udviklet i samarbejde med industriel designer Martin Larsen samt en design praktikant, Henk Hatzmann fra Holland, som arbejdede for Martin Larsen. Desuden deltog tekstildesigner Karina Nielsen Rios med fremstilling af væv ud fra anskaffede hørgarner. Med udgangspunkt i designernes ønsker og på baggrund af indledende forsøg, som omfattede små 3D modeller af SLA og vakuumindepakning af små modeller, se evt. afsnit 5.2, blev det endelige koncept fastlagt. De enkelte trin i konceptet er vist i Figur 6.5.2.

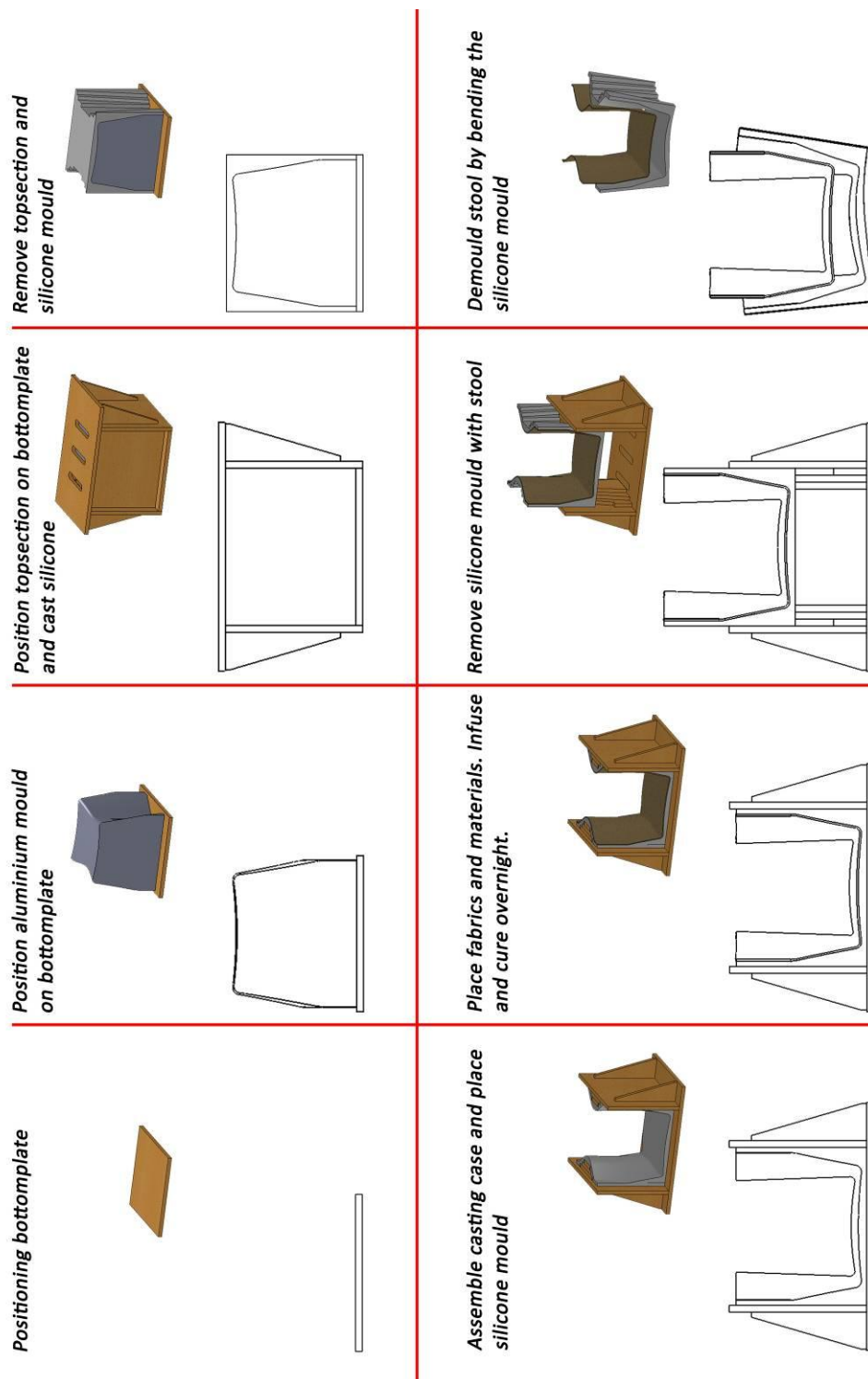
Ved fastlæggelse af fremstillingskonceptet blev det valgt at benytte en "hun-form", da det fordelagtigt medfører, at kompositmaterialet bliver konsolideret ud mod den mest synlige overfalde. Eventuelle folder i materialet er uønskede og vil med den givne udformning forekomme på indersiden af emnet. De umiddelbare ulemper ved det valgte koncept var risikoen for at vævet under konsolidering "går i bro" i rundingen øverst på skammelen samt udfordringen med at holde materialet på plads på de lodrette sider under oplægningen.

Efter geometrien af skammelen var fastlagt blev udformningen af selve formparten vurderet under hensyn til fremstillingsmetoden. Ved vakuuminfusion er det ønskeligt at have et område på bagkanten af flydefronten, hvor der før outlet kan etableres en "bremse-zone". Da bremsezone fylder mere end indlet er formen ikke symmetrisk, hvilket kan ses på Figur 6.5.1.

Formparten blev fremstillet og leveret af La Vie A/S ved Michael Olsen i Rønnede. Billeder af tilvejebringelse af silikoneformen er vist i Figur 6.5.3 og 6.5.4.



Figur 6.5.1 Udformningen af formparten. Skammelen er markeret med rødt på formparten, der er asymmetrisk på grund af ønsket om en bred bremsezone. Den korteste flydevej blev valgt på tværs af emnet med mulighed for eventuelt at flytte inlet til midt på emnet og have outlet på begge sider.



Figur 6.5.2 Konceptet trin for trin. I øverste række er det støbningen af silikoneformen der er skitseret og i den nederste række er det klargøring af silikoneformen, oplægningen af fibermaterialet og vakuum konsolideringen samt afslutningsvis afformning, der er skitseret. Kassen som silikoneformen blev støbt i var udformet så den efterfølgende kunne vendes på hoved og benyttes til support af den fleksible gummiform.

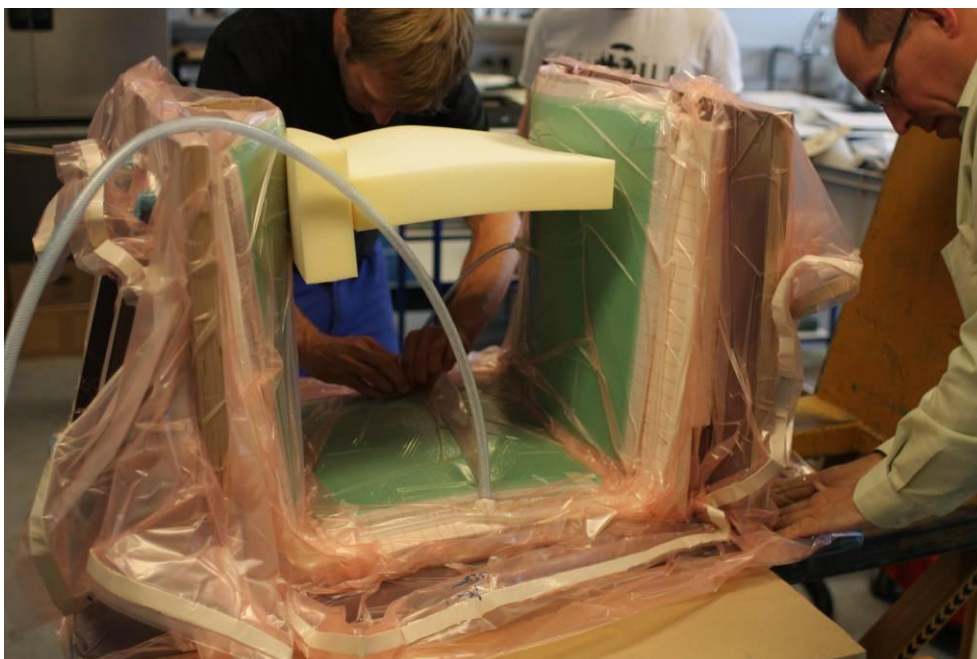


Figur 6.5.3 Støbning af silikoneformen. Kassen blev skruet sammen og samlinger yderligere tætnet for at undgå udsivning. På billede er top-pladen fjernet og står til højre bag formen. De tre afstøbninger af hullerne i toppladen blev efterfølgende brugt til at fiksere og støtte silikoneformen.

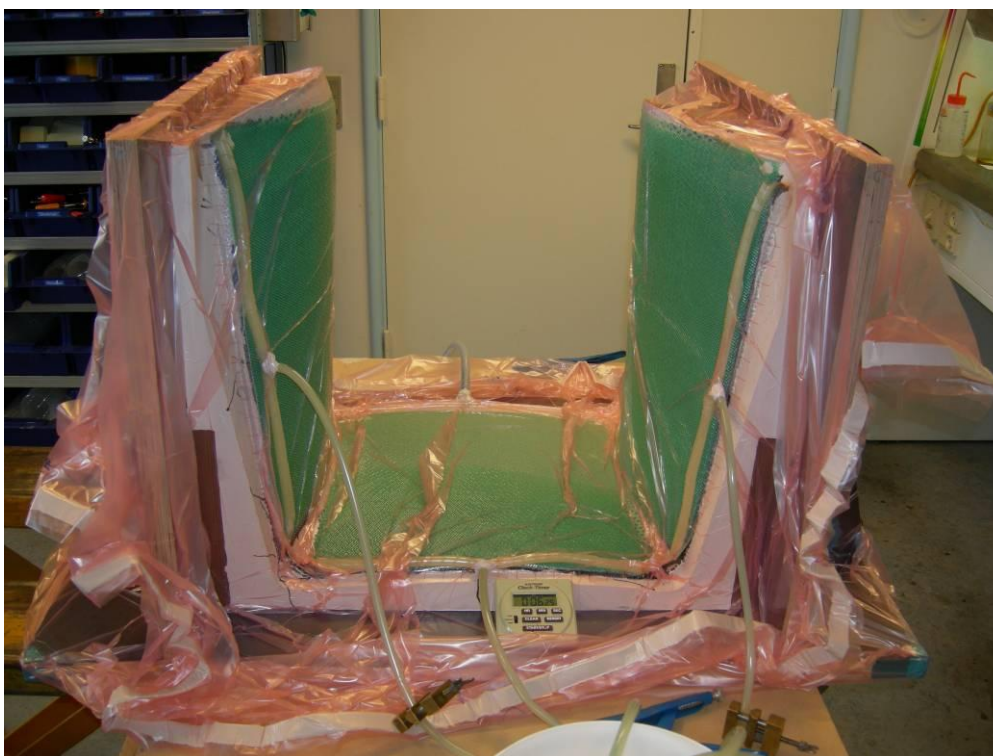


Figur 6.5.4 Silikoneformen placeret i sin supportkasse klar til oplæg af materiale. Bag formen kan aluminiumformparten ses.

Billeder fra oplægningen og vakuuminfusionen er vist i Figur 6.5.5 og Figur 6.5.6.

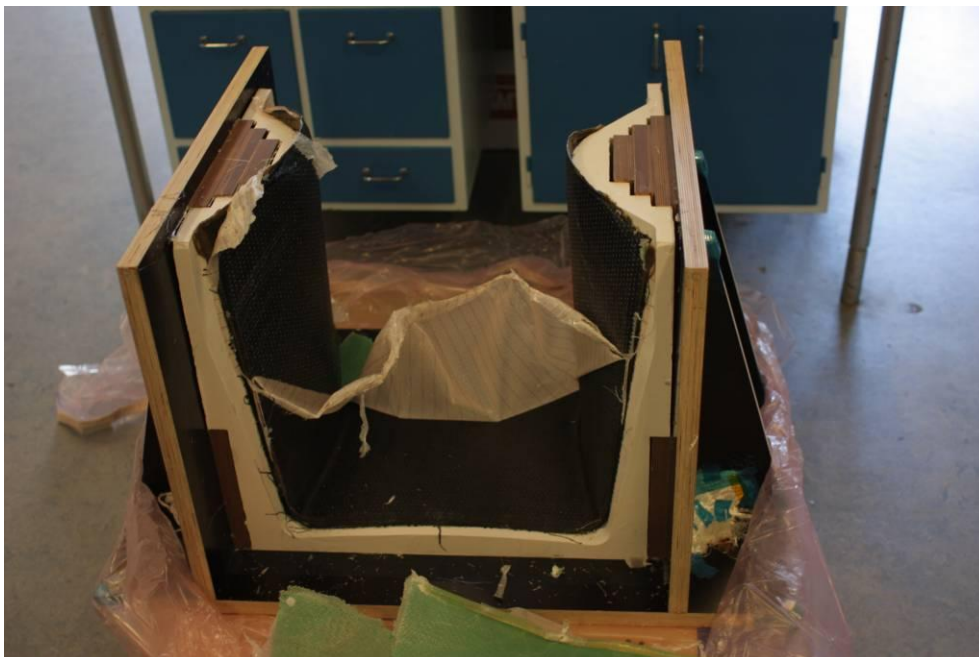


Figur 6.5.5 Oplægning af materiale og vakuumindepakning. Til at støtte materialet på de lodrette sider under indpakningen blev to skumgummi klodser anvendt. Hele forparten blev omsluttet med en vakuumpose for at eliminere utætheder.



Figur 6.5.6 Vakuuminfusion på tværs af emnet. Forrest ses inlet slangen, der fødes med resin i tre positioner, som kan lukkes individuelt for eventuelt at kunne styre flowet. SuperSap™ 100/1100 blev anvendt til forsøgene.

Billeder fra afformning af emnet er vist i Figur 6.5.7 og Figur 6.5.8.

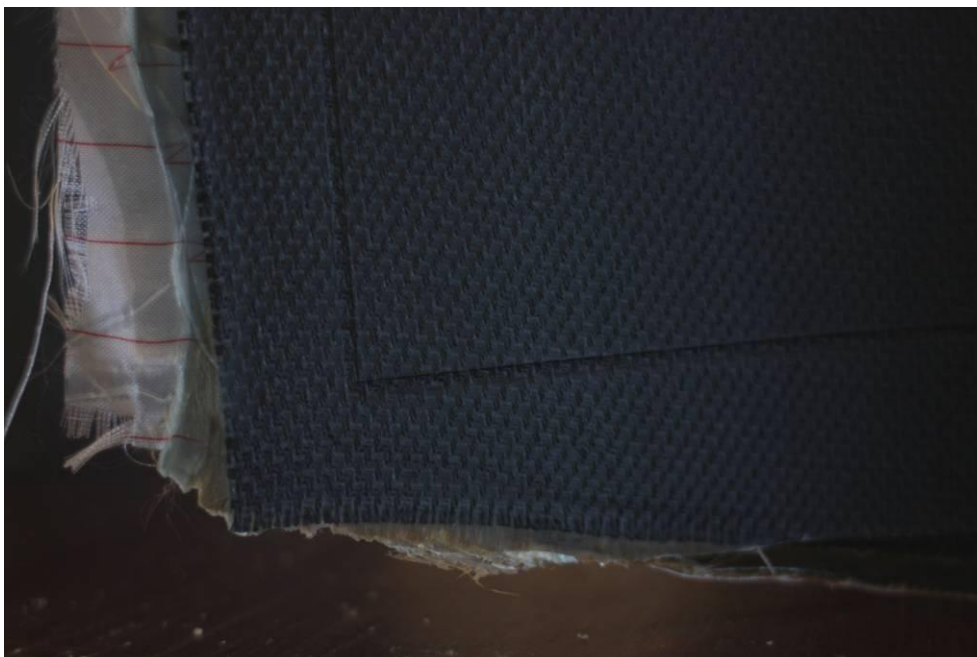


Figur 6.5.7 Afformning af emnet. Først fjernes indpakningsmaterialerne fra emnet, mens silikoneformen er støttet af supportkassen.



Figur 6.5.8 På billede ses to tilfredse designere Martin Larsen og Henk Hatzmann, der netop har løftet de ca. 32 kg silikoneform og emne ud af supportkassen, hvorefter silikoneparten selv slipper fra emnet.

En vigtig detalje i formparten og emnet var den indlagte forsænkning, der markerer overgangen til emnet. Linjen gør det lettere efterfølgende at bearbejde det støbte materiale til en ensartet geometri. Et nærbillede er vist i Figur 6.5.9.



Figur 6.5.9 En forsænkning i formparten gav en tydelig markering på det støbte kompositmateriale, som kunne bruges som rettesnor ved bearbejdning af emnet.

Det lykkedes at fremstille meget flotte kompositemner, hvor vævet i overfladen på emnet fremstod uden folder samtidig med at strukturen, som ønsket, var synlig, se Figur 6.5.10 og Figur 6.5.11.

Fejl i rundingen på skammelen, hvor vævet "står i bro", kunne undgås ved omhyggelighed under oplægningen af fibermaterialet. Tilsvarende var der på indersiden af emnerne risiko for folder i vævet som kunne undgås ved omhyggeligt at glatte fibermaterialet under oplægningen. Ved oplægning af fibermaterialet blev der yderst anvendt væv med en flot struktur, enten i form af designede væv af Karina Nielsen Rios eller til lejligheden anskaffet Hopsack 4/4 væv fra Biotex i England. I mellem disse lag blev der anvendt billigere "standard" jutevæv for at opnå den ønskede tykkelse.

Den relative høje viskositet på SupersapTM resinen medførte at det første emne ikke blev fuld støbt. Inlet slangen blev derfor flyttet ind på midten af emnet, hvorved flydevejen halveres. De blev imidlertid konstateret at inlet slangen gav et uønsket aftryk i overfladen af emnet på trods af at den var placeret i en "omega-slange, der skal sørge for en trykudligning ind over spiralslangen. Løsningen på viskositet problemet blev i stedet løst ved at anvende to lag fordelingsnet placeret oven på hinanden.



Figur 6.5.10 Unik bio/bio-komposit skammel med negativ slipform.



Figur 6.5.11 Nærbillede af skammel med tydelig væv struktur i overfladen.

7 Appendix 1: Modtagekontrol

side 1/4

Fabric name Jutevæv 100/16, (480g/m ²)		Update: February 18 2009 (boma)	
Fabric type	Plain weave, square		
Fibre type			
Warp	Jute		
Weft	Jute		
Spinning technique			
Warp	Ring spinning (assumed)		
Weft	Ring spinning (assumed)		
Supply			
Supplier	Nevotex, Denmark, Artikelnummer: 2416100, Jutevæv 100/16, 50 m/rulle (100 cm, 480 g/m ²)		
Supply date	November 16 2008 (toan)		
Dimensions			
Weight	65 kg	(1 roll)	
Length	190 m	(Calculated by the fabric area weight of 384 g/m ²)	
Width	0.9 m		
Cost			
Per weight	4.5 EUR/kg		
Per area	1.7 EUR/m ²		
Per volume, absolute	6.8 kEUR/m ³		
Weave parameters			
Weave number, n_{fabric}	2		
Unit area, n_{fabric}^2	4		
Warp number, n_1	1		
Weft number, n_2	1		
Move number, n_{move}	1		
Covering	1/1		

Skabelon fortsætter på næste side

<u>Yarn linear density, dry</u>			
Warp	271 tex	*	(no crimp correction)
Weft	455 tex	*	(no crimp correction)
<u>Thread density</u>			
Warp, n_1	4.3 threads/cm	*	
Weft, n_2	5.9 threads/cm	*	
<u>Crimp</u>			
Warp	2.7 %	*	
Weft	4.2 %	*	
<u>Cover factor</u>			
Warp, k_1	7.1		
Weft, k_2	12.6		
Fabric, k_{fabric}	19.7		
<u>Cover ratio</u>			
Warp, c_1	0.43		
Weft, c_2	0.77		
Fabric, c_{fabric}	0.87		
<u>Area weight, dry</u>			
Warp, w_1	117 g/m ²		
Weft, w_2	268 g/m ²		
Fabric, w_{fabric}	385 g/m ²		
Fabric (<i>measured</i>)	359 g/m ²	*	
<u>Thickness, absolute</u>			
Warp	0.08 mm		
Weft	0.18 mm		
Fabric	0.26 mm		
<u>Weight fractions</u>			
Warp, W_1	0.30		
Weft, W_2	0.70		
<u>Volume fractions</u>			
Warp, V_1	0.30		
Weft, V_2	0.70		
<u>Regularity</u>			
Warp	?		
Weft	?		
Fabric	?		

Skabelon fortsætter på næste side

Yarn cross-sectional area

Warp

Diameter	1001 μm	*
Cross-sectional area, apparent	0.79 mm^2	
Cross-sectional area, absolute	0.18 mm^2	
Degree of compactness	23 %	

Weft

Diameter	1298 μm	*
Cross-sectional area, apparent	1.32 mm^2	
Cross-sectional area, absolute	0.30 mm^2	
Degree of compactness	23 %	

Yarn mechanical properties

Warp

Failure load, F	N	*
Failure stress, specific, σ_{specific}	0.0 cN/tex	
Failure stress, σ	0 MPa	

Weft

Failure load, F	N	*
Failure stress, specific, σ_{specific}	0.0 cN/tex	
Failure stress, σ	0 MPa	

Fibre twist

Warp

Twist number	117 turns/m	*	(approximated from the measured fibre twisting angle)
Twist length (or pitch)	8.5 mm		
Twist angle, surface	20.2 °		
Twist angle, surface (measured)	20.3 °	*	

Weft

Twist number	74 turns/m	*	(approximated from the measured fibre twisting angle)
Twist length (or pitch)	13.5 mm		
Twist angle, surface	16.8 °		
Twist angle, surface (measured)	16.8 °	*	

Fibre density, apparent

Warp	1.50 g/cm^3	*	(assumed)
Weft	1.50 g/cm^3	*	(assumed)

Fibre dimensions

Warp

Length	mm	*
Diameter	μm	*
Aspect ratio	#DIV/0!	

Weft

Length	mm	*
Diameter	μm	*
Aspect ratio	#DIV/0!	

Skabelon fortsætter på næste side

Fibre mechanical properties

Warp

Stiffness	52 GPa	*	(back-calculated from composite stiffness)
Failure stress	MPa	*	

Weft

Stiffness	27 GPa	*	(back-calculated from composite stiffness)
Failure stress	MPa	*	

Fibre equilibrium moisture content (at 50 %RH; 23 °C)

Warp, U_1	8.5 %	*
Weft, U_2	8.4 %	*
Fabric, U_{fabric}	8.4 %	*
Fabric (<i>measured</i>)	%	*

Fibre chemical composition

Warp

Cellulose	%	*
Hemicellulose	%	*
Lignin	%	*
Surface lipids	%	*

Weft

Cellulose	%	*
Hemicellulose	%	*
Lignin	%	*
Surface lipids	%	*

8 Appendix 2: HDT bestemmelse

side 1/3

I prøvningsrapporten er de testede materialer betegnet CCC01 og CCC02. Nøgledata for fremstilling af emnerne er gengivet i tabellen nedenunder.

Laminat/prøveemne				Fiber	Matrix	Weight fibre	Weight matrix	Fibre ratio	Tempe- rature	Time	Force	Thickness
Pro	Serie	Nr	Prv			[g]	[g]	[Weight-%]	[°C]	[min]	[kN]	[mm]
CC	C	01	XX	Jute 480	PLA 4032D	81,4	142,0	36	190	5	200	2,37
CC	C	02	XX	Jute 480	PLA CA24-001	47,1	82,3	36	190	5	200	2,36



DANAK

TEST Reg. nr. 127

1198102_Rapport Bøjegenskaber og HDT Rev.1.doc

21. april 2009

ipa/eta

1220519-01

Rev. 1



**TEKNOLOGISK
INSTITUT**

Gregersensvej
Postboks 141
DK-2630 Taastrup
Telefon 72 20 20 00
Telefax 72 20 20 19

info@teknologisk.dk
www.teknologisk.dk

Prøvningsrapport

Rekvirent

Forskningscenter Risø
Afdelingen for Materialeforskning
Frederiksborgvej 399
4000 Roskilde

Rap.nr. 56/09
Side: 1 af 3
Antal bilag: 0
Cosign.: *WA*

Prøvning

Bøjegenskaber og formbestandighed

Prøveemner

2 serier med prøveemner, mærket følgende:

- CCC01
- CCC02

De 2 serier er modtaget her den 5. marts 2009.

Ekstra prøver til HDT omtest er modtaget den 3. april 2009

Prøvningsmetoder

ISO 178 (1993):

Plast - bestemmelse af bøjegenskaber

ISO 75-3 (2004)

Plast - bestemmelse af formbestandighed – Del 3: Hærdeplastlaminater af stor styrke

Prøvningsresultat

Prøvningsperiode: 9. - 18. marts 2009

Prøvningsperiode for HDT omtest: 30.03 – 14.04.2009

Resultatet er vist på side 2 og 3.

Side 2 af 3
21. april 2009
1220519-01
Rap. nr. 56/09

TEKNOLOGISK
INSTITUT

Hver serie indeholdt 10 prøveemner, hvoraf 5 er anvendt til 3-pkt. bøjegenskaber efter ISO 178, og de resterende prøver (hhv. 3 og 4) er anvendt til formbestandighed efter ISO 75-3. Til omtest af formbestandighedstemperatur er der anvendt:
to CCC01 prøver modtaget den 5. marts 2009 og en CCC01 prøve modtaget den 3. april 2009
en CCC02 prøve modtaget den 5. marts 2009 og to CCC02 prøver modtaget den 3. april 2009.

3-pkt. bøjegenskaber

Længde af alle prøveemner: 100 mm
Bøjehastighed 1,0 mm/min
Belastning på fladen

CCC01					
Emne nr.	Bredde	Tykkelse	E-modul	Bøjebudstyrke	Brudtøjning
	mm	mm	N/mm ²	MPa	%
1	10,0	2,38	5835	113	3,4
2	10,0	2,37	5288	107	3,7
3	10,0	2,36	5653	112	3,4
4	10,0	2,37	4964	103	3,9
5	10,0	2,36	5695	114	3,4
Gennemsnit	10,0	2,37	5487	110	3,6
Std. afv.	0,0	0,01	355	5	0,2

Understøtningsafstand: 38,0 mm

CCC02					
Emne nr.	Bredde	Tykkelse	E-modul	Bøjebudstyrke	Brudtøjning
	mm	mm	N/mm ²	MPa	%
1	10,1	2,37	5508	95	3,3
2	10,0	2,34	5822	104	3,5
3	10,1	2,34	5901	98	3,0
4	10,0	2,37	6373	101	3,0
5	10,0	2,36	6129	96	2,7
Gennemsnit	10,0	2,36	5947	99	3,1
Std. afv.	0,1	0,02	326	4	0,3

Understøtningsafstand: 38,0 mm

Side 3 af 3
21. april 2009
1220519-01
Rap. nr. 56/09

TEKNOLOGISK
INSTITUT

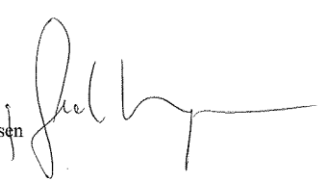
Formbestandighed

Længde af alle prøveemner: 100 mm
Understøtningsafstand for alle målinger: 70 mm
Opvarmningsmedium: Silikone olie. Opvarmningshastighed: $120 \pm 10^\circ\text{C}/\text{time}$.
Belastning på fladen.

CCC01					
Emne nr.	Tykkelse	Bredde	Belastning,	Nedbøjning (0,2%)	HDT
	mm	mm	N	mm	$^\circ\text{C}$
1	2,36	10,0	2,91	0,69	56,13
2	2,35	10,0	2,89	0,70	56,42
3	2,28	10,1	2,74	0,72	55,93
Gennemsnit	2,33	10,0	2,85	0,70	56
Std. afv.	0,04	0,06	0,09	0,02	0,3

CCC02					
Emne nr.	Tykkelse	Bredde	Belastning,	Nedbøjning (0,2%)	HDT
	mm	mm	N	mm	$^\circ\text{C}$
1	2,34	10,1	3,13	0,70	53,78
2	2,35	10,1	3,16	0,70	53,52
3	2,34	10,1	3,13	0,70	53,68
Gennemsnit	2,34	10,1	3,14	0,70	54
Std. afv.	0,06	0,0	0,02	0	0,1

Attestation


Flemming Gudbergsen
Laboratorietekniker
Plastteknologi

Telefon: 72 20 31 24 (direkte)

Vilkår: Provningsresultaterne gælder udelukkende for de prøvede emner. Provingen er udført i henhold til de af Dansk Akkreditering fastsatte retningslinier. Teknologisk Instituts almindelige vilkår for rekvirerede opgaver vedlægges. Provningsrapporten må gengives i sin helhed. Uddrag af rapporten må gengives efter provningslaboratoriets skriftlige godkendelse.

Risø DTU er Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi. Forskningen er rettet mod udviklingen af klimavenlige energiteknologier og energisystemer, og bidrager til innovation, uddannelse og rådgivning. Risø har store forsøgsfaciliteter og tværfaglige forskningsmiljøer og inkluderer kompetencecenteret for nukleare teknologier.

Risø DTU
Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi
Danmarks Tekniske Universitet

Frederiksborgvej 399
Postboks 49
4000 Roskilde
Telefon 4677 4677
Fax 4677 5688

www.risoe.dtu.dk