



Miljø- og  
Ligestillingsministeriet  
Miljøstyrelsen

# Separation af blandingsstekstiler MUDP Projektrapport

MUDP Rapport

December 2024

# Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram

Projektet, som er beskrevet i denne rapport, er støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet, der støtter udvikling, test og demonstration af miljøteknologi.

MUDP investerer i udvikling af fremtidens miljøteknologi til gavn for klima og miljø i Danmark og globalt, samtidig med at dansk vækst og beskæftigelse styrkes. Programmet understøtter dels den bredere miljødagsorden, herunder rent vand, ren luft og sikker kemi, men understøtter også regeringens målsætninger inden for klima, biodiversitet og cirkulær økonomi.

Det er MUDP's bestyrelse, som beslutter, hvilke projekter der skal modtage tilskud. Bestyrelsen betjenes af MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen.

MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen  
Tolderlundsvej 5, 5000 Odense | Tlf. +45 72 54 40 00

Mail: [ecoinnovation@mst.dk](mailto:ecoinnovation@mst.dk)

[Link til MUDP's hjemmeside](#)

*Denne slutrapport er godkendt af MUDP, men det er alene rapportens forfatter/projektlederen, som er ansvarlige for indholdet. Rapporten må citeres med kildeangivelse efter følgende skabelon; "[Forfatterens/redaktørens navn, rapportens udgivelsesår, rapportens titel], MUDP slutrapport, [ISBNnr.]"*

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Ditte Højland,

Anna Tode,

Frederik Lykkebo

Anders Reimer

ISBN: 978-87-7038-690-6

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

# Indhold

<b>1.</b>	<b>Konklusion og sammenfatning</b>	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>Conclusion and summary</b>	<b>8</b>
<b>3.</b>	<b>Indledning</b>	<b>10</b>
3.1	Politiske tiltag for øget tekstilgenanvendelse og markedets udvikling	10
3.2	Mangel på skalerbare løsninger til tekstilgenanvendelse	11
3.3	Virksomhedsbeskrivelse: Textile Change ApS	12
3.4	Ny innovativ teknologi udviklet af Textile Change ApS	12
<b>4.</b>	<b>Redegørelse: Projektets Arbejdspakker og Gennemførelse</b>	<b>14</b>
4.1	Projektets Struktur og Arbejdspakker	14
4.2	Procesdesign og Gennemførelse	15
<b>5.</b>	<b>Resultater og Diskussion</b>	<b>16</b>
5.1	Arbejdspakke 1: Affaldshåndtering og arbejdsgange/områder	16
5.2	Arbejdspakke 2: Mekanisk Nedbrydning	19
5.3	Arbejdspakke 3: Kemisk behandling og separation af bomuld og polyester	22
5.4	Arbejdspakke 4: Oprensning af polyester	27
5.5	Arbejdspakke 5: Udvinding af farvestoffer fra solvent	28
5.6	Arbejdspakke 6: Sammenkobling af systemer	28
5.7	Arbejdspakke 7: Energoptimering og miljøvurdering samt udarbejdning af rapport	34
5.8	Samlet opfølgning på arbejdsplaner	40
5.9	Next steps: Fokusområder for videreudvikling og skalering af teknologien	41
<b>6.</b>	<b>Perspektivering</b>	<b>43</b>

# 1. Konklusion og sammenfatning

I dette projekt har hovedmålet været at udforske og udvikle en metode til skalering af en banebrydende teknologi til kemisk genanvendelse af tekstiler. Projektet har været et afgørende skridt på vejen fra at tage teknologien fra laboratorieskala til det endelige mål om et fuldskala-anlæg. I projektet blev metoden skaleret med en faktor 150, hvilket har muliggjort test af metoden på batchstørrelse af 5-15 kg. I løbet af projektet og igennem dialog med førende eksperter i opskalering af procesanlæg blev det gjort klart, at der ville være behov for et mellemtrin i skaleringsprocessen inden der kan skaleres til et fuldskala-anlæg, hvilket også er den tilgang andre innovatører har i branchen har valgt. Mellemtrinnet er et semi-kommercielt demonstrationsanlæg med en input-kapacitet på 500 tons tekstilaffald per år. Med et demonstrationsanlæg af denne størrelse vil det være muligt at foretage procesoptimeringer og beregne OPEX- og CAPEX-omkostninger ved etableringen af et fuldskala-anlæg med en input-kapacitet på 50-100.000 tons per år. Størrelsen af demonstrationsanlægget er fastsat i samarbejde med en af verdens førende leverandører af procesudstyr og komplette anlæg, og er valgt ud fra at man ved den størrelse anlæg godt kan skalere med en faktor 100-200, da man har kendt procesudstyr i denne størrelse. Dermed vil det udviklede demonstrationsanlæg kunne danne udgangspunktet for den endelige opskalering til fuldskala-anlægget.

Ved projektets start eksisterede teknologien på laboratorieniveau, hvor der maksimalt kunne håndteres 100 gram tekstil pr. test. Denne proces involverede flere våd-behandlingstrin, hvor bomuld og polyester blev behandlet med organiske opløsningsmidler under opvarmning. Formålet var at adskille disse materialer i to fraktioner, som begge kunne anvendes som genanvendte råmaterialer til produktion af nye tekstilfibre, henholdsvis viskose- og polyesterfibre.

Gennem dette projekt blev hvert trin i laboriemetoden evalueret med det formål at identificere de mest velegnede maskiner og metoder til at oversætte vores laborieresultater til en større skala. Resultatet af denne indsats er udviklingen af et pilot-anlæg, som nu er i stand til at reproducere den oprindelige metode fra laboriet, men med kapacitet til at behandle op til 15 kg tekstil pr. test. Dette svarer til en skalering på 150 gange sammenlignet med de tidligere laborietests. Dette repræsenterer det første afgørende skaleringstrin i retning af at om-danne en innovativ laboriemetode til tekstilgenanvendelse til et kommercielt fuldskala-anlæg til genanvendelse af tekstiler.

Projektet har hjulpet til at forstå kritiske procesparametre som temperatur, tryk og hastighed i anlægget. Der blev fokuseret på disse fysiske parametre, da laborieforsøg havde vist, at den primære udfordring ved skalering ikke lå i selve den kemiske vådprocesseringsmetode, men i at skabe tilstrækkeligt flow, opvarmning og sikre tilstrækkelig gennemvædning af tekstilerne med kemikalier under processen. Derudover blev udfordringen ved håndtering af tekstiler med en stor volumen/masse-forhold og tendensen til at danne uønskede klumper i anlægget også identificeret. Derfor blev de fysiske og mekaniske parametre anset som kritiske for at komme nærmere et "proof of technology", som vil være et afgørende skridt ift. det endelige mål om etableringen af et fuldskala-anlæg.

Projektet bestod af syv arbejdsopgaver, som adresserede forskellige aspekter af den metode, som Textile Change ApS havde udviklet i laboriet. Dette omfattede også nødvendige aktiviteter for at skalere processen til større skala, såsom affaldshåndtering og sikkerhedsforanstaltninger.

Anlægget blev omhyggeligt designet og der blev foretaget væsentlige ændringer undervejs for at forbedre effektivitet og sikkerhed. Den mest afgørende ændring var indførelsen af en vertikal reaktor med højt opadgående væskeflow, hvilket forbedrede omrøringen og udnyttelsen af kemikalier. Dette reaktordesign er blevet patenteret (godkendt og udstedt i Danmark og indsendt til PCT, reference: P067186WO). Reaktordesignet er afgørende for, at der kan etableres en kontinuerlig drift på et skaleret anlæg, hvilket vil gavne driftsøkonomi og effektivitet. Derudover kan reaktordesignet have potentiale til at hjælpe andre virksomheder, der arbejder med opskalering af lignende processer, igennem en licensmodel. I alt er der indsendt fire patentansøgninger i projektperioden, hvoraf to er udstedt i Danmark (P067186DK og P066862DK), ét er godkendt (P067026DK) og ét er discontinued (P067048DK), dvs. det blev besluttet ikke at opretholde det, da ansøgningen blev indleveret som en del af en Freedom-to-Operate strategy, ikke med henblik på at vedligeholde patent. Udover patentet der dækker reaktordesignet, omhandler de øvrige to patenter der skal vedligeholdes, forskellige fokusområder indenfor af-farvningsteknologien, der indgår som en del af hele genanvendelsesprocessen. Det patent der ikke vedligeholdes, er et bredt patent, der beskriver relaterede processer og kemikalier, til det der er dækket af de øvrige patenter, og er altså indsendt af strategiske årsager for at sikre Freedom to Operate omkring processen der udvikles.

Anlægget blev testet og finjusteret, og resultaterne var lovende med stabil opvarmning, væskeflow og tryk. Analyser af energiforbruget viste, at opvarmning af opløsningsmidlet var mest energikrævende i starten af processen. Det blev konkluderet, at energiforbruget ville være betydeligt lavere ved kontinuerlig drift i et opskaleret anlæg.

Under testkørsler på anlægget blev tekniske udfordringer, håndterede ved løbende optimering. For eksempel opstod der problemer med overskridelse af kapaciteten for solventvolumen ved høje temperaturer, på grund af en større tendens til væskeekspansion end estimeret. Dette førte i en tidlig testkørsel til trykbygning og væskeudslip fra anlægget. Disse udfordringer blev imødekommet ved at tilføje en større balancetank og trykregulerende ventiler.

Samlet set, har projektet opnået vigtige milepæle inden for tekstilgenanvendelse, herunder udvikling af innovative teknologier, samarbejde med eksterne partnere og opnåelse af lovende resultater på pilot-anlægget. Projektet har også identificeret områder til forbedring og fremtidige muligheder, herunder patentbeskyttelse og potentiale for licensering af den udviklede teknologi. Disse resultater er vigtige skridt i retning af en mere bæredygtig tekstilindustri med reduceret ressourceforbrug og miljøpåvirkning.

Dette projekt, samt et sideløbende MUDP støttet projekt "Cirkulær ressource optimering ved separation af blandingstekstiler", har betydet at Textile Change ApS og udvalgte teknologipartnere, har været i stand til at planlægge næste skridt imod skaleringen til en fuldskala-anlæg. Dette i form af et semi-kommercielt demonstrationsanlæg, som udgør det sidste og afgørende skridt på vejen mod et kommercielt fuldskala-anlæg, der kan håndtere blandet tekstilaffald og realisere cirkulær økonomi i tekstilindustrien.

Højdepunkter fra projektet inkluderer:

1. **Skalering af Innovativ Teknologi:** Projektet har med succes bidraget til at kunne skalere en innovativ teknologi til genanvendelse af tekstiler, som adresserer den afgørende efterspørgsel efter bæredygtige løsninger i tekstilindustrien. Resultaterne og erfaringerne fra dette projekt danner grundlaget for at opskalere teknologien til et semi-kommercielt demonstrationsanlæg med henblik på at skabe en fuldt skalerbar løsning til behandling af tekstilaffald. Dette vil være det sidste skaleringstrin inden etablering af et fuldskala-anlæg der kan håndtere 50-100,000 tons tekstilaffald pr. år og dermed vil kunne genanvende alle danske mængder af tekstilaffald der består af bomuld, polyester og/eller polycotton.

2. **Behandling af Forskellige Materialer:** Teknologien er blevet testet til behandling af forskellige typer fibre, herunder polyester, bomuld og polycotton, hvilket viser dens alsidighed og potentiale på markedet.
3. **Bekræftelse af Anlæggets Funktionalitet:** Tests har bekræftet den stabile drift af anlægget, herunder pålidelig temperaturkontrol, konstant væskeflow gennem tekstiler og sikker drift ved maksimalt tryk på 3 bar.
4. **Energianalyse:** Analysen af energiforbruget har identificeret opvarmning af opløsningsmidlet som en energikrævende proces, hvilket er en forventet og håndterbar udfordring. Det blev identificeret at de valgte pumper og andet procesudstyr var overdimensioneret, hvilket betød et højere energiforbrug. Der er udarbejdet en plan for energioptimering ved fremtidig skalering af processen.
5. **Samarbejder:** Projektet har skabt interesse og mulighed for samarbejder med relevante interessenter, herunder tøjfirmaer, brands, sorteringsvirksomheder og affaldsselskaber. Dette demonstrerer en stærk efterspørgsel og potentiale for fremtidige partnerskaber.
6. **Patentering:** Fire patenter er blevet ansøgt om, og to er allerede udstedt, hvilket beskytter teknologiens intellektuelle ejendom og giver konkurrencefordel.
7. **Positive Fremtidsudsigter:** Med stigende fokus på bæredygtighed og genanvendelse i tekstilindustrien og målsætninger om brug af genanvendte materialer inden 2025/2030, er projektet positioneret til at imødekomme denne efterspørgsel og udgør en unik mulighed for investorer i en voksende og afgørende sektor.

Disse højdepunkter understreger projektets potentiale og de betydelige fremskridt, der er blevet opnået med hensyn til opskalering af den innovative tekstilgenanvendelsesteknologi udviklet af Textile Change ApS. Teknologien er ikke blot blevet bekræftet på laboratorieniveau, men er nu blevet opskaleret til et pilot-anlæg med lovende resultater. Projektets resultater markerer en vigtig milepæl i retning af en mere bæredygtig tekstilindustri med reduceret ressourceforbrug og miljøpåvirkning.

## 2. Conclusion and summary

In this project, the main objective has been to explore and develop a method for scaling up a groundbreaking technology for the chemical recycling of textiles. The project has been a crucial step towards taking the technology from laboratory scale to the goal of a full-scale plant. The method was scaled by a factor of 150 during the project, enabling testing on a batch size of 5-15 kg. Through dialogue with leading experts in process plant scaling, it became clear that an intermediate step in the scaling process was necessary before moving to a full-scale plant. This approach aligns with industry norms, and the intermediate step is a semi-commercial demonstration plant with an input capacity of 500 tons of textile waste per year. The project started with technology at the laboratory level, where a maximum of 100 grams of textiles could be handled per test. The process involved multiple wet treatment steps, treating cotton and polyester with organic solvents under heating to separate them into two fractions for recycling into viscose and polyester fibers.

The project successfully evaluated each step of the laboratory method to identify suitable machinery and methods for translating laboratory results to a larger scale. The outcome was the development of a pilot plant capable of reproducing the original laboratory method but with a capacity to process up to 15 kg of textiles per test. This marked a significant scaling step towards transforming the innovative laboratory method into a commercially viable full-scale plant for textile recycling.

The project addressed critical process parameters such as temperature, pressure, and speed in the plant, focusing on overcoming challenges related to flow, heating, and ensuring sufficient impregnation of textiles with chemicals. The physical and mechanical parameters were identified as critical for achieving a "proof of technology," a crucial step towards the goal of establishing a full-scale plant.

The plant underwent careful design, with substantial changes made along the way to enhance efficiency and safety. The introduction of a vertical reactor with high upward liquid flow was a crucial modification, patented and deemed essential for continuous operation on a scaled-up plant. Four patent applications were submitted during the project, with two issued in Denmark. The project consisted of seven work packages addressing various aspects of the method developed by Textile Change ApS. It covered activities necessary for scaling the process, including waste management and safety measures. The plant was tested, refined, and demonstrated stable heating, liquid flow, and pressure during operation.

The project successfully addressed technical challenges and optimized the process through ongoing improvements. For instance, issues with solvent volume exceeding capacity at high temperatures were resolved by adding a larger balance tank and pressure-regulating valves. In summary, the project achieved crucial milestones in textile recycling, including the development of innovative technologies, collaboration with external partners, and promising results from the pilot plant. The project identified areas for improvement and future opportunities, including patent protection and the potential for licensing the developed technology. These outcomes represent significant steps towards a more sustainable textile industry with reduced resource consumption and environmental impact.

Highlights of the project include:



8. **Scaling Innovative Technology:** The project successfully contributed to scaling an innovative textile recycling technology, addressing the industry's demand for sustainable solutions. The results form the basis for scaling the technology to a semi-commercial demonstration plant, representing the final step before establishing a full-scale plant capable of handling 50-100,000 tons of textile waste annually.
9. **Treatment of Different Materials:** The technology was tested for treating various fiber types, including polyester, cotton, and polycotton, demonstrating its versatility and market potential.
10. **Confirmation of Plant Functionality:** Tests confirmed the stable operation of the plant, including reliable temperature control, consistent liquid flow through textiles, and safe operation at a maximum pressure of 3 bar.
11. **Energy Analysis:** An analysis of energy consumption identified solvent heating as an energy-intensive process. Plans for energy optimization during future process scaling were outlined.
12. **Collaborations:** The project generated interest and opportunities for collaborations with relevant stakeholders, including clothing companies, brands, sorting companies, and waste management firms.
13. **Patenting:** Four patent applications were submitted, with two already issued, protecting the intellectual property of the technology and providing a competitive advantage.
14. **Positive Outlook:** With a growing focus on sustainability and recycling in the textile industry, the project is poised to meet this demand, offering a unique opportunity for investors in a crucial and expanding sector.

These highlights underscore the project's potential, and the significant progress made in scaling up the innovative textile recycling technology developed by Textile Change ApS. The technology has not only been confirmed at the laboratory level but has now been scaled up to a pilot plant with promising results. The project's results mark an important milestone towards a more sustainable textile industry with reduced resource consumption and environmental impact.

## 3. Indledning

Omdrejningspunktet for nærværende projekt har været at arbejde med skalering af en innovativ metode til håndtering og genanvendelse af værdifulde ressourcer fra tekstilaffald, udviklet af Textile Change ApS. Textile Change ApS er drevet af en stærk motivation for at fremme bedre forvaltning af globale ressourcer og imødekomme politiske tiltag såsom EU-direktiv 2018/851, der kræver separat indsamling af tekstilaffald fra 2025.

Projektet har desuden en national ambition om at sikre, at hovedparten af det danske tekstilaffald kan håndteres på et dansk anlæg. Dette bidrager ikke kun til bæredygtig ressourcehåndtering i Danmark, men skaber også en miljøløsning, der kan eksporteres til andre markeder på grund af den enorme mængde tekstilaffald, der produceres globalt årligt. På denne måde understøtter projektet den danske "Klimaplan for en grøn affaldssektor og cirkulær økonomi" samt internationale initiativer til bæredygtighed og cirkulær økonomi.

Projektet har opnået betydelige resultater, der er blevet muliggjort af støtte fra Miljøministeriets Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP), der arbejder for at fremme bæredygtige teknologier og løsninger.

### 3.1 Politiske tiltag for øget tekstilgenanvendelse og markedets udvikling

Tekstilindustrien står over for betydelige udfordringer i forhold til bæredygtighed, som kræver øjeblikkelig opmærksomhed og innovative løsninger. Denne sektor er kendt for sit enorme forbrug af vand og energi samt sin skadelige udledning af farvestoffer og kemikalier, der foruren vandressourcer og jord. Disse negative påvirkninger rækker ud over miljøet og påvirker også samfund og menneskers sundhed. Ikke mindre chokerende er det faktum, at tekstilindustrien alene står for 10% af de globale drivhusgasemissioner, hvilket overstiger det samlede bidrag fra internationale flyrejser og søfragt. (Kilde: "The impact of textile production and waste on the environment," European Parliament, maj 6, 2023). På trods af de massive problemer, viser tal fra Ellen MacArthur Foundation af mindre end 1% af alle tekstiler bliver genanvendt.

Som svar på disse udfordringer forbereder EU's medlemslande sig på at implementere direktivet 2018/851, der kræver separat indsamling af tekstilaffald fra 2025. Dette vil ændre måden, tekstilaffald håndteres på og øge behovet for effektiv tekstilgenanvendelse. Ifølge rapporten "Kortlægning af tekstilflows i Danmark" udgivet af Miljøstyrelsen i 2018, vil tekstil-til-tekstil genanvendelse blive afgørende både økonomisk og miljømæssigt for at håndtere ikke-genbrugelige tekstiler. Rapporten understreger imidlertid, at der vil gå tid, før denne praksis er normaliseret på grund af udfordringer som krav til produktkvalitet og teknologiske udfordringer.

Markedet for tekstilgenanvendelse gennemgår i øjeblikket markante forandringer som følge af ændringer i lovgivningen i EU, Kina og USA samt initiativer fra store tøjvirksomheder som Nike, Inditex, H&M, Uniqlo, Bestseller, mv. Udover opdatering af affaldsrammedirektivet 2018/851, har EU formuleret en tekstilstrategi som blandt andet har til formål at øge brugen af genanvendt materiale i nye tekstiler så meget som muligt (*EU strategy for sustainable and circular textiles*). Kina har ligeledes ambitioner om at etablere en cirkulær økonomi for tekstiler fra 2025, og i USA er der også taget tidlige skridt ift. at fremme tekstilgenanvendelse fx med Californiens "Responsible Textile Recovery Act," som forventes at blive behandlet i 2024. Dette har resulteret i en række tøjmærker, der fastsætter mål for brugen af genanvendte fibre i

2025/2030 og dermed er med til at sikre en fremtidig efterspørgsel for genanvendte fibre. Mange af tøjmærkerne har sat mål for 2030 på +30% genanvendte fibre.

Generelt er det globale marked i betydelig vækst, både når det kommer til virgine og genanvendte tekstilfibre. Ifølge Textile Exchanges *Preferred Fiber & Marked Materials Report (2022)*, forventes en vækst på 31% for det samlede fibermarked i perioden fra 2021 til 2030. Dette vækstniveau kan primært tilskrives befolkningsvækst og en stigende andel af mennesker, der tilhører middelklassen - med flere forbrugere på verdensplan, der har adgang til og efterspørger tekstiler, forventes efterspørgslen på tekstilfibre at stige markant. Når det kommer til genanvendte tekstilfibre, estimeres det i McKinseys rapport *Scaling textile recycling in Europe - turning waste into value (2022)*, at efterspørgslen vil være 60-70% højere end udbuddet i EU i 2030. Dette skyldes delvist mangel på teknologier, der kan skaleres op til at imødekomme den voksende efterspørgsel fra markedet. Dette understreger det enorme potentiale og markedsmuligheder for innovative teknologier som dem udviklet af Textile Change ApS, der arbejder på at imødekomme den stigende efterspørgsel efter genanvendte tekstilfibre.

### 3.2 Mangel på skalerbare løsninger til tekstilgenanvendelse

Der er en række faktorer der har betydning for de manglede skalerbare løsninger. Mekanisk genanvendelse af tekstiler har længe været den eneste mulighed. Her klippes og opkradses kasserede tekstiler til enkelte fibre, hvorefter de opkradsede fibre bliver blandet med virgine fibre i nyt garn og ultimativt nye tekstilprodukter. Mekanisk genanvendelse er belastet af at fibre forkortes i opkradsningen, og ved brug af disse korte fibre er der høj risiko for kvalitet forringelse, hvor tekstilerne bl.a. vil pæle ("fnulre"), hvilket giver en meget forkortet holdbarhed og dermed kortere levetid. Derudover kræver mekanisk genanvendelse omfattende materiale- og farvesortering og rensning for at fjerne urenheder. Det er desuden en udfordring at fjerne knapper, lynlåse mv., på en måde der samtidig er skånsom overfor tekstilerne.

I det seneste årti er der kommet flere innovationsprojekter indenfor kemisk genanvendelse, som har potentialet til at løse mange af de teknologiske udfordringer, som mekanisk genanvendelse ikke har været i stand til. I kemisk genanvendes tekstilerne ikke direkte som opkradsede fibre, men materialerne opløses i stedet for på molekylært niveau og de opløste materialer genspindes herfra til nye fibre. En afgørende forskel på mekanisk og kemisk genanvendelse er, at mekanisk genanvendelse i høj grad er udfordret af at skulle bevare så lange fibre som muligt, når tekstilerne opkradses. Kemisk genanvendelse rummer ikke samme udfordring, da det primære fokus for kvalitetsikringen er selve polymer-molekylerne som krydsbinder og danner fiberstrukturen, fremfor fiberstrukturen i sig selv. Dette er gældende både for syntetiske fibre (polyester) og naturlige fibre (bomuld) – polyester kan benyttes direkte til produktion af nye polyesterfibre og bomuld kan omdannes til cellulose pulp der kan benyttes til produktion af "man-made cellulosefibre" (MMCFs) som f.eks. viskose eller lyocell.

På trods af det store potentiale i kemisk genanvendelse af tekstiler er der stadig en række udfordringer der skal løses når det kommer til kemisk genanvendelse, heriblandt at tekstiler har et højt indhold af forskellige kemiske stoffer, såsom overfladebehandlinger, farvestoffer og PFAS, som skal fjernes i den kemiske genanvendelsesproces. Derudover består mange tekstiler af blandingstekstiler, især en kombination af bomuld og polyester, hvilket kræver en proces til effektiv separering, inden materialerne kan genanvendes. Dette kan være en udfordring, og mange kemiske metoder baserer sig på at ødelægge bomuld for at oprense polyester, eller omvendt, hvilket resulterer i et stort materiale tab. I nogle tilfælde kan polyester genopbygges efter at have været nedbrudt, hvilket dog kræver ekstra procestrin. Der findes ikke en metode til at genopbygge cellulose, som bomuld består af, når først det er ødelagt.

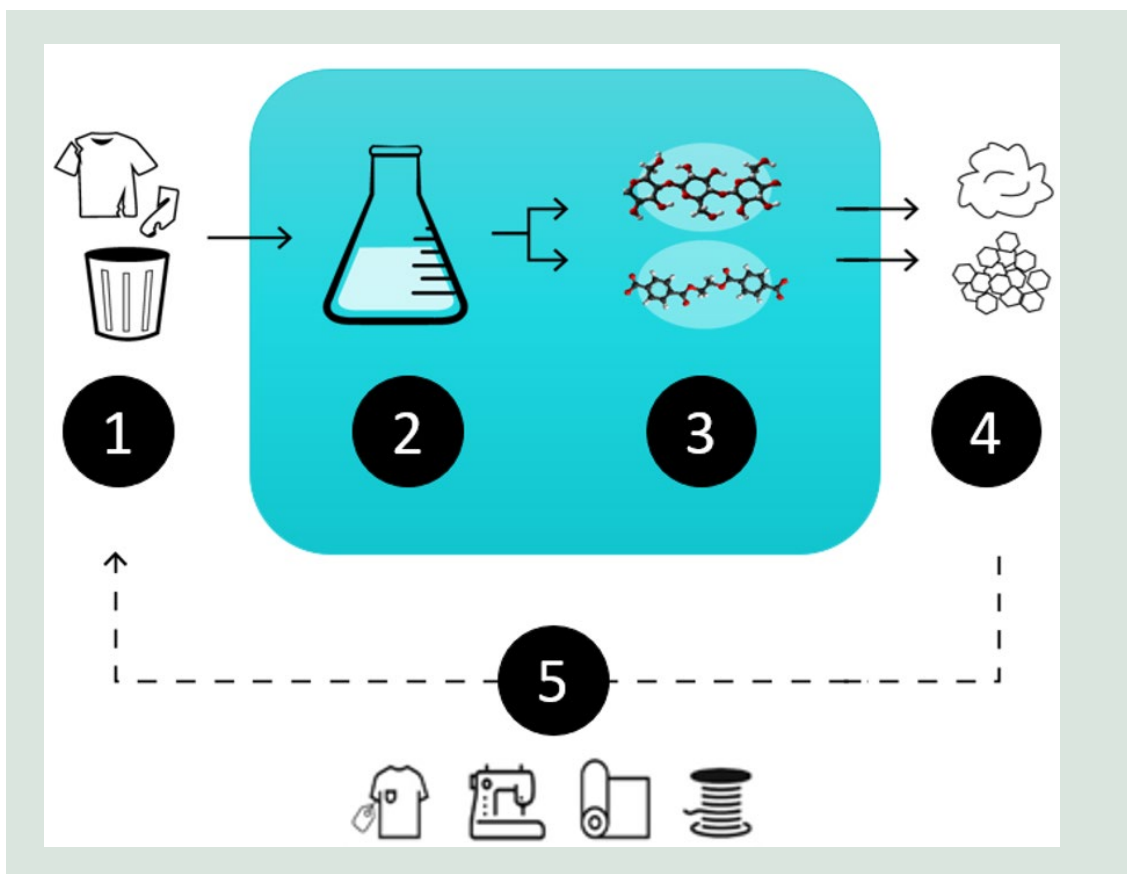
### 3.3 Virksomhedsbeskrivelse: Textile Change ApS

Textile Change ApS er en Vejle baseret-udviklingsvirksomhed der blev stiftet i 2020. Der er 11 medarbejdere og praktikanter i virksomheden, der primært udgøres af kemi-, bioteknologi- og maskiningeniører, samt enkelte medarbejdere indenfor forretningsudvikling og økonomistyring. Textile Change fokuserer på at skabe bæredygtige og effektive løsninger til genanvendelse af tekstilaffald, med særligt fokus på kemisk genanvendelse af bomuld og polyester. Virksomhedens dedikation til teknologisk innovation har blandt andet ført til udviklingen af en unik, patenteret reaktor, der muliggør en effektiv og skånsom opdeling af tekstiler i deres bomulds- og polyesterkomponenter. Med fokus på at bevare kvaliteten og integriteten af genanvendte materialer arbejder Textile Change ApS målrettet på at transformere tekstilgenanvendelse og skalere deres teknologi – med ønsket om at lede vejen mod en mere bæredygtig og ressourceeffektiv tekstilindustri gennem avanceret teknologiudvikling og teknologisk knowhow.

### 3.4 Ny innovativ teknologi udviklet af Textile Change ApS

Eksisterende genanvendelsesmetoder har store udfordringer vedrørende opretholdelse af fiberkvalitet og mulighed for opskalering. Textile Change ApS har udviklet en banebrydende løsning, der har potentiale til at revolutionere tekstilgenanvendelse på globalt plan. En af de centrale udfordringer ved tekstilgenanvendelse er kompleksiteten af sammensatte materialer, der resulterer i nedbrydning af enten cellulose (f.eks. bomuld) eller syntetisk (f.eks. polyester) fiberindhold, når man forsøger at genanvende den anden fraktion. Derudover indeholder tekstiler ofte tungmetaller, finishing-kemikalier, PFAS, farvestoffer og diverse forurenende stoffer, der skal fjernes for at bruge tekstilet som råmateriale til nye fibre.

Løsningen, udviklet af Textile Change ApS, kombinerer principper fra pulpning-kemi for cellulose og solvent-kemi for plast for at bevare både naturlige og syntetiske komponenter i tekstiler. Denne innovative tilgang muliggør adskillelse og forberedelse af komplekse tekstilblandinger til fiber-til-fiber-genanvendelse. Processen består af modulære vådbehandlinger, herunder basiske, reductive og sure forbehandlinger samt anvendelse af organiske opløsningsmidler (solventer). Hver af disse trin er målrettet specifikke komponenter i tekstilmatrixen og fjerner effektivt forurenende stoffer, affarver og adskiller til sidst fibermaterialer ved at opløse og indsamle flydende polyesterpolymerer i en separat fraktion, mens cellulosefraktionen forbliver uændret. Resultatet er ufarvede, rene og homogene genanvendte råmaterialer, egnet til produktion af nye fibre. Bomuld omdannes til cellulosepulp, der kan anvendes i produktionen af man-made cellulose fibre (MMCF), såsom lyocell- eller viskosefibre, mens polyester tørres til et polyesterpulver og bearbejdes til en resin, der er klar til direkte genanvendelse i produktionen af polyesterfibre (se FIGUR 1).



FIGUR 1. illustrerer metoden i fig. Trin:

- 1) **Input til metoden er blandet tekstilaffald bestående af:** Polycotton, polyester, bomuld, man-made cellulose fibre (MMCF) fx viskose eller lyocell, elastan. Tekstilerne skal ikke farvesorteres, dvs. alle farver accepteres. Tekstilerne findeles til små fiberfragmenter vha. en "shredder" og knapper og lynlåse, o.lign. fjernes vha. luftcykloner.
- 2) **De findelte fibermaterialer gennemgår en kemisk rensning og affarvning i 4 trin.** Her bruges tre vådbehandlinger m. diverse aktive syre/base samt redox kemikalier til at fjerne diverse finishing kemikalier, PFAS, tung-metaller og evt. elastan indhold. Til sidst benyttes et organisk opløsningsmiddel til at opløse og fjerne farvestofferne.
- 3) **De affarvede og rensede tekstilfibre gennemgår en polymer-molekylær separation.** Polyester og bomuld (+evt. MMCF) polymerer adskilles ved at udnytte forskellige termodynamiske egenskaber – polyester opløses, filtreres fra på flydende form og udfældes derefter til pulver. Bomuld og andre cellulosebaserede fibre bliver tilbage som filterkage, på fast form.
- 4) **Outputtet af metoden er genanvendte råmaterialer, som kan sælges til fiberproducenter.** Polyester-pulveret laves til resin som kan bruges i spinning af nye polyesterfibre. Bomuld og evt. MMCF laves til cellulose pulp, der kan bruges til spinning af nye MMCF-fibre som fx viskose og lyocell.
- 5) **Cirkularitet for tekstilerne realiseres,** da fibermaterialerne i teorien kan gennemgå denne genanvendelsesproces i en uendelighed - i praksis vil der være et mindre tab i processen, fx små stykker fibre der mistes i vask, o. lign. Der forventes et materialetab på maksimalt 15% af de tekstiler der behandles i processen, hvorimod mekanisk genanvendelse kan tabe helt op mod halvdelen af de materialer der genanvendes – hvilket det i forvejen er en langt mere begrænset fraktion der kan. Altså en klar forbedring både i metodens robusthed overfor input variationer samt materialeudnyttelse.

# 4. Redegørelse: Projektets Arbejdspakker og Gennemførelse

I dette projekt har hovedmålet været at videreudvikle og muliggøre skalering af en banebrydende teknologi til kemisk genanvendelse af tekstiler. Projektet har været et afgørende skridt på vejen fra at tage teknologien fra laboratorieskala til det endelige mål om et fuldskala-anlæg. I projektet blev metoden skaleret med en faktor 150, hvilket har muliggjort test af metoden på batchstørrelser af 5-15 kg.

## 4.1 Projektets Struktur og Arbejdspakker

Projektet var struktureret i syv arbejdspakker, der hver især fokuserede på specifikke elementer af tekstilgenanvendelsesprocessen:

### **Arbejdspakke 1: Sikkerhed og Arbejdsgange/Områder**

- Identifikation og håndtering af sikkerhedsmæssige aspekter ved projektet.
- Definering af arbejdsområder og -gange for at sikre effektivitet og sikkerhed.

### **Arbejdspakke 2-5: Mekanisk Nedbrydning, Kemisk Behandling, Separation, Oprensning af Polyester**

- Dedikerede arbejdspakker for hvert trin i den udviklede metode.
- Udvikling og optimering af maskinelle processer i laboratoriet.

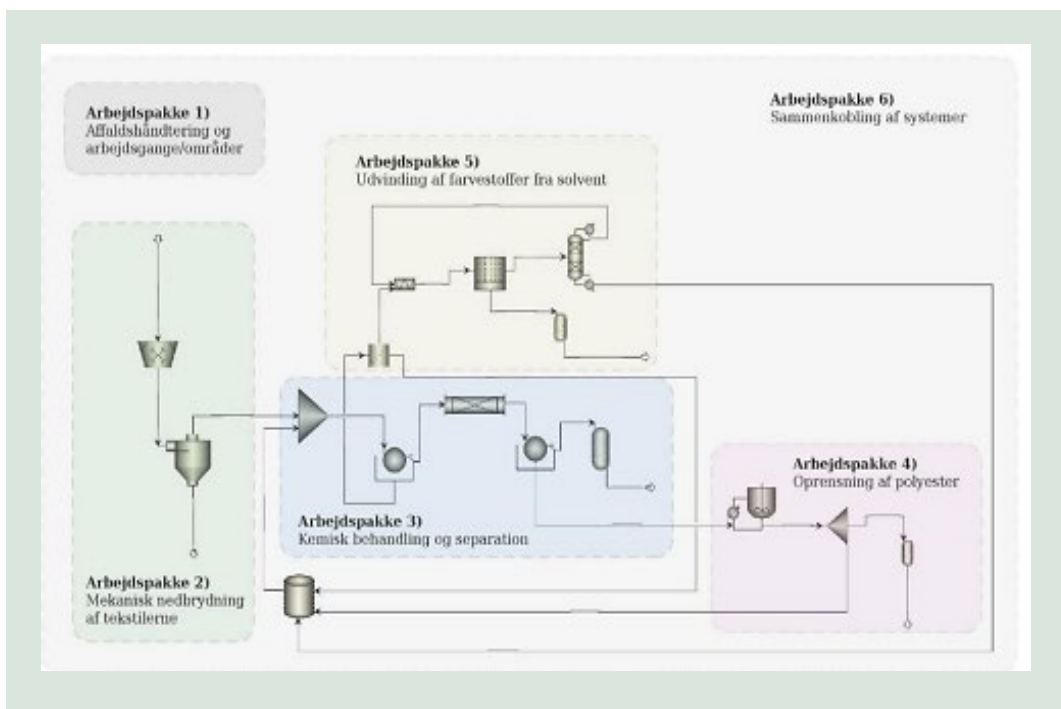
### **Arbejdspakke 6: Integration af Erfaringer og Samling af Pilot-anlæg**

- Sammenføring af erfaringer fra de foregående arbejdspakker.
- Design og opførelse af et samlet pilot-anlæg.

### **Arbejdspakke 7: Evaluering, Optimering og Rapportering**

- Evaluering af det fuldendte design.
- Optimering af processen med henblik på effektivitet og kvalitet.
- Udarbejdelse af rapport med resultater og konklusioner.

FIGUR 2 viser en principskitse, der blev medsendt i ansøgningen til nærværende projekt. Her vises hvordan projektet var opdelt i 6 arbejdspakker, hhv 1) Affaldshåndtering og arbejds-gange/områder, 2) Mekanisk nedbrydning af tekstilerne, 3) Kemisk behandling og separation, 4) Oprensning af polyester, 5) Udvinning af farvestoffer fra solvent og 6) Sammenkobling af systemer. Dertil kommer arbejdspakke 7) Energooptimering og miljøvurdering samt udarbejdning af rapport.



**FIGUR 2.** Principskitse for pilotanlægsdesign, udarbejdet af Textile Change ApS og medsendt i ansøgningsmaterialet til MUDP ved ansøgning af nærværende projekt.

## 4.2 Procesdesign og Gennemførelse

Før opstart af projektet eksisterede teknologien på laboratorieniveau, hvor der maksimalt kunne håndteres 100 gram tekstil pr. test. Denne proces involverede flere våd-behandlingstrin, hvor bomuld og polyester blev behandlet med organiske opløsningsmidler under opvarmning. Formålet var at adskille disse materialer i to fraktioner, som begge kunne anvendes som genanvendte råmaterialer til produktion af nye tekstilfibre, henholdsvis viskose- og polyesterfibre. Gennem dette projekt blev hvert trin i laboriemetoden evalueret med det formål at identificere de mest velegnede maskiner og metoder til at oversætte vores laborieresultater til en større skala. Resultatet af denne indsats er udviklingen af et pilot-anlæg, som nu er i stand til at reproducere den oprindelige metode fra laboriet, men med kapacitet til at behandle op til 15 kg tekstil pr. test. Dette svarer til en skalering på 150 gange sammenlignet med de tidligere laborietests. Dette repræsenterer det første afgørende skaleringstrin i retning af at om-danne en innovativ laboriemetode til tekstilgenanvendelse til et kommercielt fuldskala-anlæg til genanvendelse af tekstiler.

## 5. Resultater og Diskussion

I nærværende projekt har Textile Change ApS udviklet og etableret et pilot-anlæg til tekstilgenanvendelse, der er i stand til at behandle 5-15 kg. tekstil pr. test. Målet med projektet har været at etablere dette anlæg, for at kunne sandsynliggøre at virksomhedens innovative løsning til tekstilgenanvendelse, vil kunne skaleres fra laboratoriet til et kommercielt fuldskala-anlæg. Etablering af pilot-anlægget repræsenterer et afgørende skridt på denne rejse, da det har givet mulighed for at udføre en række kritiske undersøgelser vedrørende diverse procesparametre såsom flowhastigheder, fiberkompression, temperatur, tryk og energiforbrug i processen.

Projektet var inddelt i 7 arbejdsopgaver. Arbejdsopgave 1 omhandlede de sikkerhedsmæssige aspekter, arbejdsopgaver 2-5 var hver dedikeret til et afgrænset område af den metode der er udviklet i laboratoriet, forud for dette projekt, arbejdsopgave 6 havde til formål at integrere erfaringer fra arbejdsopgaver 1-5 i ét samlet pilot anlæg, og arbejdsopgave 7 havde en opsummerende funktion med evaluering, optimering og rapportering af det færdige design.

Fra forudgående laboratorieforsøg var der lavet initiale beregninger og simuleringer af delprocesser. Inden projektet blev disse brugt til at udarbejde et initialt bud på et egnet procesdesign, for skalering af denne del af processen. Procesdesignet blev konstant evalueret undervejs i projektet og ved afslutning af hver arbejdsopgave, blev en maskinel delproces designet og færdigudviklet, inklusive rapporter over sikkerhed og arbejdsopgange i den pågældende delproces. Til sidst blev alle delprocesser samlet i ét prototypeanlæg, der blev bygget færdigt og nu kan producere 5-15 kg genanvendt materiale per testkørsel.

FIGUR 2 viser Principskitse for pilotanlægsdesign, udarbejdet af Textile Change ApS og medsendt i ansøgningsmaterialet til MUDP ved ansøgning af nærværende projekt. Undervejs i projektet, blev procesdesignet optimeret og forandret relativt meget – dog er de generelle processer i grove træk bibevaret. Resultater for de enkelte arbejdsopgaver beskrives i de følgende afsnit, sammen med en beskrivelse af formål og gennemførelse af hver af disse.

### 5.1 Arbejdsopgave 1: Affaldshåndtering og arbejdsopgange/områder

#### Formål

Spørgsmål vedrørende sikkerhed, affaldshåndtering og arbejdsopgange i processen blev prioriteret højt i dette projekt. Formålet med denne arbejdsopgave var at sørge for sikre procedurer i arbejdet med denne teknologi, både på det etablerede pilot-anlæg og med henblik på yderligere skalering. Arbejdet skulle sikre at udviklingen af teknologien var forenelig med personsikkerhed, forsvarlig håndtering af kemikalier, bortskaffelse af affald og at processen på pilotskala kunne godkendes af bygge- og brandmyndigheder i Vejle Kommune. Arbejdsopgave 1 bredte sig over alle de øvrige arbejdsopgaver i projektet, hvor aktiviteter løbende skulle sikkerhedsvurderes, procedurer revurderes og tilpasses.

#### Gennemførelse

Ved opstart af projektet var fokus i denne arbejdsopgave i høj grad på kemisikkerhed og affaldshåndtering af brugte kemikalier. Da metoden allerede var udviklet i laboratoriet, og der har været udført omfattende sikkerhedsvurderinger og standard operating procedures (SOP'er) for alle trin i den udviklede metode, var der en god basis at arbejde videre på.



Undervejs opstod der imidlertid en udfordring med et af kemikalierne – solvent - til polyesteropløsning. Textile Change ApS har et stærkt fokus på at de organiske opløsningsmidler der arbejdes med, skal leve op til bestemte kriterier – herunder at de ikke må være mærket giftige for mennesker. Undervejs blev ét af de benyttede opløsningsmidler opdateret i den nyeste version af sikkerhedsdatabladet (SDS). Revurderingen af kemikaliets sikkerhed, indebar en tilføjelse af piktogrammet for "akut toksitet", og en H-sætning der medfører risiko for fertilitet/det ufødte barn. Det blev besluttet at denne faremærkning betød at Textile Change ApS ikke længere var villige til at arbejde med dette kemikalie, på trods af at det hidtil havde spillet en vigtig rolle. Derfor prioriterede Textile Change ApS at få udarbejdet en dybdegående arbejdsmiljø/risikovurdering af alternative solventer, som var kendt fra tidligere forsøg, gennemført forud for projektet. I samarbejde med Teknologisk Institut, blev alle solventer vurderet ud fra faremærkning og grænseværdier for arbejdsmiljø og der blev udfærdiget en rapport, til brug ved fremtidige beslutninger vedrørende kemisikkerhed. Resultatet af dette var at der blev fundet flere alternative solventer, hvilket var meget positivt i lyset af at den hidtil benyttede ikke længere var acceptabel.

Nøgleaspekter som instrumentering og Atmosphere Explosible (ATEX) sikkerhed, viste sig at være mere omfattende end først antaget. Dette blev derfor opprioriteret undervejs i projektet. Instrumenteringen blev omhyggeligt udarbejdet og konfigureret i samarbejde med Techvia A/S, for at opfylde ATEX-standarder og sikkerhedskrav. Dette inkluderede detaljerede overvejelser om klassificering af væsker og placering af udstyret for at overholde brandmyndighedernes krav. Grundet ATEX-klassificering af processen, blev det desuden påkrævet af brandmyndighederne i Vejle kommune, at der skulle udføres sikkerhedsberegninger af et eksternt konsulentfirma med specialiseret viden om dette. Beregningerne blev udført af TML Safety Engineering A/S og dannede grundlag for sikkerhedsrelaterede operationer og design for pilot-anlægget. Resultatet var en ATEX-kode for indersiden af maskineri, og en anden ATEX-kode for ydersiden – dette blev benyttet til design og indkøb af maskiner, pumper og instrumentering til anlægget.

Et udsnit af rapporten af TML Safety Engineering A/S er vist i TABEL 1. Fortrolige oplysninger er fjernet.

**TABEL 1.** Udsnit af rapport vedrørende ATEX udslipsberegninger for proces beskrevet af Textile Change ApS. Beregningerne er foretaget af TML Safety Engineering A/S for Textile Change ApS.

Variables for the location and the release					Determination of zone extent	Determination of zone type		
Location	Release source	Corrected vapour pressure (kPa)	Gas density at temperature (kg/m <sup>3</sup> )	Pool Area_p (m <sup>3</sup> )	Air speed at release source (m/s)	Zone radius (m)	Zone type	Conclusion
Inside the tent	Seals - Flanges	4,37	2,25	0,99	0,15	0,2	Zone 2	1 m zone 2 around release source with a sphere around release source to ground

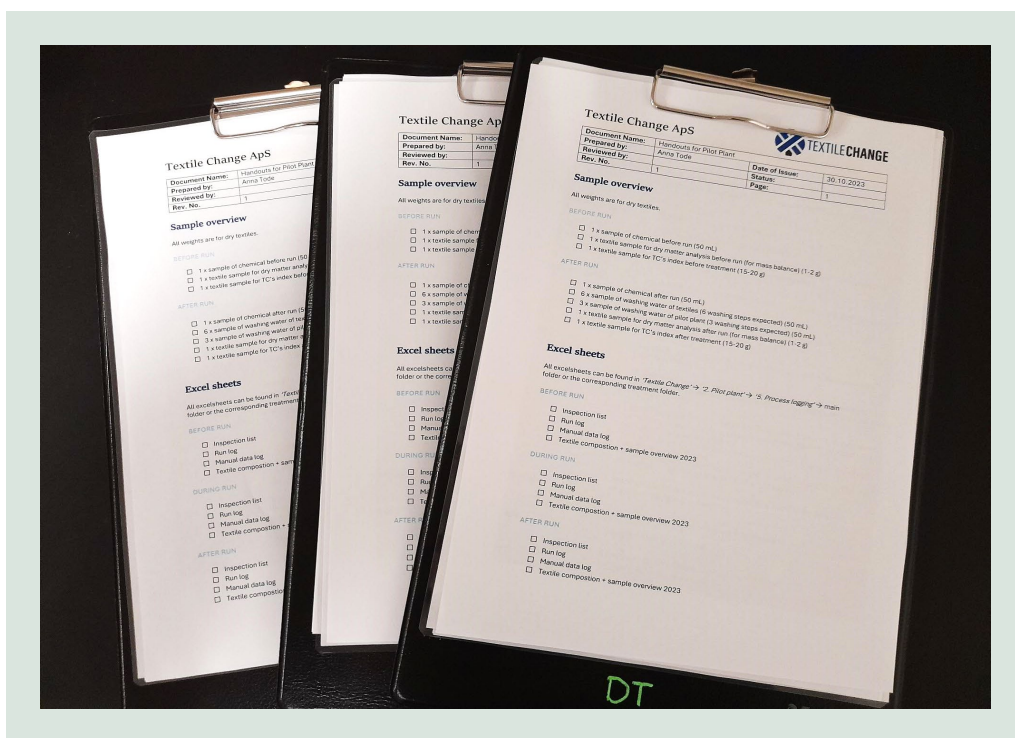
## Resultater

Resultatet af arbejdsplanke 1 er først og fremmest, at det er bekræftet i, at sikkerhed forsat skal være af højeste prioritet ved skalering af denne teknologi. Da der arbejdes med opvarmede organiske opløsningsmidler, var det nødvendigt at anlægget blev designet, placeret og driftet i overensstemmelse med Atmosphere Explosible (ATEX) standarder. Af hensyn til personsikkerhed, blev der desuden udarbejdet omfattende guides til alle arbejdsgange i, og omkring anlægget, inklusive personel protective equipment (PPE) og nødprocedurer.

Som resultat af denne arbejdsplanke, er det muligt at drifte pilot-anlægget under sikre forhold. Det er blevet godkendt til drift af brandmyndighederne i Vejle kommune, hvor anlægget står. Som en del af godkendelsesprocessen er der udarbejdet ATEX-udslips beregninger af konsulentvirksomheden TML Safety Engineering A/S. Da arbejdet vedrørende ATEX-sikkerhed viste sig at være langt mere omfattende end forventet, og samtidig viste sig at være fuldstændig centralt for at kunne gennemføre projektet og etablere pilot-anlægget, blev det besluttet at prioritere dette til fordel for at gennemføre en livs cyklus analyse ved projektets afslutning, hvilket oprindeligt var planlagt.

Anlægget er opsat i et specialbygget industritelt, og i samarbejde med byggemyndighederne i Vejle Kommune, er der fundet en placering for anlægget og industriteltet der overholder krav til personsikkerhed.

Der er udarbejdet en løsning for instrumentering og regulering af anlægget af Techvia A/S, hvilket betyder at anlægget kan opereres fra et eksternt maskinrum. Dele af de test-kørsler der laves på anlægget skal stadig udføres manuelt på anlægget. Her er der udarbejdet meget specifikke procedurer i form af "handout documents", hvor proceduren for hvert trin af det manuelle arbejde er udspecificeret med tjeklister (se FIGUR 3).



**FIGUR 3.** "Handout documents" på clipboards. Der er udarbejdet en version af disse til alle manuelle operationer på pilot-anlægget.

Arbejdet i denne arbejdsopgave har betydet at der er opbygget betydelig viden om sikkerhed, regulering og krav til denne type af proces. Det samme gælder for operationer der vedrører brug af pilot-anlægget såsom opbevaring af brugte og ubrugte kemikalier, affaldshåndtering, spildevandstilslutning, mv. Derudover blev der identificeret flere gode alternative solventer til polyesteropløsning, da det tidligere havde været benyttet, viste sig at være mere giftigt end der var angivet i tidligere versioner af dets sikkerhedsdatablad.

I projektet er der opnået et realistisk billede af, hvor højt alt sikkerhedsrelateret arbejdet skal prioriteres ved yderligere opskalering af processen, et vigtigt resultat for kommende arbejde med yderligere skalering af processen, der både vedrører planlægning af økonomi, tid og andre ressourcer der skal allokeres til dette.

## 5.2 Arbejdsopgave 2: Mekanisk Nedbrydning

### Formål

I arbejdsopgave 2, var fokus på mekanisk bearbejdning af tekstilerne – disse skulle findeles til mindre stykker inden den kemiske behandling. Ved projektets opstart, var det planlagt at udvikle et system med en shredder og en luftcyklon, fra bunden. Shredderen var nødvendig for laboratorieforsøg og generel proces-teknisk viden dikterede at tekstiler skulle findeles i korte fiberfragmenter, for at være egnet til processing i et større anlæg. Luftcyklonen var nødvendig for at fjerne de tunge dele fra det findelte materiale, såsom rester af knapper, lynlåse, mv. Formålet med arbejdsopgave 2, var dermed at udvikle og etablere en metode til den mekaniske klargøring af tekstilmaterialet, inden kemisk behandling.

### Gennemførelse

Den mekaniske klargøring af tekstilerne var vigtig af flere årsager. Først og fremmest ville store stykker tekstiler være praktisk talt umulige at pumpe rundt i rør, pumper, mv. Dette ville give store proces-tekniske udfordringer, og ikke være foreneligt med målet om at designe en kontinuerlig proces. Dertil skulle der fjernes knapper, lynlåse, mv.

En stor fordel ved kemisk genanvendelse – fremfor mekanisk genanvendelse hvor tekstiler opkradses til kortere fibre der genbruges direkte i nye garner – er, at det ikke er nødvendigt at bevare selve fiberstrukturen for at genanvende molekylerne - polymererne - som tekstilfibre består af. Det betyder, at selv hvis fibre bliver til bittesmå, fx 1 millimeter stykker, er polymererne stadig intakte, da de er meget, meget mindre – disse måles typisk i nanometer, og 1 nanometer er 1 million gange mindre end en millimeter.

Laboratorieforsøg, foretaget forud for projektet, havde derudover vist at effektiviteten af de kemiske behandlinger, i høj grad var afhængig af størrelsen på de findelte tekstilfibre, dvs. om de fx var 0,3x0,3 cm eller 5x5 cm. Det var tydeligt at kemikalierne havde en længere gennemtrængningstid for de store stykker og skulle arbejde sig "fra kanten og ind", dvs. at tekstilstykker på fx 5x5 cm, under affarvning blev mere affarvet rundt i kanten end på midten af stykket. Dette var ikke en udfordring for helt små stykker fiber på fx 0,5x0,5 cm. Derfor blev det undersøgt, hvornår stykkerne var små nok til ikke at lave dette problem. Der blev udført laboratorieforsøg for hhv. 0,5x0,5 cm, 1x1 cm 1,5x1,5 cm og 2x2 cm. Det blev vurderet herfra, at jo mindre stykker, jo bedre var den kemiske gennemtrængning og effektivitet i behandlingerne.

Tidligt i projektet, blev der skabt kontakt til virksomheden Eldan Recycling A/S, der leverer løsninger til genanvendelse af diverse materialer. De tilbød at hjælpe projektet, ved at assistere med udvikling af et design til nedbrydning af tekstilerne, samt adskillelse af knapper og lynlåse, mv. De tilbød i øvrigt at hjælpe med at finde tekstilmaterialer til test både i laboratorier og på det endelige pilot-anlæg. Til dette formål havde de allerede flere shredder-pilot-anlæg stående i deres faciliteter i Faaborg.

Til pilottest hos Eldan Recycling A/S, blev der indsamlet omkring 500 kg tekstil. Dette var en blanding af kasseret arbejdstøj indsamlet fra industrivaskerier, diverse genbrugsbutikker der havde frasorteret ødelagt tøj, tøj-brands, der havde affald fra f.eks. vareprøver til nye kollektioner, samt kasseret arbejdstøj fra forskellige virksomheder (kantiner, netværksdybdere, logistikvirksomheder, mv). Det var altså et bredt udvalg af testmaterialer. De indsamlede tekstiler blev manuelt sorteret i flg. fraktioner:

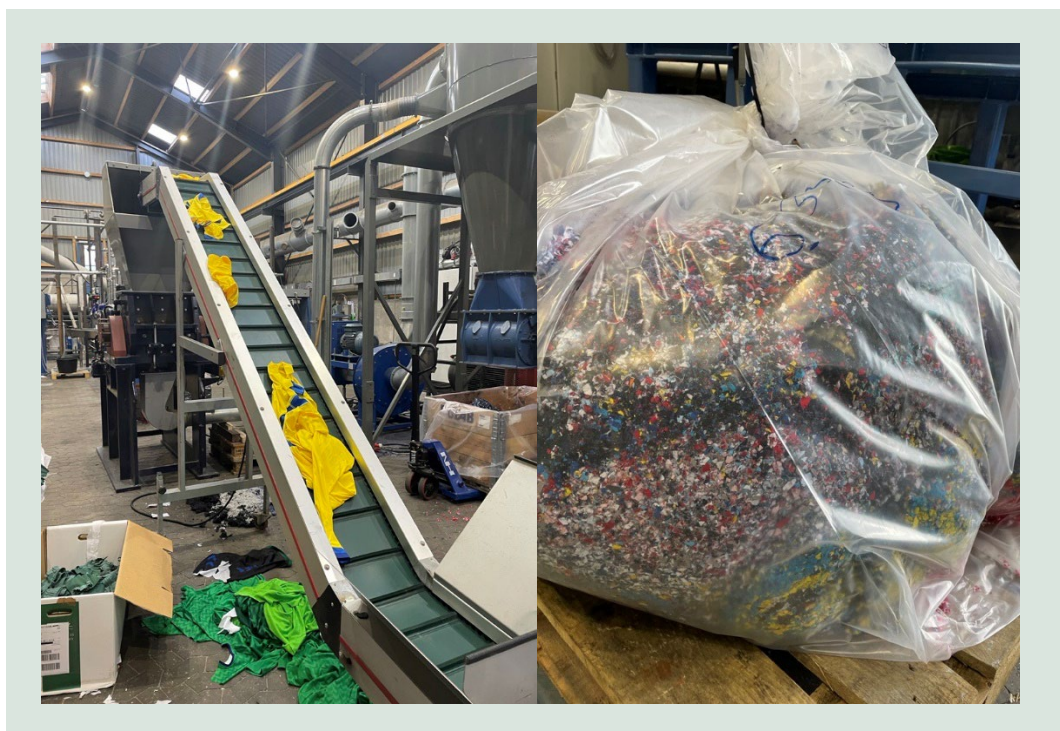
Polycotton (40-60% bomuld + 40/60% polyester), mix af vævet og strikket stof

100% polyester, mix af vævet og strikket stof

100% bomuld, vævet stof

100% bomuld strikket stof

På FIGUR 4 ses et billede af én af de pilotmaskiner der blev afprøvet hos Eldan Recycling A/S i Faaborg, samt en sæk med blandet, mekanisk klargjort materiale, til videre test hos Textile Change ApS i Vejle.



**FIGUR 4.** Hhv. pilotmaskine med conveyor belt og shedder, afprøvet hos Eldan Recycling A/S i Faaborg (venstre) og sæk med klargjort tekstil-test materiale (højre).

Der blev udført tests ved at shredde tekstiler på Eldan Reyclings pilot maskiner. Der blev afprøvet to forskellige typer "knive", i to forskellige maskiner for at finde den der fungerede bedst. På den maskine der blev vurderet at shredde tekstilerne bedst, blev indstillingerne justeret for at producere tekstiler i flere størrelser. Fra laboratoriet blev det vurderet at mindre stykker tekstiler opnåede den bedste affarvning, mv. Dette blev valideret ved at producere materialer af de ovenstående fraktioner i hhv. 6 mm og 16 mm. Laboratorieforsøg bekræftede at den mindre størrelse, 6 mm, opnåede de bedste resultater.

I pilottestene hos Eldan Recycling A/S blev det observeret, at der var stor forskel på hvordan tekstilerne opførte sig, afhængigt af fiberindholdet. Det tekstil der indeholdt polyester, støvede langt mindre, end det der ikke gjorde. Dette gjorde håndteringen langt lettere, og filterne blev meget mindre stoppet til. Dertil kom, at det rene bomuld i vævet stof, støvede langt mindre end det der kom fra strikket stof. I fremtiden vil dette ikke være adskilte fraktioner – Textile Change's teknologi er i stand til at håndtere alle ovenstående fraktioner på én gang, hvorfor de

vil blive blandet, og derfor også kan shredde sammen. Det er dog værdifuld viden, til at optimere på filtersystemet, der påkræves ved et fremtidigt anlæg, efterhånden som der genereres mere viden om, hvilke tekstiler der indsamles. Hvis en stor del af tekstilerne viser sig at være vævet bomuld, vil der fx være større krav til filtre, end hvis det meste er polycotton. Dette har desuden sikkerhedsmæssige komplikationer, da bomuldsstøv i sig selv kan være selvantændende og derfor udgør en sikkerhedsrisiko, der skal håndteres i en fremtidigt anlæg. Derudover vil en større mængde støv, alt andet lige skabe mere støv i en maskinhal, der skal shredde store mængder tekstil, og derfor kræve at operatører fx skal bære støvmasker.

Da det var muligt at benytte Eldan Recycling A/S's maskiner til klargøring af større mængder tekstiler til test på pilot-anlægget, blev det besluttet at Textile Change ApS, ikke selv ville bygge shredding mv., modsat den oprindelige plan for arbejdsplan 2. En vigtig milepæl i denne arbejdsplan var opnåelsen af effektiv trim-fjernelse, dvs. fjernelse af knapper og lynlåse. Det var desværre ikke muligt at efterprøve denne teknologi hos Eldan Recycling A/S, og derfor blev knapper og lynlåse fjernet manuelt inden shredding. Dog har Eldan Recycling A/S erfaring med netop denne type proces, og var derfor i stand til at tegne et færdigt design og give et fuldt tilbud på maskiner til shredding, inkl. fjernelse af trim, til brug ved et fremtidigt anlæg, som Textile Change ApS kunne bruge som pejlemærke til beregninger for skalering.

Muligvis bliver ovenstående overvejelser dog slet ikke aktuelle for Textile Change, da der i projektperioden er genereret kontakt til flere sorteringsvirksomheder for affaldstekstiler, blandt andet NewRetex (DK), som Textile Change ApS har etableret et konstruktivt samarbejde med. I dialog med NewRetex og andre sorteringsvirksomheder i udlandet, har det vist sig at disse sorteringsvirksomheder alle har faste planer om, eller overvejer, at etablere en shredding- og trim-fjernelses proces, for de tekstiler de sorterer til kemisk genanvendelse, inden de sender sorterede materialer videre. I fremtiden planlægger Textile Change ApS at købe inputmateriale til produktion af genanvendte råmaterialer af disse sorteringsvirksomheder, hvilket kan betyde at Textile Change ApS i fremtiden, med al sandsynlighed, ikke vil stå for den mekaniske klargøring af materialerne. Resultatet af denne arbejdsplan er derfor primært at Textile Change ApS er nået tættere på at kende kravspecifikationer til disse sorteringsvirksomheder, for det materiale som er egnet til processen. Derudover er der genereret foreløbige erfaringer rent teknologisk, som Textile Change ApS, Eldan Recycling A/S og diverse sorteringsvirksomheder kan udnytte til planlægning af aktiviteter indenfor klargøring af materiale til kemisk genanvendelse

## **Resultater**

Sammenfattende har arbejdsplan 2 opnået betydelige fremskridt inden for mekanisk klargøring af tekstiler til kemisk genanvendelse.

I arbejdsplan 2 havde projektet som formål at udvikle en mekanisk nedbrydningsmetode til tekstiler med henblik på at forberede dem til kemisk behandling. Dette blev opnået ved at samarbejde med Eldan Recycling A/S, der stillede shredder-pilot-anlæg til rådighed til test. Shredderen blev finjusteret med hensyn til knivvalg, omdrejningshastighed og materialestrøm for at opnå effektiv trim-fjernelse med minimalt spild.

En vigtig opdagelse var, at mindre stykker tekstiler førte til en mere effektiv kemisk behandling. Der blev udført pilottest med forskellige tekstilfraktioner og forskellige størrelser på det findelte materiale for at evaluere kemisk gennemtrængning og behandlingseffektivitet. Resultaterne viste, at mindre stykker gav bedre resultater.

Samarbejdet med Eldan Recycling sparede tid og ressourcer og bidrog til projektets succes. Der blev opnået en forståelse af prisniveauet for etablering og drift af mekaniske processer til tekstilnedbrydning, hvilket har bidraget til økonomiske vurderinger af projektet. Eldan Recy-

cling A/S lavede, ud fra testene, et færdigt design og tilbud på et større anlæg med en støjreducerende kabine (reduceret til ca. 85 dB(a)), med to store granulationer og mulighed for kapacitetsjusteringer. Derudover indeholdt det maskiner til frasortering af lynlåse og knapper. Den maksimale kapacitet på dette design ville være 2,5 tons/time, hvorfor det principielt ville være egnet i størrelse til Textile Change's planer, som at etablere et demonstrations-anlæg der skal processere omkring 1,4 tons/time.

Desuden har arbejds pakken bidraget til dialog mellem Textile Change ApS og diverse sorteringsvirksomheder, da Textile Change ApS har kunnet videregive de erfaringer der er skabt, og dette har dannet fundamentet for at diskutere hvordan en fremtidig værdikæde for kemisk tekstilgenanvendelse kan bygges op – sorteringsvirksomheder og genanvendelsesvirksomheder imellem. Dette har potentielt bredere implikationer, da andre genanvendelses- og sorteringsvirksomheder kan drage fordel af erfaring og værdikæde udviklingen fra dette projekt.

### **5.3 Arbejds pakke 3: Kemisk behandling og separation af bomuld og polyester**

#### **Formål**

Arbejds pakke 3 havde til formål at udvikle og implementere en effektiv kemisk behandlings- og separationsproces med henblik på at adskille bomuld og polyester fra neddelte tekstiler. Dette omfattede også at udforske og integrere optimerede metoder, herunder omrøringsløsninger, kemikaliebehandling og vaskemetoder, der kunne opfylde projektets målsætninger.

#### **Gennemførelse**

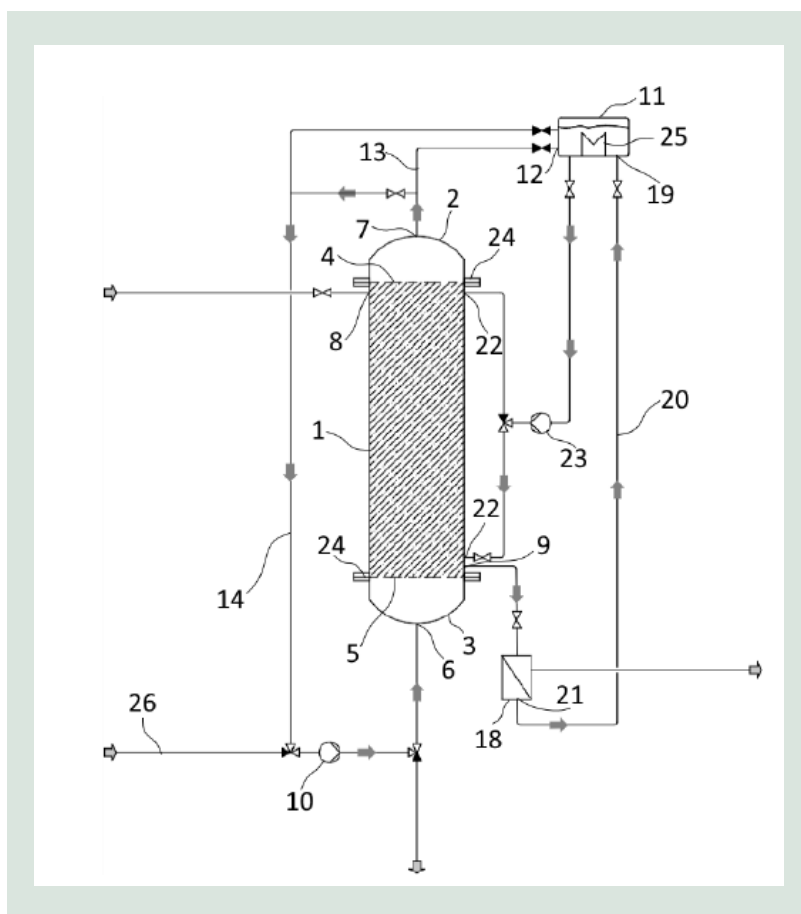
Projektet gjorde sig følgende erfaringer og opnåede følgende resultater i løbet af Arbejds pakke 3:

I denne arbejds pakke, skulle der findes en effektiv omrøringsmetode, hvilket var bestemt i laboratoriet at være en af de afgørende faktorer for god gennemtrængning og dermed effektivitet af kemikalier i processen. Efter at have eksperimenteret med forskellige omrøringsmetoder blev det klart, at traditionelle omrørte tanke ikke var velegnede til projektet. Almindelige omrørte tanke udviste begrænset effektivitet ved omrøring af fibermaterialet, hvilket betød at det var svært at opnå tilstrækkelig kontaktudveksling mellem væske og materiale, og dermed god udnyttelse af kemikalierne.

Andre problemer opstod, herunder dannelse af "reb" og klumper omkring omrøreren, hvilket gjorde det besværligt at tømme fibermaterialet efterfølgende, og lavede større klumper af tekstiler der varierede i farven efter affarvning. Dertil var det kun specialfremstillede, dyre pumper der var i stand til at pumpe fibermaterialet rundt i systemet med en tilfredsstillende hastighed og uden uønskede kompressionsdannelse i rørstykkerne efter pumperne. Det blev vurderet at risikoen for komprimering af fibre utilsigtede steder i anlægget var høj og kunne skabe bloka-der og udgøre kvalitets- og sikkerhedsrisici. Dette førte til beslutningen om at undersøge og implementere alternative omrøringsmetoder. Af flere årsager, var ønsket at udvikle en mekanisme, hvor der ikke var roterende dele; En af årsagerne var, at dette ville være en måde at undgå dannelse af klumper omkring de roterende dele, men også at det ville minimere risikoen for opbyggelse af statisk elektricitet, som ville udgøre en brandrisiko ved brug af opvarmede solventer. Undervejs i projektet blev der således foretaget en væsentlig designændring – fra at have brugt almindelige reaktor tanke med omrøring, blev der designet en vertikal reaktor med højt opadgående væske flow samt langsomt nedadgående tekstilt flow. Denne opfindelse viste sig at være i stand til at skabe et tilpas turbulent flow inde i kolonnen til at sikre god omrøring kun ved cirkulering af væsken, og dermed væsentligt bedre udnyttelse af kemikalierne. Samtidig løste dette design problemet med at pumpe fibre rundt i systemet uden kompressionsmønsterdannelse, da reaktordesignet inkluderede en udtømningsmekanisme, hvor der ikke var behov for fiberpassage igennem pumper, men hvor fibre frit kunne flyde ud af kolonnen



ved tømning med højt turbulent flow i bunden af kolonnen. Denne nye kolonne første til en patentering (reference: P067186WO, se FIGUR 5).



**FIGUR 5.** Principskitse over den nye kolonne opfindelse, der muliggør effektiv udnyttelse af kemikalier og lettere håndtering af findelste tekstilfibre i et anlæg, uden risiko for dannelse af klumper.

Med dette design blev det muligt at opnå et vigtigt mål for denne arbejdsopgave: En optimering af hvor høj koncentration der kunne opnås af tekstilfibre i solvent. Her var udfordringen at de mekanisk bearbejdede tekstilfibre havde en meget høj volumen-masse ratio – de fyldte så meget at det rent lavpraktisk ikke var muligt at have ret mange kg i en reaktor ad gangen, inden de havde suget al væsken. Erfaringen var, at tekstilerne kunne opsuge omkring 2-4 gange deres egen vægt i tilsat kemiholdig væske, dvs. at materialet i mange tilfælde virkede "tørt" eller i det mindste som en tyk, våd "slurry" selv ved et indhold på 50-75% væske i blandingen og tilsvarende 50-25% tekstilfibre i blandingen. Det blev vurderet at det var vigtigt at anlægget kunne holde tekstilerne "flydende", for at få en god bevægelse af materiale igennem et anlæg. Projektets oprindelige målsætning, var en koncentration af tekstilfibre på 5-15%. Her blev det i testfasen af det samlede anlæg vurderet at den optimale koncentration var omkring 5%, for det bedst muligt væskeflow. Dette påvirker ikke forbruget af vand/solvent, da det viste sig at disse recirkuleres, og der derfor ikke vil være et større nettoforbrug, blot en større mængde væske i cirkulation. Herunder blev tekstiler effektivt affarvet med en koncentration på 5% tekstil i solvent, som det var målet i projektansøgningen. Samarbejde med en større aktør inden for pulp-industrien bekræftede, at denne koncentration var i overensstemmelse med standard procesudstyr og pumper, der er egnede til skalering af processen. Dette øgede projektets skalerbarhed og gjorde det muligt at tage i betragtning allerede eksisterende maskiner på markedet.



a)



b)

**FIGUR 6.** (a) Før og efterbilleder af polyesterholdige tekstiler, der er forbehandlet og affarvet på det færdige pilot-anlægget – derefter opløst og udfældet til genanvendeligt polyesterpulver. (b) Her ses den solvent der er brugt til at affarve tekstilet i (a) – det er tydeligt at den er mørk, hvilket skyldes farvestoffer, der er trykket ud af tekstilerne. Inden brug var solventen klar som vand.

En praktisk vaskemetode blev udviklet ved brug af 5 store polyethylen tanke, med det formål at simulere en modstrømsvask. Dette viste sig at være den foretrukne metode til fremtidig skalering og bidrog til at minimere vandforbruget i processen. Vaskeprocesser blev yderligere adresseret i det parallelle projekt "cirkulær ressourceoptimering ved separation af blandingstekstiler", hvorigennem der er etableret samarbejde med en større aktør indenfor pulp-industrien, der har stor ekspertise inden for vask af pulp og producerer industrielt udstyr til dette. Samarbejdet her gør det muligt at optimere vaskemetoder og gøre dem compatible med standardindustriudstyr, hvilket øger processens skalerbarhed.

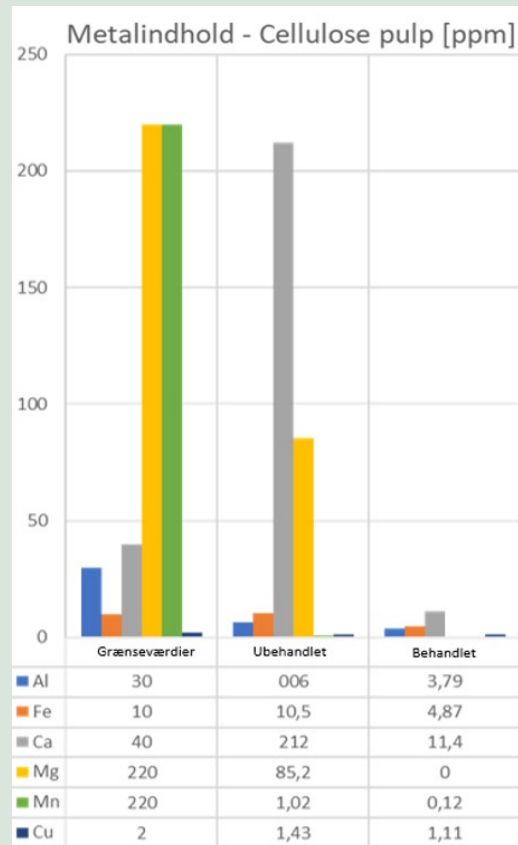


Ved opstart af dette projekt, var planen at der skulle etableres mulighed for fiberspinding in-ternt i projektet. Det viste sig imidlertid at være en langt mere fordelagtig forretningsmodel, at producere genanvendte råmaterialer, af affaldstekstilerne, som siden sælges til fiberspinderier. Der er virksomheder der er meget specialiseret i dette, og værdiforøgelsen fra råmateriale til fiber, kan ikke opveje omkostningerne ved at etablere dette led i værdikæden som en del af projektet – dette har både skabt bedre fokus i projektet, da der i forvejen er to produkter der udvikles samtidig – polyester og bomuld, fra polycotton blends, hvilket i forvejen har krævet et stort udviklingsarbejde. Denne beslutning har til gengæld dannet basis for at kontakte fiberspinderier, der vil være kommende kunder for Textile Change's produkter.

I arbejdsplanen 3 indgik et kvalitetsmæssigt aspekt, hvor det var tiltænkt at der skulle produceres en større mængde – fx 5 kg - cellulosepulp på et tidligt stadie, som derefter skulle spindes til fibre. Resultaterne af dette skulle medtages til fremtidige arbejdsplaner, så det samlede anlæg kunne optimeres til at producere den bedst muligt cellulosefibre-kvalitet. Det var dog ikke muligt at producere disse mængder cellulosepulp i denne tidlige arbejdsplan. Det blev vurderet at der var for stor sikkerhedsrisiko, fordi det ville kræve arbejde i enkeltstående tanke som skulle indeholde store kemikalie volumener. Mange forholdsregler - ATEX-sikkerhed, instrumentering og regulering – kunne kun etableres på et færdigt anlæg. I stedet blev fokus at klar-gøre relevante kvalitetsanalyse-metoder til senere brug, når anlægget var færdigt. Da der ikke blev etableret fiberspinding i løbet af projektet, var testspinning af MMCF ikke muligt i projek-tet. Derfor blev der, i samarbejde med fiberproducenter af MMCF, fastlagt retningslinjer for de nødvendige analyser på pulpen, herunder intrinsisk viskositet, der er et mål for længden og kvaliteten af polymererne i råmateriale, samt måling af metalindhold (især jern og aluminium) og mineral indhold – særligt med fokus på fjernelse af calcium og magnesiumindhold.

Forskellige prøver fra laboratoriet blev analyseret vha. ICP/MS-analyse (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry), som er en avanceret metode til kvantitativ bestemmelse af speci-fikke grundstoffer i prøver. I denne analysemetode anvendes en teknik, hvor en prøve indføres i en plasmaflamme og ioniseres ved hjælp af elektriske felter. Herefter måles masse-til-lad-ningsforholdet ( $m/z$ ) for de ioniserede partikler, hvilket gør det muligt at identificere og kvantifi-cere de specifikke grundstoffer i prøven.

Siden projektets start, blev det identificeret at tilføjelsen af flere forbehandling (se FIGUR 2, trin 2), kunne sikre at materialerne opfyldte alle kriterier opsat af fiberspinderierne på nuvæ-rende stadie. Da der ikke var sat yderligere ressourcer af til at arbejde med forbehandling i dette projekt, indgik det som en del af et senere ansøgt MUDP projekt "cirkulær ressource op-timering ved separation af blandingstekstiler", der blev bevilliget og endte med at køre parallelt med en del af dette projekt. Det lave metal og mineral indhold, var en god indikation for at fi-berspinding ville være muligt for cellulose-pulpen (se FIGUR 7).



**FIGUR 7.** Her ses resultaterne af en ICP/MS-analyse for cellulosepulp, lavet af affaldstekstil. Grænseværdierne er angivet for Aluminium (30 ppm), Jern (10 ppm), Calcium (40 ppm), Magnesium (220 ppm), Mangan (220 ppm) og Kobber (2 ppm). Værdierne for disse er analyseret for hhv. en ubehandlet prøve af affaldstekstil og samme prøve, der har gennemgået genanvendelsesmetoden i laboratoriet.

#### Resultater

I arbejdsplanen 3, som fokuserede på kemisk behandling og separation af bomuld og polyester, blev følgende vigtige resultater opnået:

- Omrøringsmetoder og reaktordesign:** I løbet af arbejdsplanen 3 blev det konstateret, at traditionelle omrørte tanke ikke var velegnede til projektet. Disse tanke viste sig at have begrænset effektivitet ved omrøring af fibermaterialet, hvilket gjorde det vanskeligt at opnå tilstrækkelig kontakt mellem væske og materiale. Desuden resulterede omrøringen i dannelsen af "reb" og klumper omkring omrøreren, hvilket besværliggjorde tømningen af fibermaterialet og forårsagede farvevariationer efter affarvning. For at løse disse udfordringer blev der designet en innovativ vertikal reaktor, der muliggjorde effektiv omrøring og tømning uden behov for dyre specialpumper. Dette reaktordesign blev patenteret og forventes at forbedre processens effektivitet.
- Optimal koncentration af tekstilfibre:** Det blev konstateret, at den optimale koncentration af tekstilfibre i solvent var omkring 5%. Dette tillod effektiv affarvning og opfyldte projektets målsætninger. Samarbejdet med en større aktør inden for pulpindustrien bekræftede, at denne koncentration var kompatibel med standard procesudstyr og pumper, hvilket øgede processens skalérbarhed.

- **Praktisk vaskemetode:** En praktisk vaskemetode blev udviklet ved hjælp af store polyethylen tanke, hvilket muliggjorde en simulering af modstrømsvask. Denne metode bidrog til at minimere vandforbruget i processen og gjorde det muligt at optimere vaskeprocessen med standardindustriudstyr.
- **Ændret forretningsmodel:** Projektet besluttede at ændre forretningsmodellen og fokusere på produktion af genanvendte råmaterialer frem for intern fiberspinding. Dette åbnede muligheder for samarbejde med fiberspinderier som fremtidige kunder.
- **Analyse af cellulosepulp:** På trods af planen om at producere cellulosepulp og foretage testspinning, var dette ikke muligt i arbejdsplanen 3. I stedet blev retningslinjer fastlagt for de nødvendige analyser af pulpen, inklusive intrinsisk viskositet og målinger af metal- og mineralindhold ved hjælp af avanceret ICP/MS-analyse (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry).

Resultaterne fra arbejdsplanen 3 har bidraget til at optimere processen og åbne muligheder for fremtidig fiberspinding og produktudvikling.

## 5.4 Arbejdsplanen 4: Oprensning af polyester

### Formål

Arbejdsplanen 4 havde som sit primære formål at udvikle en effektiv metode til oprensning og genanvendelse af polyesterfraktionen. Dette var afgørende for at sikre, at mest muligt af solventen til polyestergenbrug kunne recirkuleres i processen - samtidig med at den resulterende polyester skulle renses, før den gik videre til kvalitetskontrol. Målet var at opnå fuldstændig separation af solvent og polyester samt høj renhed af den oprensede polyester.

### Gennemførelse

Der blev indledt et samarbejde om gennemførelsen af arbejdsplanen med en ekstern maskinproducent og ingeniørvirksomhed. Samarbejdet indbefattede analyser og tests udført i deres laboratorier i Tyskland, hvor de bidrog med vigtige designforslag og anbefalinger til de nødvendige separator-maskiner. En køreplan blev fastlagt for implementeringen af dekanteringscentrifuger i det fremtidige design.

Der blev udført spin-tests for at validere effektiviteten af separationstrinene og bekræfte, at den foreslåede metode kunne opnå høj renhed af polyesterfraktionen. Det blev identificeret, at de opvarmede solventer stillede betydelige krav til ATEX-standarder, som beskrevet under afsnittet om Arbejdsplanen 1.

### Resultater

Arbejdsplanen 4 har resulteret i en vellykket udvikling af en metode til effektiv oprensning af polyesterfraktionen. Samarbejdet med en ekstern maskinproducent og ingeniørvirksomhed var afgørende for at opnå de ønskede resultater. Designforslag og køreplanen for dekanteringscentrifuger vil danne grundlag for det fremtidige design og implementering, ved skalering af processen.

Den gennemførte spin-test bekræftede, at separationstrinene er effektive, og at høj renhed af polyesterfraktionen kan opnås. Arbejdsplanen har understreget den betydelige udfordring, som brugen af opvarmede solventer udgør med hensyn til ATEX-standarder. For at tackle dette vil fremtidige procesdesigns prioritere at placere så meget udstyr som muligt uden for ATEX-zonen, hvilket vil reducere omkostninger og styrke anlæggets generelle sikkerhed og levedygtighed.

## 5.5 Arbejdspakke 5: Udvinning af farvestoffer fra solvent

### Formål

Formålet med arbejdspakke 5 var at udvikle en effektiv proces til udvinning og oprensning af farvestoffer fra det anvendte solvent. Denne proces var afgørende for at muliggøre genanvendelsen af solventet i den kemiske behandling og for at minimere affaldsstrømmen. Konkret involverede arbejdspakken etablering af nødvendigt udstyr som crossflow filter og vasker. Målet var at opnå en høj grad af separation af farvestoffer og urenheder fra solventet.

### Gennemførelse

Arbejdspakke 5 omfattede gennemførelse af initiale forsøg på oprensning af farvestoffer fra solventet ved hjælp af crossflow filtrering. Vi gennemførte disse forsøg, og det blev tydeligt, at membranfiltrering med keramiske membraner viste lovende resultater. Samtidig blev destillation af farvestoffer testet på laboratorieniveau. Både crossflow filtrering og destillation viste sig at være langt mere ressourcekrævende end først antaget og krævede yderligere undersøgelser og optimering, hvilket er blevet adresseret i det parallelle MUDP-projekt "cirkulær ressourceoptimering ved separation af blandingstekstiler."

### Resultater

Crossflow filtrering viste lovende resultater, men udfordringer skal fortsat adresseres, hvilket vil blive gjort i det parallelle MUDP-projekt. Det blev dog konstateret, at det ikke var realistisk at opnå en oprensning af farvestoffer og pigmenter, der ville muliggøre anden anvendelse end at denne strøm skal opkoncentreres – for at genanvende mest mulig solvent – og resten bortskaffes på forsvarlig vis som kemisk affald.

## 5.6 Arbejdspakke 6: Sammenkobling af systemer

### Formål

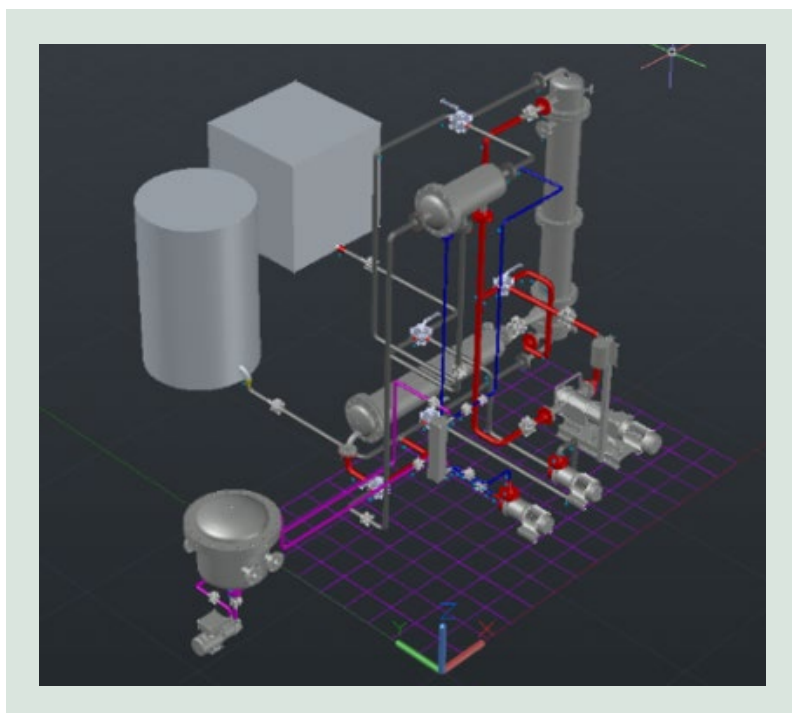
Arbejdspakke 6 fokuserede på at integrere og optimere det samlede procesdesign og pilot-anlægget, som involverede delsystemer fra arbejdspakkerne 2, 3, 4 og 5. Formålet var at skabe en mere effektiv, samlet proces, hvor de tekniske overlap mellem arbejdspakkerne kunne udnyttes til fordel for projektet. Ved at kombinere de forskellige arbejdspakker i ét setup, skulle der opnås en betydelig ressourceeffektivitet og økonomisk fordel i anlægget.

### Gennemførelse

Arbejdet i arbejdspakke 6 omfattede en omfattende procesoptimering ved hjælp af computertegninger, simuleringer og beregninger. Erfaringer fra de tidligere arbejdspakker blev alle taget i betragtning. Det samlede anlæg blev i høj grad bygget op omkring "kolonnen" udviklet i arbejdspakke 3.

Undervejs i arbejdet i arbejdspakke 3 og 4 viste det sig ofte praktisk umuligt ikke at have den sammenkoblede proces i tankerne samtidig, da der var mange tekniske overlap vedrørende udstyr, rørføring mv. Der viste sig en stor fordel i disse overlap, da det var muligt at strømline flere processer, så det samme udstyr kunne bruges på flere måder. Oprindeligt var arbejdspakkerne opdelt som separate "afsnit" af vores samlede anlæg. Det procesdesign, der blev udviklet undervejs i projektet, havde mulighed for at udføre flere processer i samme maskiner, ved at justere procesbetingelser, ændre på temperaturer og konfiguration af ventiler og pumper. Omdrejningspunktet for denne løsning var kolonnedesignet udarbejdet i arbejdspakke 3, som både var egnet til forbehandling, affarvning med solventer og ét sæt procesbetingelser, samt til opløsning af polyester og adskillelse af dette. Dette var særligt fordelagtigt, da der undervejs i projektet var blevet identificeret en forbedring af blandt andet fjernelse af metaller igennem tilføjelse af forskellige forbehandlingsprocesser (som beskrevet under afsnittet om arbejdspakke 3) – og disse processer nu også kunne udføres i samme anlægsdesign.

Der blev udført et omfattende arbejde med optimering af procesdesignet ud fra ovenstående betragtninger. Det pilot-anlæg, der blev bygget, blev set som ét modul, der kunne køre ét trin af den metode, der var udviklet af Textile Change ApS i laboratoriet. Anlægget blev designet til at kunne bygges om til en kontinuerlig proces, men det blev besluttet at starte med at arbejde på det som batch proces, indtil teamet var blevet velbevandret i at prøve alle de forskellige processer på det. Princippet var derfor, at anlægget ville kunne fungere som ét modul, og for at køre to af trinene i træk som kontinuerlig proces, kunne de let kobles sammen og sættes i forlængelse af hinanden – det samme kunne gøres for at køre de 5 delprocesser (se FIGUR 8). Dette krævede, at kemikalier var i et lukket kredsløb for hver af disse delprocesser, hvilket passede fint med, at der i forvejen var højt fokus på at oprense og recirkulere de enkelte kemikaliestrømme, hvilket der blev arbejdet videre på i det parallelle MUDP-projekt "Cirkulær ressourceoptimering ved separation af blandingsmaterialer."



**FIGUR 8.** Her ses en 3D tegning af ét "modul". Flere af disse ville let kunne kobles i en serie, og lave flere forskellige trin, hvor de enkelte kemikaliestrømme kunne holdes i hvert deres lukkede kredsløb.

Ved projektets start var det planlagt, at alle delsystemer fra arbejdspakkerne 2, 3, 4 og 5 skulle sammenkobles til en kontinuerlig proces med en kapacitet på 180 kg tekstil pr. time. Det blev imidlertid besluttet at ændre kapaciteten til 5-15 kg pr. testkørsel i stedet af flere grunde. Først og fremmest blev det vurderet, at denne mængde ville være tilstrækkelig til at validere relevante parametre på dette udviklingsstadium, som kunne danne basis for skaleringsberegninger og kvalitetsbestemmelse. Derudover ville det være en tilstrækkelig mængde til at imødekomme den mængde, som kommende kunder – fiberproducenter – typisk vil have behov for at kunne lave omfattende pilotskala fiber-spindingstest. Dertil kommer en risikominimering, hvor skiftet reducerer risikoen ved store fejl eller problemer under drift. Ændringen i kapacitet kan også bidrage til at lette overholdelsen af sikkerhedsstandarder og reguleringer som ATEX og godkendelse af relevante myndigheder til at køre test, da de mindre volumener vil være mere håndterbare i tilfælde af uheld.

Beslutningen om at nedjustere kapaciteten for anlægget, viste sig at være gavnlig på flere måder. I projektperioden blev der skabt kontakt til en af verdens førende virksomheder til etable-

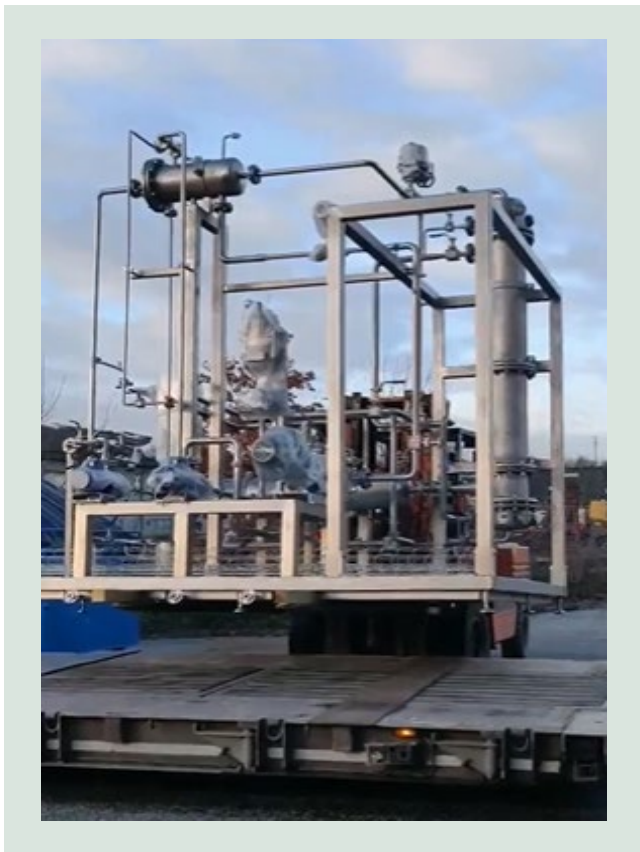
ring af fuldskala procesanlæg, der er specialiseret i etablering af anlæg i pulp-industrien og tidligere har bygget fuldskala-anlæg til tekstil genanvendelse. Her blev etableret en konstruktiv dialog om, hvilke skaleringsstrin der ville være mest optimalt, ved denne type teknologi. Resultatet af dette var en beslutning om at indføre planen om først at etablere et demonstrationsanlæg med en kapacitet på 500 tons/år og dernæst at skalere til et fuldskala-anlæg med en kapacitet på 50-100,000 tons/år. Et skaleringsstrin, direkte fra en batch kapacitet på 5-15 kg per batch og til 50-100,000 tons/år ville være et uacceptabelt stort skridt, hvorimod et demonstrationsanlæg på 500 tons/år vil være en passende størrelse til at generere repræsentative data og præcise skaleringsberegninger til et 50-100,000 tons fuldskala-anlæg, både for etablering (CAPEX) og faktiske driftsomkostninger (OPEX), samt give mulighed for realistiske test af maskiners holdbarhed i processen. Risikoen for fejltagelser og dyre problemer under opskalering minimeres. Desuden vil et mindre anlæg lette overholdelse af myndighedsreguleringer og give mulighed for at sikre godkendelser før opskalering. Et anlæg på 500 tons/årligt vil være tilstrækkeligt til at muliggøre produktion og etablere salgsaftaler, som vil være afgørende i kapitalrejsning til etablering af et fuldskala-anlæg.

Da pilot-anlægget var designet færdigt, blev det bygget i samarbejde med ProUnit Frames ApS i Randers. Nedenfor er vist et udsnit af billeder undervejs i denne fase (se FIGUR 9).



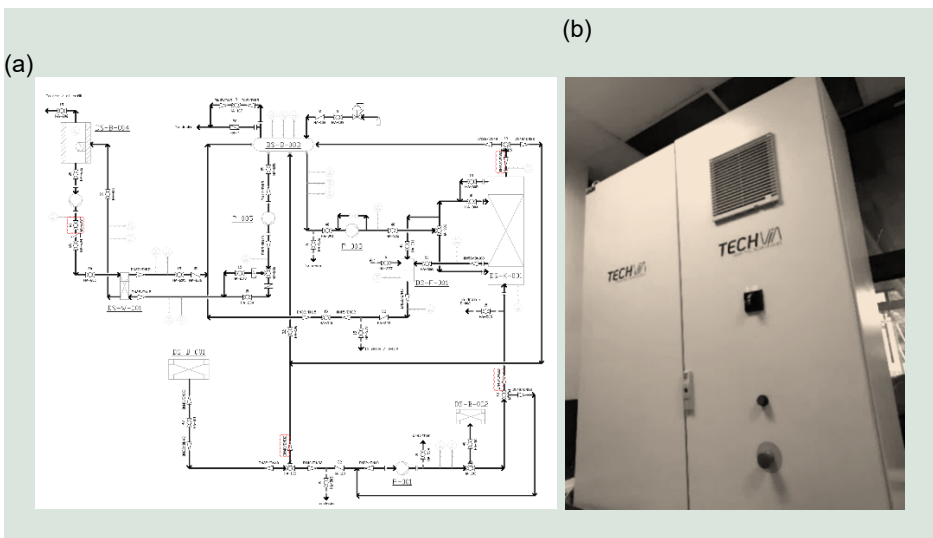
**FIGUR 9.** Fotos taget undervejs i udarbejdelse og samling af pilot-anlæg hos ProUnit Frames ApS.

En stor fordel ved det nye anlægsdesign er øget større fleksibilitet. Anlægget blev langt mere komprimeret end det tidligere design, da den vertikale reaktor muliggør bedre kemikalieudnyttelse og derfor behov for mindre kemikalievolumen for at opnå samme resultat. Derfor kan det flyttes på en lastbil, som vist på FIGUR 10.



**FIGUR 10.** Pilot-anlægget efter samling. Det kompakte design betyder at det kan flyttes på en lastbil, på én ramme.

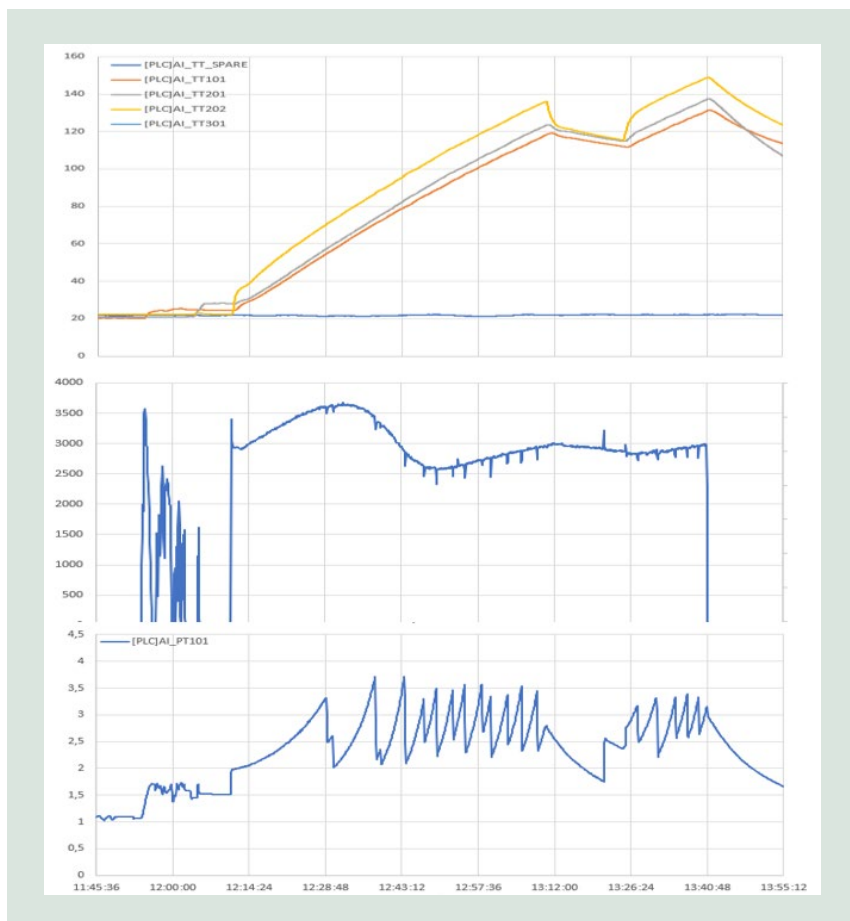
Instrumentering og regulering blev designet og udført i samarbejde med Techvia A/S. På FIGUR 11 (a) ses et skematisk overblik (P&ID) over anlæggets instrumentering og på FIGUR 11 (b) et billede af PLC styringsenhed hvorfra selv samme instrumentering kan monitoreres og anlægget kan kontrolleres under testkørsler.



**FIGUR 11.** (a) P&ID Diagram som viser instrumentering og regulering for pilot-anlægget til etablering ved Techvia A/S. (b) PLC styring installeret på Textile Change ApS kontor i Vejle, hvorfra pilot-anlægget kan monitoreres og styres.



Der blev udført iterative test af anlægget efterhånden som det blev samlet. Her blev test i første omgang foretaget med vand (ikke kemikalier), men med repræsentative tekstilfraktioner, neddelte ved Eldan Recycling A/S. Den primære funktion af disse tests var at vurdere, om de enkelte dele af anlægget fungerede med henblik på flow, opvarmning, fiber kompression, fiber udtømning, osv. FIGUR 12 viser eksempler på datalogning fra testkørsler på pilot-anlægget.



**FIGUR 12.** Dataudtræk fra PLC SCADA Software, installeret af Techvia A/S. Her ses logning af temperaturmåling øverst, flowmåling i midten og trykmåling nederst. Her blev det forsøgt at stressteste systemet for udsving i tryk, over en periode på ca. 2 timer. Dette blev gjort ved manuelt at øge trykket, hvorefter systemet var i stand til at trykkudligne til under 3bar(g).

Et vigtigt element var også at validere, at der opstod tilstrækkelig turbulens i bunden af "kolonnen" – dette var afgørende for at få optimal kemikalieudnyttelse. Her blev der foretaget en vandtest, hvor kolonnen blev pakket med to separate fraktioner; 5 kg helt sorte fibermaterialer, som blev placeret nederst i kolonnen, og 5 kg helt hvide, der blev placeret oven på den sorte fraktion. Vandtestens formål var at undersøge, om disse to fraktioner ville blive transporteret ud af kolonnen én ad gangen som meget afgrænsende sorte og hvide fraktioner, eller om de ville blive blandet undervejs – sidstnævnte ville være en succesfuld test. Her blev det observeret, at tekstilerne var blandet efter tømning, hvilket var et positivt resultat (se FIGUR 13).





**FIGUR 13.** Her ses at de to farver tekstil der er testet er blandet grundigt, hvilket validerer at der er tilstrækkelig turbulentens i bunden af kolonnen og dermed god omrøring.

Der blev foretaget flere modifikationer anlægget i testperioden. Blandt andet blev det observeret ved tømning af anlægget, at det ikke var hele væskevolumen i anlægget, der kunne tømmes ud efter testkørsler. Dette tydede på, at der var 'liquid-pockets' forskellige steder i anlægget. Der blev derfor foretaget ændringer således, at der er flere dræn de steder hvor væsken samles. Derudover en procedure indført, hvor små væskerester der eventuelt måtte være tilbage efter dræning, tømmes yderligere ved hjælp af trykluft. Til et fremtidigt anlæg vil det være relevant at tilte rørene således, at væsken løber ned igennem anlægget og i retningen af drænet ved tømningen.

Det var angivet som en milepæl for arbejdsplan 6 i projektansøgningen, at der efter succesfuld, kontinuert testkørsel i 2 timer uden komplikationer, ville der være opnået "Proof of technology", og at spildprodukter fra testkørsler er regenereret eller bortskaffet. Undervejs i projektet er der opstået nye områder, der skal arbejdes videre med, for at der kan konkluderes et endeligt "Proof of technology." Det vurderes dog, at de fremskridt, der er gjort med det nuværende pilot-anlæg, der i øvrigt er kørt mere end 2 timer mange gange med forskellige testmaterialer, er et uvurderligt skridt på vejen mod "Proof of technology."

## Resultater

Arbejdsplan 6 havde som hovedformål at integrere og optimere det samlede procesdesign og pilot-anlægget ved at kombinere delsystemer fra arbejdsplanerne 2, 3, 4 og 5. Der blev opnået en fleksibel proces, hvor tekniske overlap mellem arbejdsplanerne kunne udnyttes til fordel for projektet. Her er en opsummering af de vigtigste resultater og aktiviteter fra arbejdsplan 6:

1. **Procesoptimering:** Arbejdsplanen involverede omfattende arbejde med procesoptimering ved hjælp af computermodellering, simuleringer og beregninger. Erfaringer fra tidligere arbejdsplaner blev integreret for at skabe en mere strømlinet og ressourceeffektiv proces.
2. **"Fler-trins-modul":** Arbejdsplanen resulterede i udviklingen af et modul baseret design, ved brug af kolonne designet fra arbejdsplan 3. Dette modul kunne udføre flere forskellige trin af processen ved blot at ændre procesbetingelser som temperaturer og ventilstyring.

3. **Kapacitetsændring:** I projektets løb blev det besluttet at ændre kapaciteten fra en kontinuerlig proces med en kapacitet på 180 kg tekstil pr. time til 5-15 kg pr. testkørsel. Beslutningen blev truffet af flere grunde, herunder bedre validering af parametre, risikominimering og tilpasning til kunders behov.
4. **Design og Samling:** Det endelige anlægsdesign blev bygget i samarbejde med ProUnit Frames ApS i Randers. Det nye design var langt mere kompakt og fleksibelt, hvilket gjorde det muligt at transportere anlægget på en lastbil som én ramme.
5. **Instrumentering og Regulering:** Teknisk instrumentering og regulering blev udviklet og implementeret i samarbejde med Techvia A/S. Dette gjorde det muligt at overvåge og styre anlægget under testkørsler.
6. **Vand-test:** Under testkørsler blev anlægget først testet med vand i stedet for kemikalier for at evaluere dets ydeevne med hensyn til flow, opvarmning, fiberkompression og fiberudtømning. Dette var vigtigt for at validere, at processen fungerede som forventet.
7. **Proof of Technology:** En vigtig milepæl for arbejdsplanen 6 var at opnå "Proof of Technology" efter succesfuld, kontinuerlig testkørsel i 2 timer uden komplikationer.

Selvom der stadig var udfordringer og yderligere arbejde, der skulle udføres for at nå den endelige "Proof of Technology," repræsenterede arbejdsplanen 6 et betydeligt skridt fremad i projektets udvikling.

## 5.7 Arbejdsplanen 7: Energoptimering og miljøvurdering samt udarbejdning af rapport

### Formål

Formålet med arbejdsplanen 7, var at lave løbende energioptimering på anlægget. Inden projektets start blev der udarbejdet et estimat over energidiagrammer baseret først på litteratur, derefter i simuleringsprogrammer. Det var desuden planlagt at arbejdsplanen 7 skulle inkludere en LCA for cellulosepulp og polyesterpulver produceret på pilot-anlægget, med fokus på CO<sub>2</sub> ækvivalenter og vandforbrug. Undervejs i projektet blev det tiltagende tydeligt at sikkerheden samt de mekaniske løsninger i anlægget burde være hovedfokus for optimeringens fase i arbejdsplanen 7, da dette var hele udgangspunktet for at kunne skalere processen.

### Gennemførelse

I arbejdsplanen 7 blev der kørt diverse opvarmnings- og flowtest, for at validere og dokumentere den fysiske funktion af anlægget. De loggede data viste en stabil opvarmning til de ønskede set-temperaturer. Desuden blev der dokumenteret et stabilt væskeflow gennem tekstilerne, hvilket vidnede om, at tekstilerne blev behandlet som ønsket og at den patenterede kolonne opererede efter hensigten. Driften af anlægget forløb som ønsket, ved stabilt tryk på maksimalt 3 bar(g). Disse data, sammenholdt med slutprodukterne, viste lovende tendenser for fremtidig drift.

Da anlægget ikke blev bygget til én kontinuerlig proces, men i stedet blev opsat som ét modul, der kunne køre alle processer, og senere ville kunne kopieres og sættes i serie for at køre samtlige behandlingsstrin, var det på nuværende tidspunkt nødvendigt at køre testforsøg som batch-forsøg, i stedet som én kontinuerlig proces. Det var ellers ikke muligt at køre en kontinuerlig proces, da det ikke kunne lade sig gøre at etablere kontinuerlig filtrering af solventer, og kemikalieforbrug derfor ville være uforholdsmæssigt stort – og dyrt – og dermed ikke gennemførligt indenfor projektbudgettet.

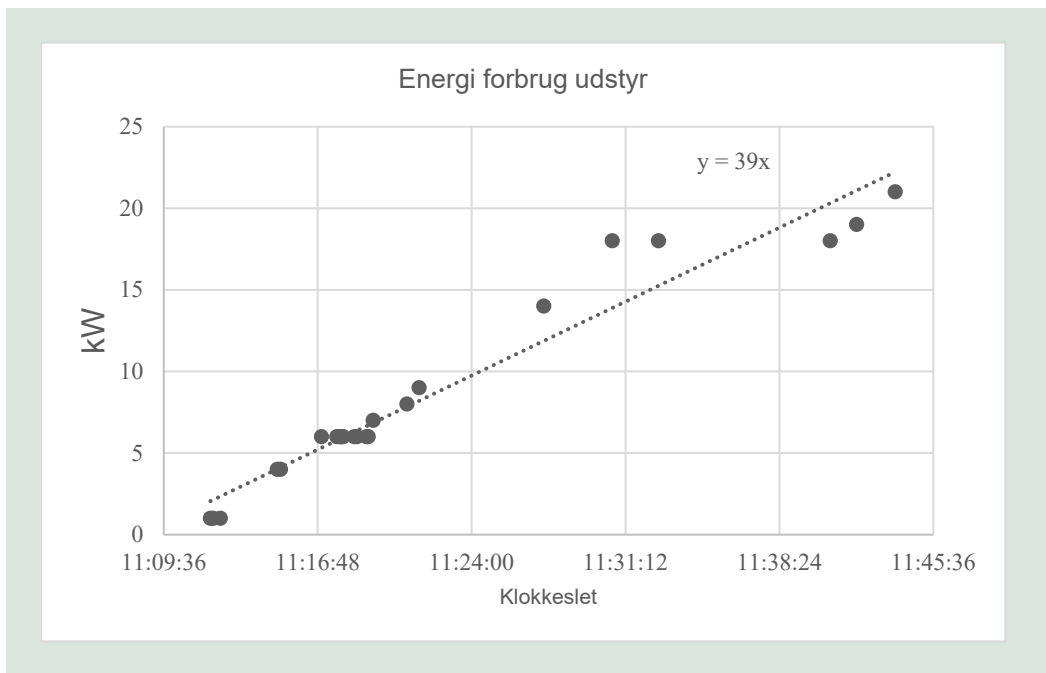
Fordi testforsøgene blev kørt som batch-processer, var energiforbruget til opvarmning meget højere, end det ville være i en kontinuerlig proces. De beregninger der blev lavet forud for pilotforsøgene, havde vist at der alene for opvarmning i batch-processen ville være et teoretisk forbrug på lige omkring 100kWh pr 10kg tekstil der behandles – det faktiske energiforbrug viste sig under testkørsler at ligge tættere på 150kWh pr testkørsel med 10 kg tekstil – dog var der flere kendte årsager til forøgelsen på de 50kWh, der blandt andet skyldtes beslutninger om at køre med mindre isolering på anlægget og en koldere temperatur omkring anlægget. Desuden kunne en del af dette tilskrives brug af overdimensionerede pumper i anlægget. Disse punkter adresseres i de følgende afsnit.

Det stod klart, allerede da de teoretiske modeller for energiforbruget blev lavet, inden testkørslerne, at de ikke ville repræsentere et retvisende energiforbrug for en optimeret, opskalaret og kontinuerlig proces, da en meget stor del af energien her bruges til at opvarme solvent og udstyr fra rumtemperatur til driftsbetingelser. Tilmed var anlægget nu stillet i et industritelt, hvorfor rumtemperatur i testperioden (sensommer og efterår 2023) kunne svinge mellem 5 og 20 grader celsius – ofte til den kølige side. På trods af, at tallene ikke ville være retvisende, var det stadig en stor fordel at kunne måle det faktiske energiforbrug ved opvarmning af solvent og i en hel testkørsel, inkl. strømbehovet for pumper mv. Det ville nemlig muliggøre brug af driftsdata på opvarmning til at vurdere varmetab i det benyttede materiale, betydningen af flow-hastigheder (omrøring) for opvarmningseffektivitet, samt betydningen af isolering af anlægget. Alt dette var nyttig viden til skaleringsberegninger, da det gav mulighed for at validere at de teoretiske modeller der var opstillet, stemte overens med faktiske forhold, og om de derfor ville være anvendelige fremadrettet.

Ved projektets opstart, var det planlagt at anlægget løbende skulle energioptimeres, hvilket blandt andet skulle gøres ved hjælp af god isolering. Anlægget blev grundigt isoleret med stenuld, der blev skåret ud og pakket omkring alle beholdere og rør. Det viste sig dog undervejs i testperioden at det faktisk var et problem at anlægget var for godt isoleret – temperaturen faldt kun med 1-10°C i timen. Dette var umiddelbart positivt, da det var en tydelig indikation for at der ville være et meget minimeret energibehov til solventopvarmning ved kontinuerlig drift på et fremtidigt skaleret anlæg. Det udgjorde dog et praktisk problem, da anlægget af sikkerhedsmæssige årsager ikke kunne tømmes for tekstilprøven og forsøget afsluttes, inden anlægget var kølet ned til under 40°C. Driftstemperaturer for test kunne være op til flere hundrede grader celsius, så derfor kunne det hurtigt komme til at tage flere døgn før et forsøg kunne afsluttes. Da selve behandlingstiden for tekstilerne, var mellem 20 og 60 minutter, var det alt for lang tid prøverne kom til at ligge i solventen, der var varm og derfor forblev ”behandlingen” aktiv, og at resultaterne for analyse af prøverne efterfølgende, ikke var retvisende. Derudover var der et mandskabsmæssigt problem, da der ikke var ressourcer i projektet til at være personale på vagt i timeskift i flere døgn for hver test. Derfor blev det besluttet at fjerne meget af isoleringen igen, så temperaturen kunne falde hurtigere og afkølingen maksimalt ville tage et par timer, og temperaturen kunne falde til et niveau hurtigt nok til at prøverne ikke fik for lang opholdstid ved ”aktiv behandlings-temperatur”.

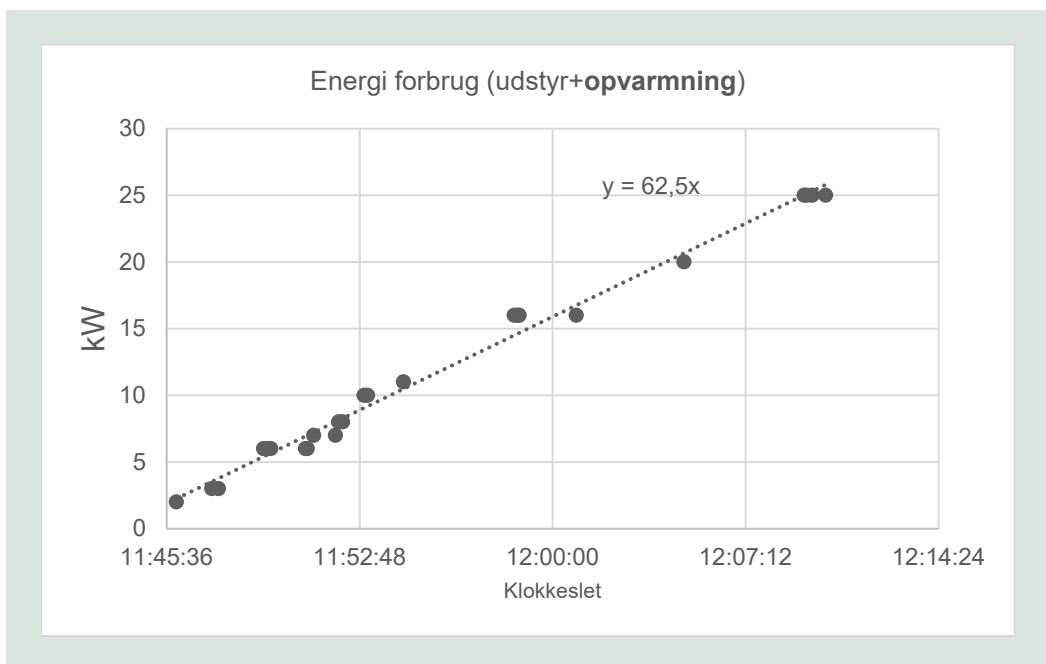
Under drift blev energiforbruget logget, og matematiske modeller opstillet for at beregne energiforbruget for hhv. procesudstyr alene, herunder pumper, sensorer og aktuatorer, og det totale forbrug af energi inklusive opvarmningsenergien.

Den ene model viste at procesudstyret alene krævede et energiforbrug på 39 kWh hvilket kan aflæses på grafen i FIGUR 14, som den rette linjes hældning.



**FIGUR 14.** Matematisk model, der viser et forbrug på 39 kWh for procesudstyret. Modellen viser at linjen har en hældning på 39, hvilket giver energiforbruget.

Analysen af energiforbrug ved drift af anlægget bekræftede af energiforbruget for opvarmning af solventen var højest ved opstart. I første del af opvarmningen var energiforbruget 62,5 kWh, beregnet ved opstilling af en matematisk model, som er dokumenteret i nedenstående graf (se FIGUR 15).



**FIGUR 15.** Matematisk model, der viser at energiforbruget inklusive opvarmning i starten af et forsøg var 62,5 kWh.

Beregningen viste at opvarmningsenergien i starten af forsøget og opvarmningsfasen udgjorde 23,5 kWh (39kWh–62,5kWh) svarende til cirka 38% af det samlede energiforbrug i hele anlægget. I mellemløbet og slutning af opvarmningen blev der derimod kun forbrugt 10 kWh,

hvilket svarer til en reduktion på 13,5 kWh energi brugt på opvarmning. Dermed falder mængden af energi der skal bruges til opvarmning med 57% fra starten til slutningen af opvarmningen, når solventen nærmer sig set-temperaturen. Forbruget var højest i begyndelsen af opvarmningen på grund af den måde reguleringen af anlægget blev programmeret, da der ved den benyttede type regulering først varmes kraftigt, og dernæst aftager effekten gradvist, når den ønskede set temperatur nærmer sig. Det blev besluttet at varme solventen langsomt op af sikkerhedsmæssige årsager og fordi energiforbruget var lavere end ved en hurtig opvarmning, da varmeelementernes fulde kapacitet ikke blev udnyttet.

En vigtig faktor for energiforbrug i opvarmningen er graden af isolering – der som nævnt ovenfor var lav grundet lang nedkølingstid, da der var behov for at nedkøling af solventer/kemikalierne ikke skulle tage for lang tid og systemet derfor ikke var fuldt men kun delvist isoleret. Ved et fuldt isoleret anlæg vil det kræve mindre energi at opretholde set-temperaturen ved steady state, hvilket ydermere også ville eliminere behovet for overhovedet at have en opvarmnings- og nedkølingsfase. Her ville der i stedet være kontinuerlig tilførsel af materiale og set-temperaturen i reaktoren kunne opretholdes, og der ville være betydelige mængder af energi at spare. Det skal i øvrigt bemærkes at pumper og andet procesudstyr var i drift i hele opvarmnings- og nedkølingsfasen i det nuværende anlæg – så hvis der fx blev kørt et batchforsøg der varede 8 timer, ville der bruges betydeligt mere energi pr. kg behandlet tekstil, da størstedelen af tiden var opvarmnings- og nedkølingsfasen, og dette indgik i det samlede energiforbrug for en test, selvom behandlingen af tekstiler i sig selv kun varede 20-60 minutter.

Det blev vurderet at de pumperne der var installeret i anlægget, var overdimensionerede.

Dette repræsenterer en usikkerhed ved brug af energimålinger til at beregne det forventede energiforbrug af pumper i et skaleret anlæg. Derimod kan målinger af den tilførte energi til opvarmning nemmere skaleres og udregnes i forbindelse med opskalering. Ved opskalering til et demonstrationsanlæg der kan behandle 500 ton tekstil pr. år, vil det være afgørende at der sikres en konstant tilførsel af materiale uden behov for, at systemet først skal afkøles/opvarmes. Hermed undgås den energitunge drift af pumper i flere timer, samtidig med den energitunge opvarmning af solventer/kemikalier til høje temperaturer elimineres.

Det kan konkluderes, at energiforbruget svarer nogenlunde til de forventede værdier for en kørsel, mens der er blevet belyst muligheder for energioptimering. Herunder ses der mulighed for optimering af energiforbruget ved opvarmning, nedkøling og dimensionering af komponenter.

Da det nuværende anlæg ikke er energioptimeret, er det besluttet foreløbigt at basere estimater for det samlede energiforbrug for et fuldskala-anlæg på en blanding af teoretiske beregninger og målte data fra det nuværende anlæg, som derudover sammenholdes med energiforbrug for lignende industrielle processer. Testkørslerne har givet en bedre forståelse af vigtige parametre som opvarmningshastighed, isoleringsgrad og varmeovergangen i materialerne, hvilket er et vigtigt bidrag til at kunne estimere et mere præcist energiforbrug for et større anlæg. Der er således lavet et estimat for et fuldskala-anlæg, hvor termisk energi udgør omkring en fjerdedel af det samlede energiforbrug og strøm til produktionsudstyr udgør det resterende. Det er blevet vurderet, at energiforbruget vil kunne reduceres med en faktor 8 ved at køre processen kontinuerligt, frem for batch mode og at der kan spares 20-30% energi til procesudstyr ved at undgå overdimensionering. Derudover vurderes det at tilstrækkelig isolering af anlægget samt integrering af varme imellem processtrømme kan reducere det samlede energiforbrug med en faktor 3. For et fuldskala-anlæg på 100,000 tons input materiale pr år, er energiforbruget således estimeret til 0,5-0,75 DKK/kg materiale, beregnet på basis af en pris på 1,65 DKK/kWh.

Oprindeligt var det planlagt at der skulle udføres en LCA for cellulosepulp og polyesterpulver produceret på pilot-anlægget, med fokus på CO<sub>2</sub> ækvivalenter og vandforbrug. Dette blev ikke gennemført, da det blev vurderet at det ville være relevant at udføre en LCA på et senere tidspunkt, hvor resultater fra det parallelle MUDP-projekt "cirkulær ressourceoptimering ved separation af blandingstekstiler indgå – her var der øget fokus på minimering af vaskevand, regenerering af kemikaliestrømme sammen med specialiserede teknologipartnere indenfor vask,

vandbehandling og kemigenindvinding, for at sikre at disse områder blev behandlet tilstrækkeligt. Da det samtidig viste sig at sikkerhedsaspekter og mekaniske udfordringer fyldte mere end først antaget i nærværende projekt, blev LCA arbejdet udsat, og andre optimeringer prioriteret i stedet.

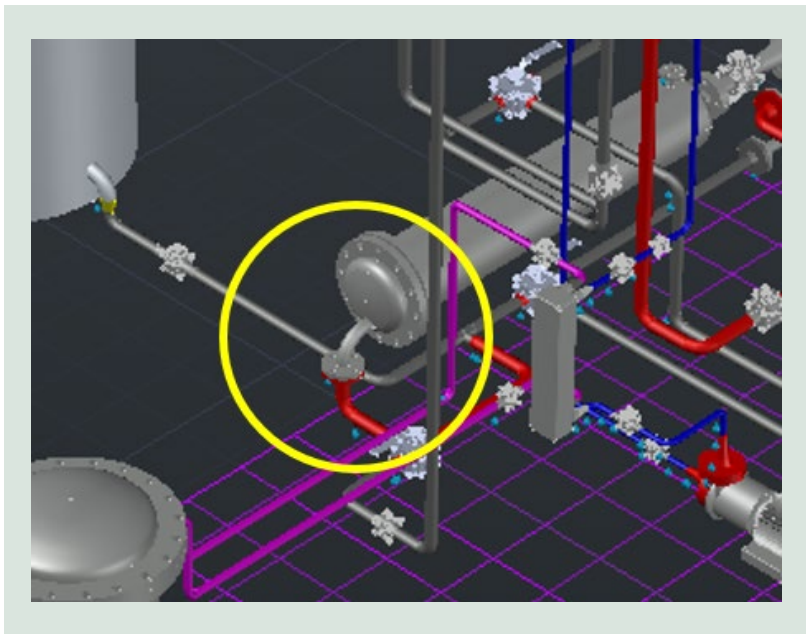
Arbejdsplanen 7 førte til flere konkrete optimeringsforslag til procesdesignet. Under de første fulde testkørsler med solventer ved høje temperaturer, blev der observeret en større ekspansion af opløsningsmidlet end forventet, hvilket førte til et over-flow af solvent og en uventet trykøstigning. Over-flowet af solvent løb ud i spildbakken, under opvarmning og behandling af tekstiler. Dette var en absolut nødvendig problematik at løse, før der kunne arbejdes videre, da det repræsenterede en stor sikkerhedsrisiko. Derfor blev der foretaget nødvendige ændringer for at sikre sikkerhed og effektivitet:

- En større balancetank for at give mere plads til udvidelse af solventen.
- En trykregulerende ventil, til løbende at udligne den trykøstigning der evt. ville opstå i fremtiden.
- En revurdering af det "Hazard and operability study" (HAZOP risikoanalyse) der tidligere var lavet, da headspace i balancetanken var forøget.

Yderligere testkørsler på anlægget, gav et godt indblik i yderligere praktiske problematikker som skal forbedres i et opskalaret design. Eksempler inkluderer:

- Rørføring og placering af flanger på pilot-anlægget løber generelt lidt for tæt. Det gør det besværligt at komme rundt til de forskellige steder for at åbne/lukke ventiler, lave reparationer, åbne/lukke flanger og at operere anlægget manuelt. Til et fremtidigt anlæg vil der tages forbehold for dette.
- Et andet eksempel er, at der er lavet mange små spildbakker, frem for én eller få store spildbakker under anlægget. Det besværliggør rengøringen. Til et fremtidigt anlæg vil der findes en smartere løsning, som gør det nemmere at rengøre spildbakken og tørre op efter spild. Derudover vil give mening at tilføje en spildbakke således, at indholdet kan "tappes af" i dræn.

Både polyester, bomuld og polycotton blev testet i anlægget med vand, for at validere at den mekaniske funktionalitet var bibeholdt ved behandling af forskellige typer fibre, med varierende densitet og kompressionsegenskaber. Dog viste det sig, da hele anlægget var samlet, at det ikke ville være sikkerhedsmæssigt forsvarligt at opløse større mængder polyester i anlægget, grundet den valgte rørtykkelse, det sted i anlægget der ligger umiddelbart efter at den opløste polyester ville udfældes til pulver (markeret med gul cirkel på FIGUR 16, der viser en 3D fremstilling af den relevante del af anlægget). Da ekspansion af solvent var højere end forventet, og solventen desuden vil have en væsentlig højere viskositet når polyester opløses heri, opstod en bekymring om, at der kunne opstå utilsigtede trykstigninger og -fald forskellige steder i systemet, ved opløsning og udfældning af polyester, tæt på snævre rørstykker. Pludselige trykændringer ville ikke kunne reguleres da der, i reguleringssløjferne, ikke var højde for dette. Det ville være relevant at foretage en mindre ombygning af reguleringssløjfen og udskifte enkelte rør-dele, inden opløsning af polyester opløses i anlægget. Dermed skal der foretages en ombygning, inden validering af sidste trin i processen kan foretages, hvor polyester opløses og udfældes til pulver, eller polyester trækkes ud af polycotton og udfældes til pulver.



**FIGUR 16.** Udsnit af 3D tegning af pilot-anlægget, med gul cirkel til markering af det område hvor der var særlig risiko for pludselige trykændringer grundet en kombination af solventekspansion, høj viskositet i solvent pga. opløst polyester samt delvis udfældning af polyesterpulver.

Den nødvendige ombygning af anlægget er afgørende for at imødekomme disse sikkerhedsrisici og sikre en bæredygtig og sikker drift. Denne ombygning kan ikke gennemføres indenfor projektets tidsplan og budget, men finansieres af Textile Change ApS, og er påbegyndt på tidspunktet for projektets afslutning. Ombygningen indebærer tilføjelsen af en ekstra reguleringsløjfe, der vil øge kontrol og overvågning af processen. Implementeringen af en ekstra sikkerhedstank, trevejsventil og et filtersystem er designet til at håndtere potentielle overtryksituationer, reducere trykket i kritiske områder af anlægget og sikre en sikker afbødning af den højviskøse polyesterstrøm. Disse foranstaltninger er afgørende for at minimere risikoen for uønskede hændelser og sikre, at processen kan operere inden for sikkerhedsparametrene.

Da der ikke kunne opløses polyester i anlægget, var fokus i testperioden på at validere at forbehandlinger og affarvning af tekstiler fungerede som tiltænkt og kunne genskabe resultater fra laboratoriet. Selvom polyester ikke blev opløst på anlægget, blev også det forbehandlet og affarvet i pilot-anlægget. Derefter blev polyester opløst i store batches i laboratoriet, og det blev pelleteret til et færdigt produkt ved en polyesterproducent. Kvaliteten af polyesterpulveret blev valideret ved måling af intrinsisk viskositet, der er et mål for polymerlængden, hvor det blev påvist at det behandlede polyester levede op til den ønskede kvalitet og stemte overens med tilsvarende forbehandlet og affarvet polyester fra laboratorieforsøg, hvilket viste at der kunne produceres tilsvarende materiale fra pilot-anlægget og at skaleringen var succesfuld i denne retning.

### Resultater

I arbejdsplanke 7, blev der udarbejdet flere vigtige optimeringsforslag for procesdesignet og mekaniske forbedringer af anlægget. Herunder udfordringer med overdreven ekspansion af solventen og trykopbygning blev identificeret og løst ved at tilføje en større balancetank, en trykregulerende ventil og en revurdering af risikoanalyse.

Anlæggets funktionalitet i forbehandlinger og affarvning af tekstiler blev valideret. Opløsning af polyester viste sig at indebære sikkerhedsrisici, som krævede en mindre ombygning af pilot-

anlægget. Dette skyldes primært viskositeten af polyester i opløsning, som gav anledning til bekymring for trykopygning og uønskede læk fra anlægget, hvilket ville være uacceptabelt i en ATEX-zone. Selvom denne ombygning ikke kunne gennemføres inden for rammerne af dette projekt, skal det bemærkes, at Textile Change ApS har afsat midler til at finansiere og påbegynde denne væsentlige opgradering af anlægget efter projektets afslutning. Denne investering afspejler virksomhedens engagement i at opretholde høje sikkerhedsstandarder og sikre, at teknologien kan opskaleres på en ansvarlig og bæredygtig måde.

Den kommende ombygning vil ikke kun adressere sikkerhedsaspekter, men kan også have positive indvirkninger på effektiviteten og pålideligheden af anlægget. Yderligere evaluering og rapportering vil være nødvendig, når ombygningen er afsluttet, for at vurdere de konkrete forbedringer og de potentielle fordele, de kan medføre for projektets overordnede succes.

Dette skridt mod et mere robust og sikkert installationsdesign understreger vigtigheden af at integrere læring fra praktisk drift og testkørsler for at forfine teknologien og forberede den til yderligere opskalering. Implementeringen af de foreslåede sikkerhedsforanstaltninger vil ikke kun forbedre sikkerheden, men også styrke tilliden til teknologien og dens levedygtighed på lang sigt.

Testkørsler på anlægget gav indblik i praktiske problemstillinger, såsom rørføring og placering af flanger og mængden af små spildbakker, som skulle optimeres i fremtidige design. Samlet set involverede arbejdsplanen 7 vigtige testkørsler og optimeringsprocesser for at forstå og forbedre energiforbruget og de mekaniske løsninger i pilot-anlægget, hvilket var afgørende for at planlægge opskalering af processen og sikre sikkerhed og effektivitet i et fremtidigt fuldskala-anlæg.

## 5.8 Samlet opfølgning på arbejdsplaner

Projektet har gennemført en omfattende undersøgelse og udvikling af en teknologi til kemisk genanvendelse af tekstiler, og resultaterne fra de forskellige arbejdsplaner afspejler en betydelig succes. Et gennemgående tema i projektet har været fokus på sikkerhed, hvilket har vist sig at være af afgørende betydning, især når man arbejder med opvarmede organiske opløsningsmidler og komplekse processer.

Arbejdsplan 1:

Sikkerhed blev identificeret som højeste prioritet, og der blev udviklet omfattende retningslinjer og procedurer for at sikre sikker drift af pilot-anlægget. Godkendelse fra brandmyndighederne og overholdelse af ATEX-standarder understreger det seriøse engagement i at opretholde sikkerheden gennem hele projektet.

Arbejdsplan 2:

Mekanisk nedbrydning af tekstiler blev forfinet i samarbejde med Eldan Recycling A/S, og resultaterne understregede vigtigheden af mindre stykker tekstiler for at opnå en effektiv kemisk behandling. Samarbejdet med sorteringsvirksomheder skabte grundlaget for fremtidig værdikædeudvikling.

Arbejdsplan 3:

Her blev der opnået vigtige resultater, herunder udvikling af en innovativ vertikal reaktor og identifikation af den optimale koncentration af tekstilfibre i solvent. Ændringen i forretningsmodellen og fokus på produktion af genanvendte råmaterialer viser en tilpasningsevne i projektets forløb.

Arbejdsplan 4:



Oprensning af polyesterfraktionen krævede yderligere sikkerhedsforanstaltninger, og resultaterne understreger kompleksiteten ved håndtering af opvarmede opløsningsmidler. En kommende ombygning af anlægget, finansieret af Textile Change ApS, vil adressere disse udfordringer.

Arbejdspakke 5:

Crossflow filtrering viste lovende resultater, men udfordringer med farvestofoprensning kræver yderligere opmærksomhed i det parallelle MUDP-projekt.

Arbejdspakke 6:

Procesoptimering og udviklingen af et fleksibelt modulbaseret design var nøgleelementer. Ændringen i kapacitetsbeslutningen viser projektets evne til at tilpasse sig og validere parametre for risikominimering.

Arbejdspakke 7:

Den nødvendige ombygning af anlægget for at imødekomme sikkerhedsrisici ved oprensning af polyesterfraktionen blev identificeret. Planlagte sikkerhedsforanstaltninger og mekaniske forbedringer vil styrke anlæggets sikkerhed og pålidelighed.

Samlet set har projektet demonstreret sin evne til at navigere gennem komplekse udfordringer og forfine teknologien. Selvom der er behov for yderligere optimeringer og sikkerhedsforanstaltninger, har projektet allerede opnået en afgørende skalaforøgelse, udviklet et pilot-anlæg og identificeret strategier for videre opskalering. Det investerede fokus på sikkerhed er ikke kun et krav, men også et aktiv, der styrker tilliden til teknologien og dens levedygtighed på længere sigt.

## 5.9 Next steps: Fokusområder for videreudvikling og skalering af teknologien

For at nå det næste skaleringsniveau og opnå kommerciel skala for teknologien til kemisk genanvendelse af tekstiler er der flere afgørende skridt og overvejelser, der skal tages i betragtning. De vigtigste milepæle er som følger:

### Demonstrationsanlæg

Det er nødvendigt at gennemføre en fuld implementering og drift af et semi-kommercielt demonstrationsanlæg med en inputkapacitet på 500 tons tekstilaffald årligt. Formålet er gennemførelse af procesoptimeringer og erfaringer fra tidligere projekter, inklusive dette som det mest afgørende projekt, samt evaluering af økonomiske aspekter som driftsomkostninger (OPEX) og etableringsomkostninger (CAPEX) ved denne skala, som repræsenterer industriel størrelse maskiner og derfor kan benyttes til præcise beregninger for et fuldskala-anlæg.

### Teknologioptimering

Der er planlagt en fortsat teknologioptimering og finjustering af indholdet repræsenteret i hver arbejdspakke i nærværende projekt, for fortsat at forbedre effektiviteten og pålideligheden af processen. Der skal implementeres flere sikkerhedsforanstaltninger og mekaniske forbedringer fra arbejdspakke 7 for at sikre en sikker oprensning af polyesterfraktionen.

### Fortsat Forskning og Udvikling

Textile Change forpligter sig til kontinuerlig forskning og udvikling (FoU) for at identificere yderligere muligheder for forbedringer inden for teknologien til kemisk genanvendelse af tekstiler. Dette vil blive udført i tæt samarbejde med teknologipartnere, der besidder specialisering inden for områder som kemikalieoprensning, vandbehandling, energioptimering m.m. Formålet er at sikre en vedvarende udvikling og forfining af processen samt at være åben for innovation og implementering af nye teknologier, der måtte opstå i fremtiden.

En central del af den fortsatte FoU-indsats er udforskningen af nye materialer egnet til genanvendelsesprocessen. Dette inkluderer løbende evaluering af materialernes bæredygtighed, effektivitet og miljømæssige påvirkning for at vælge de mest hensigtsmæssige og bæredygtige løsninger. Samtidig vil der blive arbejdet på at identificere og implementere procesforbedringer for at øge effektiviteten og reducere miljøpåvirkningen.

Højere genanvendelse af- og mere miljøvenlige alternativer til eksisterende kemikalier og processer vil også være i fokus, og implementeringen af grønne og bæredygtige teknologier vil blive prioriteret. Der lægges vægt på at være åben for ukendte muligheder og teknologier, der potentielt kan forbedre genanvendelsesprocessen, og der vil være en proaktiv deltagelse i teknologiske nyskabelser inden for tekstilgenanvendelsessektoren.

Gennem stærke samarbejder og vidensdeling med teknologipartnere og forskningsinstitutioner vil Textile Change styrke sin position som en frontløber inden for tekstilgenanvendelsessektoren. Den vedvarende forpligtelse til kontinuerlig optimering og undersøgelse af alle aspekter af genanvendelsesprocessen vil danne grundlaget for en dynamisk tilpasning til nye udfordringer og muligheder, der opstår under implementeringen. På denne måde vil Textile Change forblive en førende aktør og en pioner inden for bæredygtig tekstilgenanvendelse.

### **Markedsintegration**

Textile Change ønsker at etablere et bredt samarbejde med tekstilproducenter, modeindustrien og andre interessenter for at etablere en bæredygtig og levedygtig værdikæde for genanvendelse af tekstiler. Dette arbejde er allerede påbegyndt. Der skal etableres partnerskaber og aftaler med virksomheder, der kan indgå som kunder for de genanvendte råmaterialer.

### **Regulatorisk overholdelse**

Der skal sikres fuld overholdelse af miljømæssige og sikkerhedsmæssige standarder samt reguleringer inden for tekstilgenanvendelsessektoren. Her prioriteres en aktiv dialog med myndigheder for at sikre, at teknologien er i overensstemmelse med gældende lovgivning – der er et område i stor udvikling for tekstilgenanvendelse. Derfor ligger der et vigtigt arbejde i at følge med i hvordan lovgivningen på dette område udvikler sig de kommende år, og at følge med i lovgivning, strategi og handlingsplaner der udkommer på nationalt og internationalt.

### **Økonomisk Bæredygtighed**

Forretningsmodeller og indtjeningspotentiale skal fortsat evalueres på kommerciel skala. Textile Change vil arbejde på at tiltrække investorer og finansiering for at støtte opskalering og implementering af fuldskala-anlægget.

### **Måling af klima- og miljøpåvirkning**

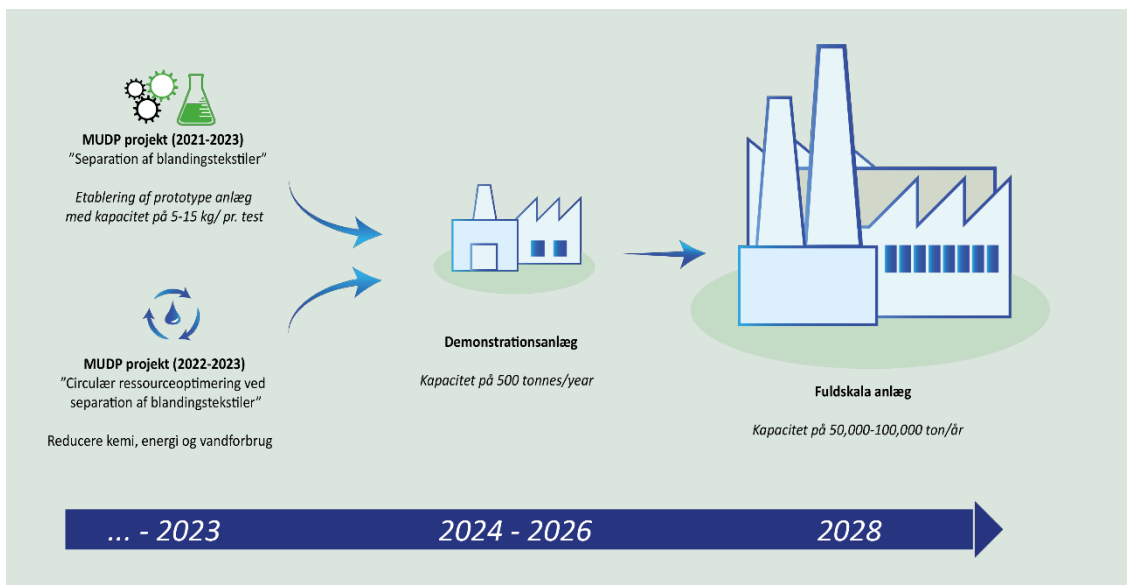
Det planlægges at der skal gennemføres en livscyklusanalyse for at vurdere teknologiens samlede miljøpåvirkning og identificere områder, hvor yderligere bæredygtighedsforbedringer kan implementeres. En eco efficiency analyse og delvis livscyklusanalyse udføres som en del af det parallelle MUDP-projekt "Cirkulær ressourceoptimering ved separation af blandingstekstiler", og forventes offentliggjort i løbet af 2024. Dette er dog ikke en "engangsopgave" da, Textile Change ApS forventer konstant optimering af eco efficiency og LCA-data ved yderligere optimering af processen, og disse analyser derfor skal genbehandles og justeres efterhånden.

## 6. Perspektivering

Projektet har identificeret flere områder til forbedring og fremtidige muligheder. For eksempel kan procesdesignet optimeres for at reducere pladskrav og lette vedligeholdelse og rengøring. Fremtidige versioner af anlægget kan drage fordel af disse forbedringer for at sikre mere effektiv drift.

Det endelige mål for at opnå kommerciel drift for Textile Change er etableringen af et fuldskala-anlæg, med kapacitet 50-100.000 tons/år. For at nå dertil, vurderes det at være nødvendigt først at etablere et demonstrationsanlæg, og via test på dette validere processens funktionalitet i maskiner der er industriel størrelse, og derfor kan bruges til at forudsige hvilken outputkvalitet, etablerings- og drift omkostninger der vil kunne opnås og overholdes på et fuldskala-anlæg. Forud for opskaleringen til fuldskala-anlægget skal der sikres kapital til dette via forskellige kilder – f.eks. investorer, lån, leasing og offentlige midler. For at kunne rejse disse midler, kræver det at Textile Change har en markedsaccept af vores outputprodukter, og at Textile Change kan lave forhåndsaftaler omkring salg af disse inden anlægget er klart. Salgsaftalerne vil overvejende blive indgået med fiber-producenterne, som er dem der i første omgang vil aftage vores slutprodukter. Dog er det vigtigt, at fiber-producenterne kan se at de brands, som i sidste ende skal bruge de genanvendte materialer vil acceptere brugen af netop vores materialer. Derfor skal vi i de kommende år lave limited edition collections, som er baseret på at vi processerer tekstil-affald og i samarbejde med fiber-producenterne får lavet fibre, som kan indgå i produktion af nyt tøj. Samtidig med dette skal vi også sørge for at trademarket vores outputprodukter, så vi sikrer vores brand og genkendelighed i markedet. Udover samarbejdet med fiber-producenterne skal vi også sikre, at vi har nok input materiale (tekstil-affald) til den dag fuldskala anlægget går i drift. Dette arbejde er allerede begyndt, og vi er i dialog med flere europæiske aktører, ligesom vi i etableringen af demonstrationsanlægget vil samarbejde med den største danske aktør på markedet.

De opnåede resultater og erfaringer fra dette projekt, samt MUDP-projektet "cirkulær ressource optimering ved separation af blandingstekstiler, der har kørt parallelt, integreres i et optimeret procesdesign, der sigter mod at opskalere til et demonstrationsanlæg. Demonstrationsanlægget repræsenterer det sidste afgørende skridt i retning af et kommercielt fuldskala-anlæg, der kan håndtere blandet tekstilaffald og realisere cirkulær økonomi inden for tekstilindustrien. Sammenhængen imellem de to eksisterende MUDP-projekter, og skaleringen til først et demonstrationsanlæg og derefter fuldskala-anlæg, kan ses på FIGUR 17.



**FIGUR 17.** Resultaterne fra dette MUDP-projekt «Separation af blandingsstekstiler» samt det parallelle, "cirkulær ressourceoptimering ved separation af blandingsstekstiler" skal integreres i et demonstrationsanlæg, som Textile Change ApS er i gang med at søge finansiering til. Demonstrationsanlægget skal have en kapacitet på 500 tons/år og fuldskala-anlægget skal være 100-200 gange større, med en kapacitet på 50-100,000 tons/år.

I projektperioden har Textile Change ApS ansøgt om i alt fire patenter, og status på disse er, at to af dem er udstedt, ét af dem er godkendt og ét af dem er patent pending. Dette projekt har været udslagsgivende for at Textile Change ApS har kunnet udvikle en innovativ genanvendelsesmetode til at reducere tekstilindustriens ressourceforbrug og miljøbelastning. Det kommer på et tidspunkt, hvor tekstilindustrien står over for stigende opmærksomhed på bæredygtighed og krav om at reducere sin negative indvirkning på miljøet. Resultaterne af dette projekt kan bidrage til at forme fremtiden for tekstilindustrien og fremme en mere bæredygtig tilgang til produktion og forbrug af tekstiler. Reduceringen af ressourceforbrug, genanvendelse af materialer og minimering af miljøbelastningen er afgørende skridt mod en mere bæredygtig fremtid for tekstilindustrien og planeten som helhed.

Dette projekt har ikke kun bidraget til udviklingen af innovativ teknologi, men har også åbnet døren for samarbejde med eksterne teknologipartnere, hvor Textile Change ApS har skabt kontakt til alle led i tekstilværdikæden. Vigtige samarbejdspartnere ift. den fremtidige opskalering indgår som partnere i design og optimering af demonstrationsanlægget. Nærværende projekt har været afgørende for det kommercielle potentiale for Textile Change ApS. For det første har etableringen af pilot-anlægget genereret langt større interesse fra tekstilbranchen, hvilket viser at Textile Change ApS som virksomhed bevæger sig tættere på et kommercielt stadium, og at branchen ser virksomheden og dette projekt som en del af løsningen til i fremtiden at genanvende tekstiler, og sende genanvendte output produkter fra denne proces ind i tekstilværdikæden og dermed bidrage til en cirkulær værdikæde. I løbet af projektperioden har Textile Change ApS således haft møder med +30 tøjfirmaer/brands, som har vist interesse for løsningen. Flere af disse tøjfirmaer/brands har indgået en aftale med Textile Change ApS om at bidrage med at teste output kvalitet og arbejde mod at bringe de første limited edition kommercielle produkter på markedet, for at demonstrere at metoden kan tage tekstilaffald fra 'skrald' til butik.

De direkte kunder til Textile Change ApS er fiberproducenterne, og her har etableringen af pilot-anlægget været afgørende for relations opbygning til disse. Projektet har gjort det muligt at vise et stort skidt på vejen til at opskalere teknologien fra laboratorie (gram) til pilot-anlæg (kg)

og lave output produkter polyester pellets og cellulose pulp i større mængder, hvilket er et afgørende skridt ift. at fiberproducenterne kan have tillid til at teknologien også kan skaleres til fuldskala og dermed kommerialiseres. Det vurderer at det har haft afgørende betydning for det fortsatte samarbejde med fiberproducenterne, at Textile Change ApS har kunnet skalere til pilot-anlægget, da fiberproducenterne også skal bidrage med timer og udviklingsressourcer for at sikre at output produkterne kan fungere optimalt i deres produktion. Interessen fra fiberproducenterne er så stor, at de har tilkendegivet at de vil bidrage med yderligere tests af output-produkterne fra det kommende demonstrationsanlæg.

Branchen for tekstilgenanvendelse er stadig meget ny, og i løbet af dette MUDP-projekt er der identificeret to licenseringsmuligheder på baggrund af det der er udviklet i projektet. For det første er det erfaret at mange aktører i branchen er interesseret i en løsning hvor Textile Change ApS kan "rense" en polycotton fraktion for farver, tungmetaller, PFAS etc. Det gælder både for andre genanvendelses-virksomheder, men også for fiberproducenter. Dermed kan dem der arbejder med genanvendelse af polyester bruge polyester-fraktionen, og dem der arbejder med bomuld, kan bruge bomulds-fraktionen. Derudover arbejder mange i branchen med batch produktion, som kan have udfordringer ift. at sikre den mest effektive proces, og her kan den vertikale reaktor, som er udviklet og patenteret i løbet af projektet vise sig at være rigtig interessant, da den sikrer et kontinuerligt flow. Det er således afgørende for en mulig licensering at der i løbet af projektet er blevet udviklet denne kolonne, og har kunnet teste den og vise at den fungerer som forventet.

Endelig har dette MUDP-projekt sammen med et parallelt MUDP-projekt "Cirkulær ressource optimering ved separation af blandingstekstiler" været afgørende ift. at kunne scope det næste trin i Textile Change ApSs kommerialisierungsplan, som er etableringen af et demonstrations-anlæg. Det har således været muligt at bruge erfaringerne fra de to projekter ift. at projektere det kommende demonstrationsanlæg, og de læringer der er fremkommet herfra, har været afgørende for dette. Derudover har etableringen af pilot-anlægget i dette projekt været en afgørende faktor for at det har været muligt at underskrive en Memorandum of Understanding med en af verdens førende virksomheder til etablering af fuldskala procesanlæg.

Konkurrencesituationen for tekstilgenanvendelse var gunstig før dette projekt og er det stadigvæk. Der produceres ca. 92 mio. tons tekstilaffald årligt, og under 1% af dette blive genanvendt i fiber-til-fiber genanvendelse pga. mangel på effektive og skalerbare løsninger. Svenske Renewcell har etableret det første fuldskala-anlæg med en kapacitet på 60.000 tons/år med planer om at udvide til 120.000 tons/år, og kan således kun håndtere en meget lille andel af det årlige tekstilaffald. Samtidig arbejder Renewcell udelukkende med renere bomuldsfraktioner og de virksomheder, der, ligesom Textile Change ApS, kan arbejde med blandingstekstiler er således typisk på pilotskala og ikke klar med en kommerciel løsning endnu.

Samtidig har mange tøjfirmaer/brands meldt ud omkring 2025/2030 målsætninger ift. brug af genanvendt materiale, hvilket vil være med at øge efterspørgslen og i McKinsey rapporten "Scaling textile recycling in Europe turning waste into value" fra juli 2022 forventes det, at der i Europa i 2030 er et udbud af genanvendte fibre, som er 60-70% lavere end det efterspørgslen.

I betragtning af tekstilindustriens aktuelle udfordringer og presserende behov for bæredygtige løsninger, bør resultaterne af dette projekt ses som et værdifuldt skridt i retning af en mere bæredygtig fremtid for industrien og planeten som helhed.

### Separation af blandingstekstiler

I dette projekt blev der arbejdet på at reducere tekstilindustriens ressourceforbrug og miljøpåvirkning ved at udvikle en metode til at håndtere tekstilaffald og genanvende værdifulde materialer som bomuld og polyester. Projektet bestod af syv arbejdsopgaver, der involverede forskellige processer og teknologier med det formål at kortlægge vejen til skalering af en innovativ tekstilgenanvendelsesmetode, fra laboratoriet til et kommercielt fuldskala-anlæg.

Anlægget blev omhyggeligt designet og optimeret, med væsentlige ændringer undervejs, inklusive patentbeskyttet reaktordesign. Resultaterne fra testkørsler var lovende, og selvom der opstod tekniske udfordringer, blev de håndteret ved løbende forbedringer. Samarbejde med eksterne partnere og laboratorier blev etableret for at sikre kvaliteten af genanvendte materialer.

Projektet har opnået vigtige milepæle inden for tekstilgenanvendelse, inklusive udvikling af innovative teknologier og lovende resultater på pilot-anlægget. Det har også identificeret områder til forbedring og fremtidige muligheder, herunder patentbeskyttelse og licensiering af teknologien. Resultaterne bidrager til en mere bæredygtig tekstilindustri med reduceret ressourceforbrug og miljøpåvirkning. Sammen med resultaterne fra et parallelt projekt vil de blive integreret i et optimeret procesdesign med henblik på at skalere til et semi-kommercielt demonstrationsanlæg, der er det sidste skridt mod et kommercielt fuldskala-anlæg inden for tekstilgenanvendelse og cirkulær økonomi.



Miljøstyrelsen  
Tolderlundsvej 5  
5000 Odense C

[www.mst.dk](http://www.mst.dk)