



Udvikling af bæredygtige surfaktanter baseret på upcycledede restfraktioner MUDP-projekt

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

[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: "[Oliver Raae Gedde, 2025, Udvikling af bæredygtige surfaktanter fra upcycledede restfraktioner], MUDP slutrapport, [ISBNnr.]"

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Oliver Raae Gedde

Nicklas Nørgaard

Helena Felby Rasmussen

Grafiker/bureau:

NorFalk ApS

Tryk:

NorFalk ApS

Fotos:

NorFalk ApS

ISBN: 978-87-7564-018-8

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

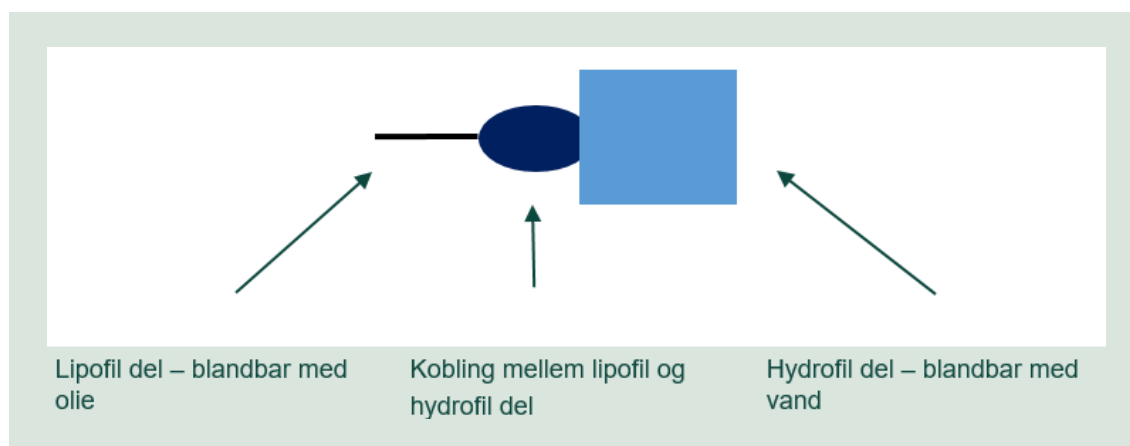
1.	Introduktion	5
1.1	Surfaktanter	5
1.2	Tang som bioresurse	6
2.	Sammenfatning	7
2.1	Resume af projektet	7
2.2	Hovedkonklusion	7
2.3	Afledte effekter	8
2.4	Perspektivering	8
3.	Afrapportering på aktiviteter	10
3.1	Oversigt over teamet i projektet	10
3.2	Oversigt over produkter	10
3.3	Arbejdspakke 1: Projektledelse	11
3.4	Arbejdspakke 2: Udvinning	12
3.4.1	Metoder anvendt til analyse	12
3.4.2	Klargørelse af tang	12
3.4.3	Udvinding af fedtstoffer	13
3.4.4	Udvinding af protein	13
3.4.5	Udvinding af polysakkarider	13
3.5	Arbejdspakke 3: Syntese og oprensning	15
3.5.1	Nedbrydning af fedtstoffer	15
3.5.2	Nedbrydning af PS1 til mPS1	16
3.5.3	Nedbrydning af PS2 til mPS2	18
3.5.4	Syntese af S1.1 fra mPS1	18
3.5.5	Syntese af S1.2 fra mPS1	19
3.5.6	Syntese af S2 fra mPS2	19
3.5.7	Syntese af S3 fra mPS3	20
3.5.8	Konklusion på arbejdsopgave 3	22
3.6	Arbejdspakke 4: Produktvalidering	22
3.6.1	Stabilitetstests af S1.1	23
3.6.2	Stabilitetstest af S1.2	24
3.6.3	Stabilitetstest af S3	25
3.6.4	Valg af mest lovende surfaktant	25
3.6.5	Opskalering af S3	25
3.6.6	Benchmarking i forhold til eksisterende surfaktanter	26
3.6.7	Vurdering af markedspotentialet	28
3.6.8	Interaktion med markedet	29
3.6.9	Konklusion på arbejdsopgave 4	29
3.7	Arbejdspakke 5: Produktionsvalidering	29
3.7.1	Opstilling af PFD og beregning af klasse 5 CAPEX-estimat	30
3.7.2	Indledende CO ₂ -beregninger	30
4.	Referencer	32

1. Introduktion

Formålet med dette projekt er at udvinde forskellige komponenter fra tang, som efterfølgende bruges til udviklingen af nye bæredygtige surfaktanter.

1.1 Surfaktanter

Surfaktant betyder "surface-active agent" eller overfladeaktivt stof. Surfaktantmolekyler er amfifile, hvilket betyder at disse molekyler har både en hydrofil (vandelskende) og lipofil (fedtelskende) ende, se FIGUR 1. Det giver surfaktanter emulgerende egenskaber så de kan tvinge vand og olie til at blande sig. Surfaktanter produceres på multitons skala, eftersom de benyttes i mange forskellige produkter såsom rengøringsmidler, cremer, madvarer og medicin.



FIGUR 1. Generel kemisk struktur af en surfaktant. Surfaktanter består af en lipofil og hydrofil del. Den lipofile del består som regel af en alkylkæde, og den hydrofile del kan bestå af mange forskellige typer af polære grupper såsom sulfater, carboxylater eller alkoholer.

De mest producerede anioniske surfaktanter er natrium lauret sulfat (SLES), natrium lauryl sulfat (SLS) og lineære alkylbenzensulfonat (LAS bedre kendt som sulfo) som tilsammen står for en tredjedel af den totale produktion af anioniske surfaktanter på det globale plan svarende til omtrent 23 millioner tons. [1] Udfordringen med disse surfaktanter er deres miljøaftryk og hudirritation. Alle tre surfaktanter produceres med ingredienser fra enten fossile resurser eller palmeolieindustrien og produktionerne benytter betingelser såsom høje temperaturer, hårde kemikalier og højt tryk. Udover høje CO₂-udledninger udviser surfaktanterne også andre miljømæssige udfordringer.

SLES bliver produceret med en polymerisering af ethylenoxid, hvilket betyder at sideproduktet 1,4-dioxan er til stede i den endelige surfaktant. 1,4-Dioxan er et potentielt karcinogen og da stoffet ikke er bionedbrydeligt observeres det i stigende grad i floder pga. SLES-produktionen. [2] LAS truer miljøet ved at være giftig over for vandlevende organismer samtidig med at denne surfaktant ikke kan nedbrydes under anaerobe betingelser. LAS ophobes over tid i slam-lignende miljøer og kan dermed udvise en trussel for de omkring levende organismer hvis surfaktanten frigives i høje koncentrationer fra det anaerobe miljø. [3]

Vi, NorFalk, har været i dialog med flere kunder, der er på udkig efter miljøvenlige alternativer til de anioniske surfaktanter nævnt ovenfor. De vender alle tilbage med den samme melding om at de bedste kommercielle alternativer i dag er rhamnolipid og sophorolipid. Vores kunder

er dog stadig interesserede i nye alternativer fordi både rhamnolipid og sophorolipid lider under nogle ulemper. Rhamnolipid og sophorolipid bliver produceret via fermentering, hvorfor oprensningen af surfaktanterne inkluderer ekstrahering fra komplicerede blandinger af biologiske stoffer. Dette resulterer i en oprenset surfaktant med gul farve og lugt, da små rester af deres biologiske ophav vil påvirke den færdige surfaktant. Specielt sophorolipidet har en kraftig og ubehagelig lugt, som ikke er egnet til parfume fri formuleringer. Vi fik at vide fra flere kunder at deres generelle performance ligger på et lavt til middel niveau sammenlignet med andre surfaktanter. Vi fik også at vide, at de ligger på et middel niveau ift. mildhed mod øjne og hud. Til sidst har vi også lært at prisen på disse to surfaktanter ligger i omegnen af 15–30 EUR/kg, hvilket er meget højere sammenlignet med en pris på 2-3 EUR/kg på andre surfaktanter.

1.2 Tang som bioresurse

Tang vinder mere og mere frem som en bioresurse til forskellige anvendelser bl.a. i fødevarerindustrien. Udvikling indenfor dyrkning af tang bevæger sig hurtigt og øger dermed også tilgængeligheden af denne resurse. Udfordringen er dog stadig at dyrkningen af tang kræver enorme mængder af saltvand, hvilket komplicerer masseproduktion af resursen på land. I det naturlige maritime miljø er det besværligt at kontrollere vækstforholdene og høsten af planten er også udfordrende. Ikke desto mindre er anvendelsen af tang støt stigende. Dette resulterer i at vores viden om de kemiske komponenter (biomolekyler) også øges. Flere af disse komponenter kan anvendes i produktionen af biobaserede surfaktanter.

Vi har identificeret en overset affaldsstrøm af tang, som ikke vil kunne udnyttes indenfor fødevarerindustrien. Det er vores mission med dette projekt at undersøge muligheden for at ekstrahere komponenter fra denne affaldsstrøm, for derefter at anvende dem i syntesen af nye bæredygtige surfaktanter.

2. Sammenfatning

2.1 Resume af projektet

I perioden marts 2023 til marts 2025 har vi, NorFalk, udført det angivne arbejde i forbindelse med udarbejdningen af dette projekt. Projektet er forløbet godt og det er lykkedes at følge planen og succesfuldt udvikle flere surfaktantkandidater hvoraf én har særligt stort potentiale. Vi gjorde os mange nye opdagelser og har måttet navigere inden for projektets rammer baseret på de opdagelser vi vurderede mest lovende. Én af de komponenter vi kunne udvinde fra tang viste sig ikke at være kompatibel med en surfaktantsyntese, måske fordi denne ikke kunne udvindes og nedbrydes til en ingrediens med tilstrækkelig høj renhed. Vi løste denne udfordring ved at fokusere på de andre interessante komponenter, der kunne udvindes fra tang.

Vi udviklede protokoller for udvinding af flere komponenter fra tang såsom polysakkarider, lipider etc. Disse blev efterfølgende nedbrydt til kemiske byggesten som var mulige at tage med til næste trin i projektet i form af surfaktantsyntese. Da vi havde fundet metoder til nedbrydning af komponenterne, begyndte vi udviklingen af surfaktantsynteserne. Her gjorde vi opdagelsen af en ny surfaktant, S3, der kunne produceres overraskende klimavenligt sammenlignet med lignende kommercielle surfaktanter. Denne surfaktant blev undersøgt med hensyn til mulige applikationer for at vurdere markedspotentialet. Vi fandt frem til, at dette produkt har et stort potentiale for at revolutionere det globale surfaktantmarked både på performance og bæredygtighed.

2.2 Hovedkonklusion

NorFalk har undersøgt potentialet i de komponenter, der kan udvindes fra tang i forbindelse med produktionen af nye biobaserede surfaktanter. Vi undersøgte fem forskellige komponenter og har ved en eksperimentel fremgangsmåde demonstreret, hvilke der udviste de største potentialer. Her fandt vi frem til at PS1 udviste et moderat potentiale og PS3 udviste et uforudset stort potentiale. Vi konkluderer, at det var muligt at ekstrahere PS1, nedbryde det og anvende det i syntesen af to stabile surfaktanter S1.1 og S1.2. Det var muligt at lave S1.1 med en biokatalytisk fremgangsmåde fremfor en kemisk tilgang, hvilket giver surfaktanten et helt nyt potentiale i forhold til bæredygtig produktion.

Udviklingen af S1.1 gjorde det muligt at udtænke og syntetisere en anden surfaktant, S3. S3 er en anionisk surfaktant og kunne laves ud fra komponenten PS3. Efter succesfuld syntese af S3 udførte vi applikationstests, der viste at S3 er konkurrencedygtig på performance i forhold til kommercielle surfaktanter såsom SLES, rhamnolipid og sophorolipid. Derudover udførte vi indledende beregninger på CO₂-udledning for S3 og strukturelt sammenlignelige surfaktanter på markedet. Beregningerne viser, at S3 udleder markant mindre end rhamnolipid og sophorolipid, når grænserne i beregningerne sættes omkring energiforbrug i syntesetrinnene samt råmaterialerne.

Ved at bruge en biokatalytisk syntese har vi demonstreret produktionen af en ny anionisk surfaktant, der performer lige så godt og udleder markant mindre CO₂ end sammenlignelig surfaktanter på markedet. Disse opdagelser motiverede os til at sammenfatte en patentansøgning, hvori vi har beskrevet både produktionsmetoden, anvendelserne og den specifikke kemiske struktur for S3. Vi indsendte denne ansøgning til det danske patentkontor i marts 2025.

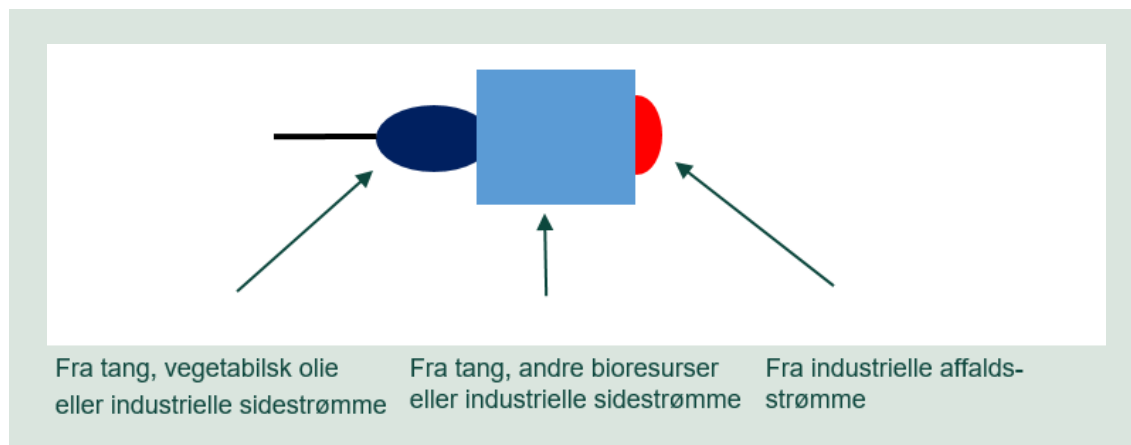
Vores kunder har vist stor interesse for S3, hvorfor vi ønsker at videreudvikle på dette produkt, med det formål at tilføje S3 til vores produktkatalog af surfaktanter og dermed bringe den til markedet.

2.3 Afledte effekter

Den primære afledte effekt fra projektet er udviklingen af den nye surfaktant S3. Denne førte til at NorFalk lige efter afslutningen af MUDP-projektet havde den nødvendige viden og data til at indsende en patentansøgning på både anvendelserne og den kemiske struktur af S3. Dette er et utroligt vigtigt skridt for videreudvikling og kommercialisering af projektets resultater, da vi med denne patentansøgning er sikre på, at opfindelsen er beskyttet fra vores konkurrenter. Det er dog kun det første skridt, da optimering af reaktionen, opskalering, lovpligtige tests og kommercielle samarbejder stadig skal foretages, før den fulde effekt kan opnås. For at nå til dette punkt, er der behov for yderligere tilskud i senere projekter. Vores kunder har allerede vist høj interesse for S3, hvorfor vi er meget interesserede i at videreudvikle produktionen af S3. Det overordnede formål er at kunne tilføje S3 til vores produktkatalog og bringe den til markedet.

Derudover har NorFalk også fået et yderligere udbytte ved at få mere erfaring i brugen af restmaterialer såsom tang. Dette er delvist afledt af MUDP projektet og har gjort os bedre i stand til at identificere de mest lovende restmaterialer både i form af kemisk gruppe og ved at forstå hvilke urenheder, der typisk giver udfordring for vores proces.

Dette projekt havde til formål at udvinde resurser fra tang til brugen af surfaktantsyntesen, og den primære opdagelse i projektet er udsprunget fra dette mål. Vi har sidenhen identificeret andre og mere velegnet kilder til ingredienserne for denne specifikke surfaktant, se FIGUR 2. Vi vurderer, at videreudviklingen af S3 til et kommercielt niveau kan muliggøres med yderligere økonomisk støtte fra MUDP.



FIGUR 2. Udbytte af projektet – anionisk surfaktant S3. Figuren viser en illustration af den mest lovende surfaktant udviklet i projektet. Det er specificeret, hvilke resurser der kan udnyttes til anskaffelse af de forskellige dele af surfaktanten.

2.4 Perspektivering

Markedet for bæredygtige surfaktanter er under-innoveret og hungre efter nye bæredygtige surfaktant-alternativer, der både kan levere på produkt-egenskaber, men også er konkurrencedygtig på pris. Der bliver årligt produceret omtrent 23 millioner tons af surfaktanterne SLES, SLS og LAS som tilsammen står for en tredjedel af det globale surfaktantmarked, og alle tre surfaktanter er belastende for miljøet. [1] Ingredienserne til at producere SLS og SLES bliver blandt andet udvundet fra palmeolie, hvilket er associeret med

skovrydning og store CO₂-udledninger. Palmeolien bliver behandlet med ædelmetaller, højt tryk og eksplosive gasser, for at kunne anvendes til surfaktantsynteserne. Produktionen af SLES er også afhængig af brugen af ethylenoxid, hvilket giver kemikaliet 1,4-dioxan som sideprodukt. Dette stof ender i det færdige produkt og skylles dermed ud i grundvandet. Målinger viser at koncentrationen af 1,4-dioxan i floder er stadigt stigende, hvilket er et problem da kemikaliet er karcinogent og ikke bionedbrydeligt. [2] LAS lider under den udfordring af den ikke kan nedbrydes under anaerobe betingelser samtidig med at surfaktanten er giftig overfor vandlevende organismer. Surfaktanten ophobes altså i bundslam og andre anaerobe miljøer, hvilket kan udgøre en trussel for de vandlevende organismer hvis disse mængder frigives fra slammet. [3] Klimavenlige alternativer som rhamnolipid udviser lav til middel niveau af performance i de fleste anvendelser og surfaktanterne udviser irritation af øjne og hud. Prisen på disse klimavenlige alternativer ligger på 15–30 EUR/kg, hvilket er op til 10 gange dyrere end andre surfaktanter.

NorFalk bestræber sig på at imødekomme de udfordringer som nutidens største surfaktanter lider under. Vi vil udvikle nye bæredygtige surfaktanter med så lavt miljøaftryk som muligt, uden at gå på kompromis med performance. Vi mener, at vi har opdaget en ny biobaseret surfaktant, S3, som imødekommer disse krav. Hvis vores kunder udskifter surfaktanter som SLES, SLS og LAS i deres formuleringer, vil hele værdikæden i surfaktantbranchen opleve følgende:

- markant reduktion af CO₂-udledning
- ingen udledning af karcinogene kemikalier
- ingen ophobning af stoffer i slam, der er giftige for vandlevende organismer
- ingen skovrydning
- ingen forbrug af fossile ingredienser
- milde ingredienser, der skal i kontakt med øjne og hud

NorFalk håber på at en implementering af denne bæredygtige surfaktant på markedet, vil inspirere de store surfaktantproducenter til at fokusere på udviklingen af klimavenlige surfaktanter. Surfaktanter produceres på så stor skala, at selv en minimal reduktion af deres miljøaftryk vil have en markant effekt på miljøet. Vores tilgang til at adressere dette emne, er at udvikle S3 til et volumenprodukt. Jo større mængder et klimavenligt produkt kan produceres i, des større indflydelse på de globale klimaudfordringer vil produktet have. Vi formoder at vi med en produktion på 20.000 tons/år vil kunne opnå en pris på 5 EUR/kg for S3, hvilket vil give en omsætning på 100 mio EUR. Denne omsætning vil åbne op for 100 nye jobs i forbindelse med den kontinuerlige produktion af denne surfaktant. Vi er ved at søge om flere fondsmidler fra MUDP til videreudviklingen af S3. Denne ansøgning kortlægger udviklingsprocessen og uddyber, at vi forventer at have S3 i produktion i året 2028.

3. Afrapportering på aktiviteter

3.1 Oversigt over teamet i projektet

FIGUR 3 giver en oversigt over, hvordan teamet i dette projekt er opstillet med de forskellige roller.



FIGUR 3. Oversigt over projektstyring i projektet. Figuren viser opbygningen af teamet, der har samarbejdet om udførelsen af projektet.

3.2 Oversigt over produkter

FIGUR 4 illustrerer, hvilke komponenter (polysakkarider, fedtstoffer og proteiner), der blev ekstraheret fra tang i løbet af projektet. Næste række viser, at alle disse komponenter skulle nedbrydes til mere aktive former, for at kunne bruges i de efterfølgende surfaktantsyntesen. Polysakkariderne (PS) blev nedbrudt til monosakkarider (mPS), fedtstoffer blev nedbrudt til forskellige former af nedbrudte fedtstoffer og proteiner blev nedbrudt til aminosyrer. Til sidst vises de afledte surfaktanter fra de tilsvarende komponenter. De nedbrudte fedtstoffer, blev anvendt til syntesen af S3 og S4, ved at kombinere de nedbrudte fedtstoffer med de tilsvarende kemiske bestanddele.

Oprindelig bioresurse	Tang				
Kemiske komponenter	PS1	PS2	PS3	Fedtstoffer	Proteiner
Kemiske bestanddele	mPS1	mPS2	mPS3	Nedbrudte fedtstoffer	Aminosyrer
Surfaktanter	S1.1 S1.2	S2	S3 og S4		

^aPS = polysakkarid, mPS1 = monosakkarid fra polysakkarid1, S1 = surfaktant1

FIGUR 4. Oversigt over produkter i projektet^a. Dette flowdiagram viser 5 forskellige komponenter, der kan ekstraheres fra tang, hvilke kemiske bestanddele de kan nedbrydes til og hvilke surfaktanter, der kan syntetiseres derefter.

3.3 Arbejdspakke 1: Projektledelse

Formålet med arbejdsplanen 1 var at løbende kontrollere fremgangen af projektet via projektledelse. Vi valgte at udføre projektledelsen med den agile Kanban-metode. Vores Kanban-metode indebærer at holde en række møder med faste intervaller.

- Morgenmøde (15 minutter) hver morgen, hvor hver enkel medarbejder i teamet fortæller om dagens planer samt gårsdagens fremskridt. Formålet med dette møde var at alle i teamet skulle have et overblik over, hvad andre i teamet lavede og hvornår de forskellige medarbejdere var tilgængelige til eventuelle diskussioner. Morgenmøderne bidrog dermed med risikostyring af projektet da afvigelser hurtigt kunne opdages og diskuteres i gruppen for at sikre en fælles retning.
- Review (30 minutter) hver anden uge, hvor hver enkelt projektdeltager fortæller om, fremskridt og udfordringer over de sidste 14 dage (med udgangspunkt i kanban-boardet) og perspektiverer eventuelle fremskridt til det kommercielle niveau.
- Retrospective (2 timer) hver fjerde fredag. Til dette møde diskuteres, hvordan teamet arbejder sammen og vi finder frem til bedre måder at arbejde sammen på.

Kanban-metoden indebærer også at visualisere teamets individuelle og fælles arbejdsopgaver på et online kanban-board. Der oprettes en opgave som placeres i fanen "Backlog", hvorefter en medarbejder tager ansvar for opgaven og rykker den til fanen "Requested". Når den ansvarlige er klar til at påbegynde opgaven, rykkes den videre til fanen "In progress", hvis der opstår komplikationer, hvor den ansvarlige skal vente på respons (f.eks. svar på email eller resultat på et eksperiment), så placeres opgaven under fanen "Q&A". Når opgaven er løst, placeres den i fanen "Done". Under Review-mødet vil alle opgaver under fanen "Done" blive fremlagt og arkiveret, hvis de relevante i temaet er enige i at opgaven er løst tilfredsstillende.

Udover de faste møder i forbindelse med Kanban-metoden, så blev der holdt styregruppemøder hver 6. måned, hvor alle projektdeltagere deltog og diskuterede status på projektet samt planlagde videre forløb.

Formålet med at bruge disse forskellige typer møder som værktøj til projektledelse er for at sikre at alle i teamet er opdateret på projektets fremdrift og orienteret omkring de vigtigste detaljer og eventuelle ændringer i den overordnede plan. Møderne foretages også for at diskutere mulighederne fremadrettet og for at lave fælles risikovurderinger, f.eks. hvis nogle eksperimentelle resultater antyder komplikationer i den overordnede plan.

Projektet er blevet repræsenteret gennem flere præsentationer for studerende, netværksgrupper, branche og industripartnere og særligt ved deltagelse af konferencer, hvor målgrupperne har været kunde-, samarbejde- og konkurrentsegmentet. Foruden interessen i det faglige projekt har MUDP som tilskudsmulighed også inspireret samarbejdspartnere til fremtidige projekter som kunne være relevante at søge tilskud til. MUDP har dermed bidraget med at åbne samarbejdsmuligheder på tværs i branchen både nationalt og med europæiske partnere.

3.4 Arbejdspakke 2: Udvinning

Formålet med arbejdspakke 2 var at udvinde forskellige stoffer, der kan udnyttes som ingredienser i produktionen af bæredygtige surfaktanter.

3.4.1 Metoder anvendt til analyse

Analysemetoder som "fourier transform infrared spectroscopy" (FTIR), "ultraviolet-visible spectrophotometry" (UV-Vis), tyndtlagskromatografi (TLC) og "high-performance liquid chromatography with ultraviolet detection" (HPLC-UV) blev anvendt til at vurdere renheden og den korrekte kemiske struktur af produkterne i løbet af projektet. Disse metoder blev anvendt både i forbindelse med udvinning, nedbrydning og surfaktantsynteserne.

FTIR er en metode, der anvendes til undersøge de kemiske bindinger og funktionelle grupper i en prøve. Den udnytter infrarødt lys som de kemiske bindinger kan absorbere og kan benyttes på produkter på både fast-, flydende- og gasform. Metoden anvendes sjældent til kvantificering, hvorfor FTIR blev anvendt kvalitativt til verificering af de kemiske stoffer i nedbrydningsproduktet.

UV-Vis benyttes også til at bestemme kemisk struktur, men til forskel fra FTIR benyttes dette instrument meget ofte til kvantificering. Metoden bruger lys i det ultraviolette og synlige spektrum, hvor prøven absorberer nogle af bølgelængderne. Dette vil give et spektrum specifikt for denne prøve og baseret på intensiteten af det absorberede lys, så kan man bestemme koncentrationen af produktet i prøven. Ulempen ved denne metode er at prøven skal opløses i et opløsningsmiddel som er kompatibelt med metoden og den specifikke prøve.

TLC anvendes til at separere de forskellige molekyler i prøven baseret på deres polaritet. Det er en simpel og hurtig metode, der giver et overblik over, hvor mange forskellige molekyler, der er til stede i både store og små mængder i prøven. Det kan også lade sig gøre at verificere den kemiske struktur af de forskellige molekyler i prøven, hvis man er i besiddelse af referenceprøver. Ulempen ved denne metode er at den sjældent benyttes til kvantificering.

HPLC-UV er en avanceret version af TLC-metoden. HPLC-metoden kan også separere de forskellige molekyler baseret på deres forskellige polariteter, men har en højere sensitivitet. Det er altså muligt at detektere meget små mængder af urenheder med HPLC. Når denne metode er koblet med en UV-detektor så får man også et UV-spektrum for hvert enkelt molekyle, der detekteres i prøven. Denne metode er ofte anvendt til kvantificering. Ulempen ved metoden er at molekyler, der ikke er UV-aktive, kan ikke detekteres.

3.4.2 Klargørelse af tang

For at kunne udvinde forskellige biomolekyler af tanget skal tanget først renses, tørres og findeles. I første omgang blev der indkøbt kommercielt tørret og rensed tang for at have et nemt og mere reproducerbart udgangspunkt for det forestående udviklingsarbejde. Vi forsøgte forskellige metoder til at lave en homogen findeling af tanget, og fandt frem til en mekanisk metode, der gav et reproducerbart resultat baseret på undersøgelser med sigter i forskellige maskestørrelser. Herefter var de biologiske råmaterialer klar til udvikling af udvindingsprocessen. For at verificere metoden indsamlede vi tang på stranden ved Risskov som gennemgik processen og blev nedbrudt som den kommercielt tilgængelige tørre tang.

Den kommercielt tilgængelige tang blev anvendt fremadrettet for at effektivisere den videre udvikling i de efterfølgende arbejdsplaner.

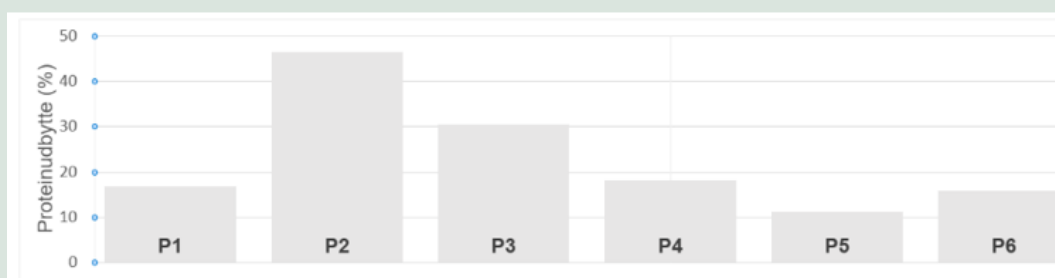
3.4.3 Udvinning af fedtstoffer

Først fokuserede vi på at udvinde fedtstoffer fra tangen. Dette lykkedes med en simpel metode, hvor de organiske opløsningsmidler kunne bruges i små mængder og blive recirkuleret til efterfølgende udvindinger. Fedtstofferne blev analyseret med TLC og FTIR for at verificere at den korrekte type fedtstoffer var blevet ekstraheret i tilfredsstillende renhed.

3.4.4 Udvinning af protein

Herefter fokuserede vi på udvinning af protein. Optimering af parametre som pH, temperatur og koncentration endte med at give et fint resultat på testskala. Ved brug af en standard Bradford analyse til kvantificering kunne vi udføre en optimering af flere parametre for udvindingen. Bradford analyse kræver et UV-Vis spektrofotometer.

Den første screening af parametre blev udført ved at have tangen i et standard opløsningsmiddel ved en bestemt temperatur og derefter ændre én parameter ad gangen. Disse parametre inkluderer justering af pH, koncentrationer, støkiometri, omrøringsmetode og additiver. Vi fandt frem til at parameter 2 og 3 (P2 og P3) gav henholdsvis 45% og 30% protein udvundet af tangen.



^aP1 = parameter 1, P2 = parameter 2 osv.

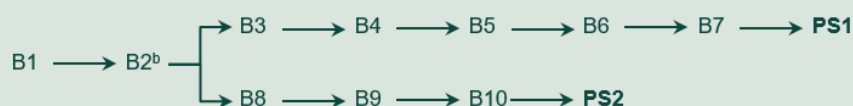
FIGUR 5. Identificering af vigtige parametre under proteinudvinding fra tang^a. Søjlediagrammet viser udbytter i vægt% ved de forskellige behandlingsmetoder.

Vi udførte derefter en screening af disse to parametre og fandt frem til et optimum, der gav et udbytte på 82% udvundet protein fra tang. I løbet af denne screening identificerede vi vigtigheden af en ottende parameter (P8), som blev screenet efter optimeringen af P2 og P3. Det resulterede i et udbytte på 92% udvundet protein på testskala.

Efter succesfuld proteinekstraktion på testskala foretog vi en opskalering af processen, så vi kunne lave præparative mængder af proteinet. Opskaleringseksperimentet gav et tilfredsstillende udbytte på 74%, til gengæld var renheden af det tørrede protein ikke tilfredsstillende. Videreudvikling af oprensningsprotokollen er nødvendig, for at kunne ekstrahere proteinet med tilstrækkelig høj renhed.

3.4.5 Udvinning af polysakkarider

Størstedelen af tang består af polysakkarider (PS) og primært to forskellige PS'er (PS1 og PS2) udgør størstedelen af denne type tang. Ligesom for proteinudvindingen blev der undersøgt vigtigheden af forskellige parametre og der blev udviklet en proces for udvinding af både PS1 og PS2. Det lykkedes at udvikle en protokol, hvor både PS1 og PS2 kunne udvindes fra den samme batch tang, med det formål at øge udnyttelsen af råmaterialerne.



^aB1 = behandling 1, B2 = behandling 2 osv.

^bPrøven blev delt op i to dele efter denne behandling.

FIGUR 6. Flowdiagram for udvinding af PS1 og PS2^a. Figuren viser et flowdiagram med de trin, der skulle udføres for at ekstrahere hhv. PS1 og PS2 fra den samme batch tang.

Denne protokol blev udført og testet på gram skala. To behandlinger (B3 og B6) i flowdiagrammet for udvinding af PS1 var i fokus under de indledende undersøgelser, se TABEL 1. B3 blev undersøgt ved at tilføje et reagens til prøven i forskellige mængder og lade blandingen omrøre i en fast tidsperiode og fast temperatur. Vi fandt frem til at lave mængder af reagentet gav lave udbytter men høj renhed, hvor store mængder gav højere udbytte men lav renhed, hvor renheden blev vurderet kvalitativt ved brug af TLC. Vi konkluderede, at den bedste protokol var med lav mængde af det tilførte reagens, da vi prioriterede høj renhed fremfor højt udbytte.

TABEL 1. Optimering af B3. Tabellen viser resultaterne af optimeringen af trin B3 i forbindelse med udvinding af PS1.

Reagens tilføjet ^a	Udbytte af PS1
0%	3%
1%	21%
3%	45%
5%	58%

^aVægt% sammenlignet med tang

Under optimeringen af B6 testede vi effekten af tre forskellige reagenser. Vi undersøgte hvilket reagens, der virkede bedst i denne behandling. Herefter valgte vi ét reagens, der virkede bedre end de andre som også udviste både mildere betingelser og højere miljøvenlighed.

Det viste sig at være B1, der var det vigtigste trin i udvindingen af PS2, hvorfor vi valgte at fokusere på dette trin. To forskellige metoder blev testet. I metode 1 øgede vi også temperaturen gradvist fra 55 til 77 °C i løbet af behandlingstiden på 3 timer. I metode 2 brugte vi en fast temperatur i løbet af hele eksperimentet. Vi fandt ud af at metode 2 gav en fordobling af udbyttet, hvorfor vi valgte at fortsætte med denne metode. Vi fandt også ud af, at udvindingen af PS2 gav nogle rester, som kunne recirkuleres i processen en enkelt gang for at udvinde mere PS2.

TABEL 2. Optimering af B1 for udvinding af PS2^a. Tabellen viser resultaterne af optimeringen af trin B1 i forbindelse med udvinding af PS2.

Metode	Temperatur	Tid	Udbytte af PS2
1	55–77 °C ^b	3 timer	10%
2	77 °C	3 timer	19%

^aAlle eksperimenter blev udført i duplikater og udbyttet er angivet som et gennemsnit af de to eksperimenter.

^bTemperaturen blev øget fra 55 til 77 °C i løbet af de 3 timer i denne metode.

Vi udførte en fuld udvinding af både PS1 og PS2 fra 2 g tang, da de vigtige behandlingstrin i flowdiagrammet var blevet optimeret. Det kunne lade sig gøre at udvinde PS1 og PS2 i udbytter på henholdsvis 21% og 23% og begge prøver havde høj renhed vurderet ud fra FTIR analyse. Dette resultat var tilfredsstillende grundet den høje renhed af polysakkariderne og vi besluttede at gå videre til næste trin i projektet.

Udover PS1 og PS2, som udgør størstedelen af tang, blev der også identificeret en tredje polysakkarid, PS3. Dette stof er til stede i mindre mængder i tang, men en opdagelse, der blev gjort senere i projektet, gør at PS3 alligevel har meget stor interesse. Udvinning og senere nedbrydning af PS3 blev ikke undersøgt eftersom denne opdagelse blev gjort sent i projektet. På det tidspunkt havde vi fokus på syntesen af den tilsvarende surfaktant fra kommercielt tilgængelige ingredienser.

3.5 Arbejdspakke 3: Syntese og oprensning

Formålet med arbejdspakke 3 var at:

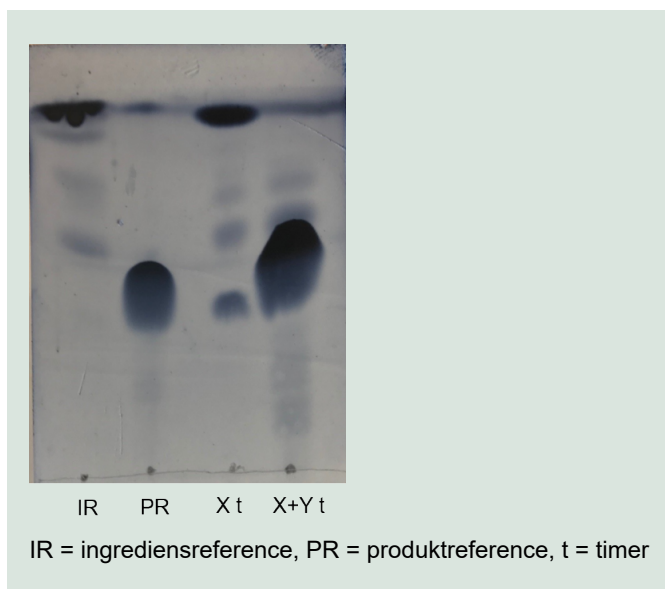
- Nedbryde de biologiske makromolekyler udvundet i arbejdspakke 2 til små enheder som kunne bruges i den efterfølgende surfaktantsyntese (nedbrydning af polymerer til monomerer)
- Udvikle en syntetisk metode til at omdanne de biologiske råmaterialer til surfaktanter
- Udvikle oprensningsprotokoller for at få høj renhed af surfaktanterne og klargøre dem til brug i formuleringer og applikationstests.

Nedenfor vil der blive beskrevet i detaljer, hvordan vi har opnået disse mål.

3.5.1 Nedbrydning af fedtstoffer

Efter fedtstofferne var blevet ekstraheret i arbejdspakke 2 skulle prøven nedbrydes til en form som var anvendelig i de efterfølgende surfaktantsynteser. For at optimere nedbrydningstrinnet valgte vi at udføre undersøgelsen på en kommercielt tilgængelig analog af den ekstraherede fedtstofprøve fra arbejdspakke 2.

Nedbrydningen blev først udført og undersøgt på testskala, hvor vi fandt frem til de reaktionsbetingelser, der skulle til for at opnå den ønskede nedbrydning. Vi undersøgte forløbet af nedbrydningen med TLC-analyse. Vi brugte både start fedtstoffet (IR) og det ønskede produkt (PR) som referencer under analysen, og vi undersøgte nedbrydningen efter X timer og igen senere efter X+Y timer. Analysen viste at IR ikke længere var fuldt nedbrudt efter X+Y timer, se FIGUR 7.



FIGUR 7. TLC-analyse af nedbrydningen af fedtstofferne. Figuren viser forløbet af nedbrydningen af fedtstofferne fra tid X til X+Y (målt i timer). Figuren angiver også renheden af de nedbrudte fedtstoffer.

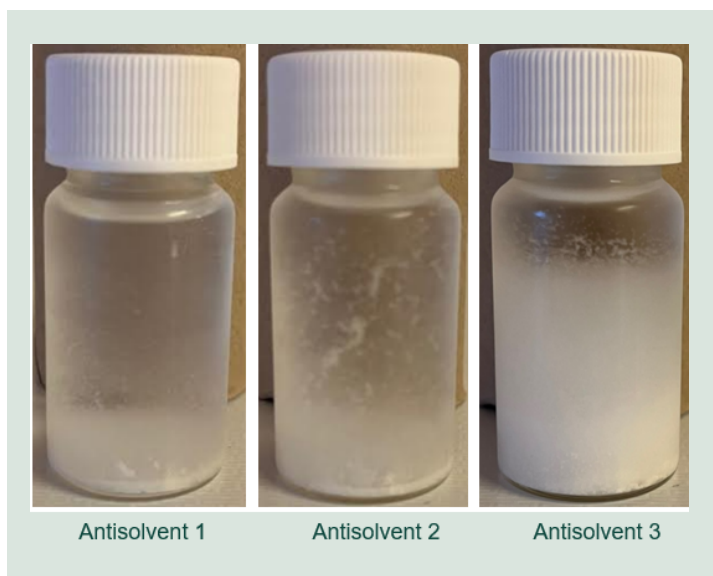
Herefter fokuserede vi på opskalering af metoden til 5 kg skala. I løbet af opskaleringen viste det sig at denne type omrøring ikke var skalerbar. Vi blev derfor nødt til at investere i udstyr, så vi kunne opnå kraftigere omrøring. Med denne optimering blev det muligt at udføre nedbrydningen af 5 kg fedtstof med et udbytte på 81%. Dette var et meget tilfredsstillende resultat, da nedbrydningsproduktet udviste høj renhed, korrekt kemisk komposition og processen var simpel og billig.

Nedbrydningsproduktet af fedtstofferne skulle bruges til de efterfølgende surfaktantsynteser af S3. Dette var muligt, da vi kunne udføre nedbrydningen på så stor en skala.

3.5.2 Nedbrydning af PS1 til mPS1

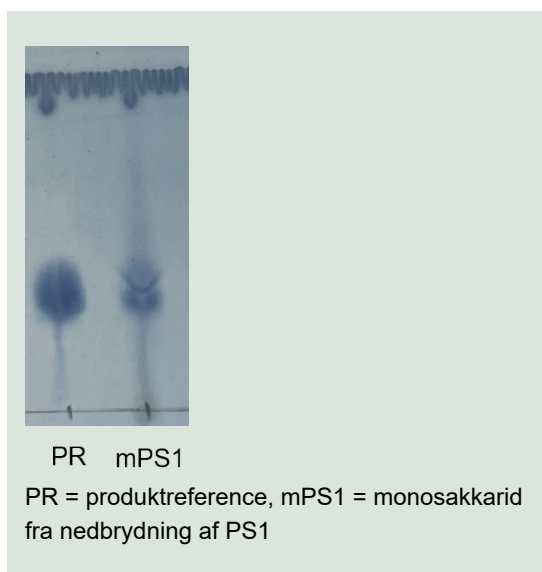
Efter succesfuld nedbrydning af fedtstofferne fokuserede vi på at udvikle en metode til nedbrydning af PS1.

PS1 udviste høj stabilitet over for uhensigtsmæssig nedbrydning. Det var altså muligt at finde betingelser, der selektivt kunne nedbryde polymerstrukturen til den ønskede monomerstruktur (mPS1) uden at danne uønskede sideprodukter. Parametre som pH, koncentration, temperatur og tid blev testet og vi fandt frem til de vigtigste parametre. Vi startede en optimering, hvor vi primært fokuserede på udfældning af mPS1. Vi testede forskellige udfældninger og fandt frem til den bedste metode, som gav et fint hvidt pulver når vi brugte kommercielt tilgængeligt PS1. FIGUR 8 viser tydeligt, at antisolvent 3 var det bedste egnede til udfældning af mPS1.



FIGUR 8. Udfældningstest af mPS1. Figuren viser effektiviteten af udfældningen af mPS1 med forskellige antisolventer.

Herefter udførte vi den samme nedbrydningsprotokol for PS1 som vi selv havde udvundet fra tang. Det lykkedes at isolere mPS1 med et udbytte på 17%. Renheden af prøven blev undersøgt med både TLC- og FTIR-analyse og blev fundet tilfredsstillende, se FIGUR 9.



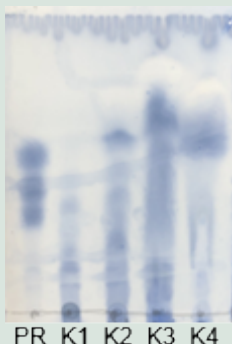
FIGUR 9. TLC-analyse af mPS1 fra PS1 udvundet fra tang. Figuren viser nedbrydningen af PS1 til mPS1. Figuren angiver også renheden af de mPS1.

TLC-analysen i FIGUR 9 samt konfidentielle FTIR-analyser viste tydeligt, at vi havde opnået den ønskede kemiske struktur for mPS1. Yderligere, så fandt vi også frem til, hvorledes nedbrydningsbetingelserne kunne modificeres til at give tre forskellige kemiske former af mPS1. Dette blev verificeret ved at sammenligne vores prøver med de tilsvarende referencer.

Disse forskellige former af mPS1 har hver deres fordele og ulemper, og de muliggør forskellige metoder til at opnå den endelige surfaktant.

3.5.3 Nedbrydning af PS2 til mPS2

PS2 udviste lavere stabilitet end PS1 under nedbrydningsbetingelserne. Vi undersøgte de samme parametre som for nedbrydningen af PS1 og fandt frem til betingelser, der kunne nedbryde polymerstrukturen til den ønskede monomerform (mPS2), men andre uønskede monomerformer blev også detekteret. mPS2 blev dannet i ca. samme mængde som de uønskede monomerformer (se FIGUR 10), og det blev derfor besluttet at resultatet var tilfredsstillende på dette tidspunkt i udviklingsarbejdet. FIGUR 10 viser undersøgelsen af nedbrydningen af PS2 til mPS2, hvor 4 forskellige koncentrationer af et bestemt reagens blev anvendt. K3 viste sig at give mest nedbrydning af PS2.



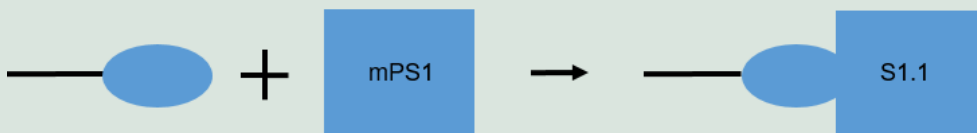
PR = produktreference, K1 = koncentration 1, K2 = koncentration 2, K3 = koncentration 3

FIGUR 10. TLC-analyse af mPS2 fra PS2 udvundet fra tang. TLC-analysen viser nedbrydningen af PS2 til mPS2 og uønskede sideprodukter. Referencen her er tre forskellige variationer af det ønskede mPS2, hvorfor der er tre spots.

Det er dog nødvendigt med yderligere optimering af denne nedbrydningsprotokol. Det blev valgt at udskyde optimeringen af denne nedbrydningsprotokol til efter en kortlægning af surfaktanter baseret på mPS2 og deres egenskaber i personal care og home care produkter.

3.5.4 Syntese af S1.1 fra mPS1

Resultaterne fra både udvinding- og nedbrydningsundersøgelserne i arbejdsmappe 2 viste klart og tydeligt, at det var mest lovende at arbejde videre med PS1. Det blev derfor besluttet at fokusere syntesearbejdet på udvikling af PS1-baserede surfaktanter. To grupper af surfaktanter (S1.1 og S1.2) blev udtænkt og syntesebetingelserne for disse forskellige typer af surfaktanter blev undersøgt på testskala. De indledende eksperimenter blev udført med kommercielt tilgængelige former af mPS1 fremfor de materialer, som vi selv havde udvundet og nedbrudt fra tang.



FIGUR 11. Illustration af syntesen af surfaktant S1.1. Figuren illustrerer, hvordan den lipofile del og hydrofile del (mPS1) kobles sammen i løbet af surfaktantsyntesen.

Vi startede med at syntetisere S1.1 i ét enkelt kemisk trin fra kommercielt mPS1. Efter oprensning af denne S1.1 på testskala udførte vi stabilitetsundersøgelser. Disse stabilitetsundersøgelser vil blive beskrevet i detaljer i arbejdsmappe 4.

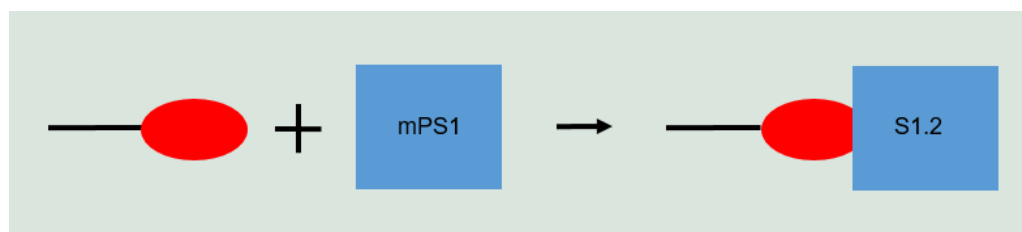
Vi opdagede at S1.1 var for ustabil til at kunne blive anvendt i kommercielle produkter. Vi gik derfor videre til næste logiske trin, som var at syntetisere en mere stabil form af S1.1. Det viste sig, at den ønskede struktur af en stabil S1.1 var besværlig at lave med en klassisk kemisk syntese, eftersom vi ikke kunne identificere en metode med tilfredsstillende regioselektivitet. Vi overvejede derfor en alternativ tilgang.

Vi testede en biokatalytisk metode, som viste sig at være meget bedre egnet og mere selektiv end den kemiske metode. Dette var et meget interessant resultat. Med en biokatalytisk metode til at syntetisere disse surfaktanter blev der åbnet op for en højere grad af bæredygtighed primært på grund af de milde reaktionsbetingelser og få til ingen sideprodukter. Denne metode gjorde det muligt at sænke temperaturen og undgå brugen af kemisk fremstillede ingredienser og dermed opnå endnu højere CO₂-besparelser end sammenlignet med traditionelle kemiske metoder. Samtidig giver det også muligheden for at lave surfaktanter med højere selektivitet eftersom disse processer ofte bliver udført ved lavere temperaturer. Selektivitetsforøgelsen skyldes også den måde enzymerne fungerer på. Det aktive site i et enzym fungerer ved at orientere molekylerne således at de kun kan kobles sammen på én måde. Dette resulterer i et uniformt surfaktantprodukt, hvilket giver anledning til mere kontrolleret funktionalitet og bionedbrydelighed. Højere selektivitet i processen resulterer også i mindre dannelse af sideprodukter og dermed en simplere oprensningsprotokol, hvilket igen resulterer i CO₂-besparelser og en overordnet billigere produktion. Denne nye biokatalytiske metode satte tankerne i gang og en ny og mere interessant surfaktant, S3, blev udtænkt (se forklaring i kapitel 3.5.7).

3.5.5 Syntese af S1.2 fra mPS1

Da vi opdagede, at den første struktur for S1.1 var ustabil lagde vi flere planer for at kunne syntetisere en stabil surfaktant fra mPS1. Den ene løsning er beskrevet ovenfor og den anden løsning er denne surfaktant, S1.2, som beskrevet herunder.

S1.1 blev produceret ved at koble mPS1 med én bestemt type fedtstof, hvilket gav den ustabile struktur. S1.2 blev produceret ved at koble mPS1 med en anden type fedtstof. Denne type fedtstof skulle give en sammenlignelig struktur med S1.1 men med højere stabilitet. Vi syntetiserede S1.2 på testskala med en almindelig kemisk metode. Analyser viste at den ønskede surfaktant blev lavet, hvorfor vi udførte en oprensning på testskala. Dette gav en stor nok mængde af S1.2 til at kunne teste stabiliteten (beskrevet i arbejdsmappe 4). Vi fandt frem til at koblingen af mPS1 med denne type fedtstof gav en surfaktant med høj stabilitet.

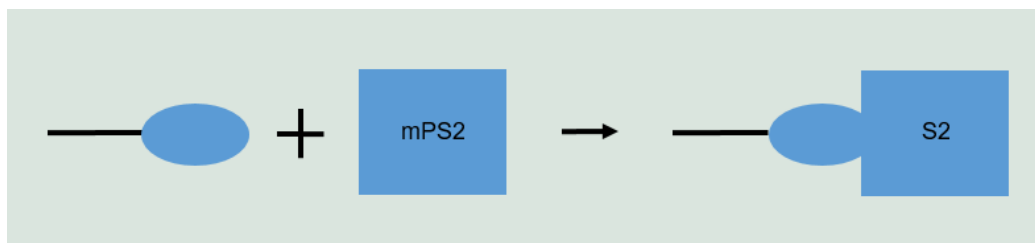


FIGUR 12. Illustration af syntesen af surfaktant S1.2. Figuren illustrerer, hvordan den lipofile del og hydrofile del (mPS1) kobles sammen i løbet af syntesen. Bemærk at den lipofile del af S1.2 er anderledes end for S1.1.

3.5.6 Syntese af S2 fra mPS2

Med inspiration fra både den kemiske og den biokatalytiske metode beskrevet ovenfor forsøgte vi, at syntetisere S2 med udgangspunkt i kommercielt tilgængelig mPS2. Det viste sig

dog at være svært at lave S2, hvilket skyldtes den kemiske struktur af mPS2. Dette monosakkarid havde ikke de kemiske egenskaber, der var nødvendige for syntese af en surfaktant med milde og miljøvenlige metoder. Denne udfordring kombineret med det faktum at nedbrydningen af PS2 til mPS2 skabte uønskede sideprodukter gjorde, at vi havde svært ved at se denne surfaktant nå markedet indenfor en fornuftig tidsramme. Målet om at lave S2 blev altså opgivet.



FIGUR 13. Illustration af forsøg på syntesen af surfaktant S2. Figuren illustrerer, hvordan den lipofile del og hydrofile del (mPS2) kobles sammen i løbet af surfaktantsyntesen.

3.5.7 Syntese af S3 fra mPS3

Som nævnt i kapitel 3.5.4 opdagede vi, at S1.1 kunne syntetiseres med en biokatalytisk metode i stedet for kemisk. Dette åbnede op for muligheden for at producere denne type surfaktant med en høj grad af miljøvenlighed. Vi gik derfor i gang med at udforske disse muligheder, og vi udtænkte en to-trins-syntese af en ny anionisk surfaktant, S3. Syntesen af S3 krævede to trin, både et biokatalytisk og et kemisk trin. De molekylære byggesten, nødvendige for at lave S3, kan udvindes fra mange biologiske råstoffer heriblandt tang. PS3 kan nedbrydes til mPS3 som koblet med fedtstofferne fra tang vil give S3.

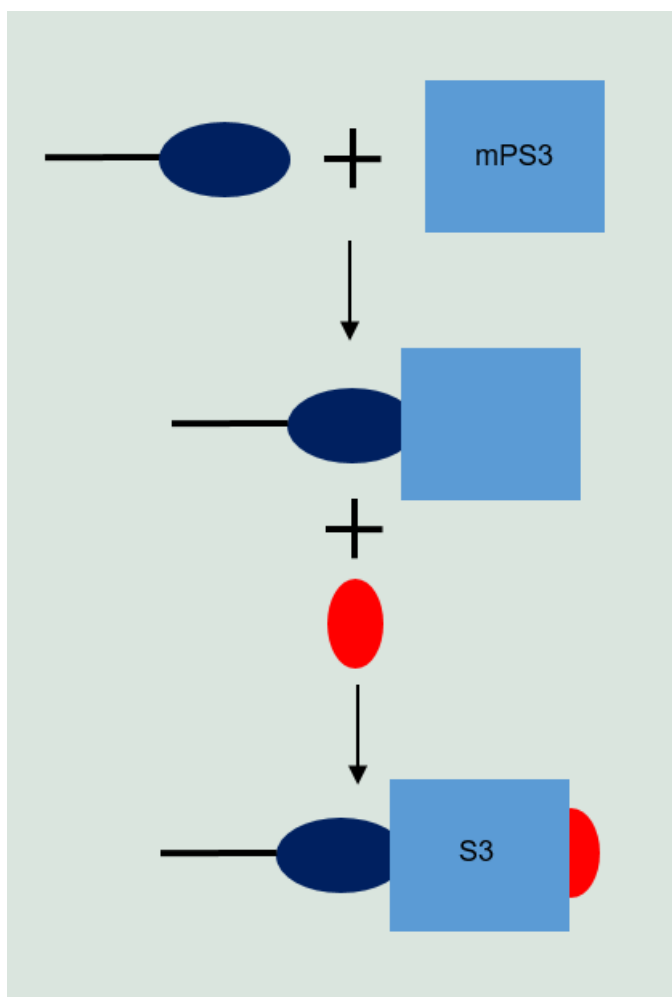
Vi anskaffede os kommercielt tilgængeligt mPS3 og testede den biokatalytiske metode under en syntese af S3. Til vores store fornøjelse virkede denne syntesemetode også for mPS3 som substrat. Vi mødte dog udfordringer i løbet af undersøgelsen af dette første trin i syntesen. Én af udfordringer var opløseligheden af mPS3. Den biokatalytiske metode fungerer sådan, at der er mulighed for at vælge imellem flere forskellige typer af opløsningsmidler. Nogle opløsningsmidler fungerer generelt godt til den biokatalytiske metode, hvor andre opløsningsmidler fungerer godt til at opløse mPS3. Desværre er kombinationen af de to egenskaber ikke helt oplagt. Vi har brugt meget tid på at undersøge, hvilket opløsningsmiddel samt kombinationen af flere opløsningsmidler, der ville give den bedste balance mellem opløselighed af mPS3 samtidig med at det understøtter den biokatalytiske metode. Dette var en svær opgave, men vi endte med at finde en løsning, der gav et godt resultat.

Da dette er en to-trins-syntese betød det, at vi også skulle finde en måde at overføre produktet fra det første trin til det andet trin. To-trins-synteser er helt almindelige i produktionen af denne slags produkter, men det er ikke givet, at de to trin er compatible med hinanden. De to trin, nødvendige for at lave S3, var ikke direkte compatible, hvorfor vi måtte udvikle en oprensningsprotokol for at kunne overføre produktet fra første trin til det næste. Vi fokuserede på at lave denne oprensning så simpel og hurtig som muligt, og vi endte med en protokol kun bestående af tre standard enhedsoperationer. Under opskalering til produktionsskala er det meget vigtigt at tilpasse processen til så få enhedsoperationer som muligt (og helst standard enhedsoperationer) for at holde prisen på det endelige produkt nede.

Vi fokuserede på optimering af det andet trin efter udviklingen af oprensning mellem de to trin var fuldendt. Først fandt vi et model-substrat, som vi ville bruge i den første del af optimeringen. Her var der fokus på parametre som støkiometri, temperatur, koncentration og aktivator. Efter en grundig undersøgelse af disse parametre fandt vi en række betingelser, der

gav fuld omdannelse af model-substratet til model-produktet. Herefter forsøgte vi at overføre disse betingelser til vores eget substrat. Den første udfordring vi oplevede, var igen opløselighed. Opløsningsmidlet, der fungerede for model-substratet, virkede ikke for vores substrat. Vi undersøgte derfor andre og fandt frem til et egnet opløsningsmiddel for vores substrat. Derefter opdagede vi at måden vi blandede ingredienserne på for model-substratet, ikke fungerede for vores, hvorfor vi måtte undersøge, hvordan disse ingredienser kunne blandes bedst muligt. I løbet af udviklingen af dette syntesetrin isolerede vi S3 fra reaktionsblandingen. Det isolerede produkt blev brugt til identificering og karakterisering af den kemiske struktur af molekylet. Vi brugte analytisk udstyr som UV-Vis, HPLC og FTIR (fortroligt data). UV-Vis analysen viste absorptioner ved de forventede bølglængder og FTIR viste signaler, der korresponderer til de kemisk funktionelle grupper vi forventede at have i S3. HPLC-analysen gav et overblik over de forskellige isomerer af S3 samt en UV-analyse af hver enkelt isomer i reaktionsblandingen.

Da vi havde løst førnævnte udfordringer, havde vi en protokol for at omdanne vores substrat til S3 med et tilfredsstillende udbytte. Vi opnåede ikke fuld omdannelse af vores substrat (som vi gjorde for model-substratet), men processen var god nok til at initiere udviklingen af en oprensningsprotokol.



FIGUR 14. Illustration af syntesen af surfaktant S3. Figuren illustrerer to-trins-syntesen af S3. I første trin kobles den lipofile del og hydrofile del (mPS3) sammen vha. biokatalyse og i andet trin sættes yderligere en hydrofil gruppe på.

Vi sigtede igen efter at udvikle en oprensning med så få standardiserede enhedsoperationer som muligt. Vi lykkedes med at isolere vores ønskede surfaktant i en form, så den var klar til brug i kommercielle produkter. Dette viste sig at være muligt med kun en enkelt standard enhedsoperation.

Efter enkeltvis udvikling af henholdsvis det biokatalytiske trin, en oprensning imellem trinnene, det kemiske trin og en endelig oprensning var det på tide at udføre hele to-trins-syntesen på testskala. Til vores store glæde var det muligt at syntetisere S3 i to syntesetrin fra mPS3 (se FIGUR 14) med et tilfredsstillende udbytte og et endeligt produkt med høj renhed.

Undersøgelserne på testskala var tilstrækkelig til ovenstående analyser af S3's kemiske struktur, men for lille til at kunne isolere S3 i mængder der kunne overføres til applikationstests. Det forestående arbejde gik ud på at opskalere metoden til en skala, hvor S3 ville kunne isoleres i mængder store nok til at foretage applikationstests. Opskalering af denne to-trins proces krævede indkøb af større laboratorie- og oprensningsudstyr. Med det nye udstyr var det muligt at teste forskellige oprensningsprotokoller, hvor vi fandt en protokol passende til produktion af S3 på gram skala. Dette vil blive uddybet i arbejdsmappe 4.

3.5.8 Konklusion på arbejdsmappe 3

Målsætningerne for arbejdsmappen blev nået.

- Vi har fundet frem til metoder for nedbrydning af de biologiske makromolekyler, der blev udvundet i arbejdsmappe 2. Fedtstoffer og PS1 kunne nedbrydes med udbytter på hhv. 81% og 17% og de kemiske bestanddele havde høj renhed.
- Metoderne blev demonstreret med tilfredsstillende udbytter på kilo- og gram-skala.
- Vi har udviklet syntetiske metoder til at lave tre forskellige surfaktanter (S1.1, S1.2 og S3).
- Vi har opdaget en lovende surfaktant og prioriteret denne i efterfølgende arbejdsmapper.
- Vi har identificeret og udviklet en særdeles miljøvenlig metode til at fremstille en ny og lovende surfaktant, S3. Denne surfaktant vil være fokuspunktet for resten af projektet.

3.6 Arbejdsmappe 4: Produktvalidering

Formålet med arbejdsmappe 4 var at foretage produktvalidering af de surfaktanter, der blev syntetiseret i arbejdsmappe 3. Først skulle surfaktanterne undersøges for stabilitet, derefter skulle de mest interessante produkter produceres på en skala, der ville muliggøre applikationstests og dermed undersøgelse af markedspotentialet af disse nye produkter.

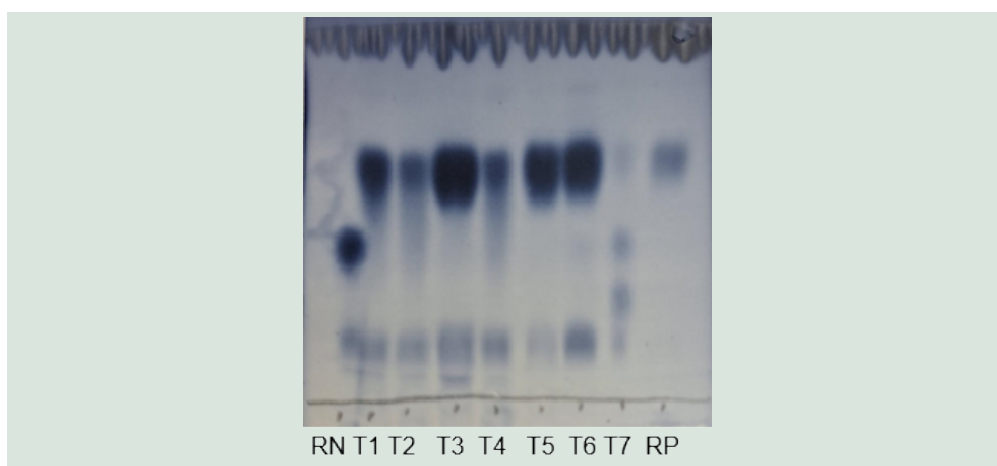
Vi vurderede at potentialet for S3 var betydeligt højere sammenlignet med S1.1 og S1.2, hvorfor vi prioriterede S3 i de følgende undersøgelser af opskalering og applikationer.

Ved projektstart ønskede vi at få testet de nye surfaktanter både hos en akademisk og kommerciel partner med henblik på at kortlægge surfaktanternes egenskaber. I løbet af projektet har vi selv udviklet applikationstests, som vi benyttede til at vurdere deres anvendelser og markedspotentialer. Dette vil blive uddybet her i arbejdsmappe 4. Den store fordel ved at udføre applikationstests internt er en større kontrol af data og dermed beskyttelse i form af IP. Vi ønskede også at få udarbejdet sikkerhedsdatablade på produkterne i samarbejde med specialiserede konsulentbureauer. Da S3 er en fuldstændig ny surfaktant foreligger der en række regulatoriske tests, der skal udføres inden et sikkerhedsdatablad kan udarbejdes og det har derfor ikke været muligt at få udarbejdet dette inden projektafslutning.

3.6.1 Stabilitetstests af S1.1

Efter syntese og oprensning af S1.1 (i arbejds pakke 3) udførte vi stabilitetstests. Dette gjorde vi ved at opløse S1.1 i henholdsvis ethanol, metanol og vand ved forskellige pH-værdier og alle opløsninger blev testet ved både stuetemperatur og 40 °C. Stabiliteten af S1.1 blev undersøgt via TLC-analyse af de forskellige opløsninger ved forskellige temperaturer efter 2 dage og der blev undersøgt for dannelsen af nye pletter på TLC-pladen. Dannelsen af nye pletter på TLC-pladen ville bevise at nye molekyler blev dannet over tid, hvilket ville betyde at S1.1 blev omdannet under de pågældende betingelser og dermed være ustabil. Desværre opstod nye pletter på TLC-pladen for alle prøverne, hvilket utvetydigt betød at denne form af S1.1 var for ustabil.

TABEL 3. TLC-analyse af stabilitetstests af S1.1 (ustabil form) efter 2 dage. Hver enkelt prøve blev analyseret med TLC-analyse efter inkubering i 2 dage under de givne betingelser. Nye pletter på TLC-pladen indikerer omdannelse af surfaktanten, hvorfor det kan konkluderes at surfaktanten er ustabil under disse betingelser.



Stabilitetstest	Opløsningsmiddel	pH	Temperatur
T1	Vand + HCl	4	25 °C
T2	Vand + HCl	4	40 °C
T3	Vand + NaOH	8	25 °C
T4	Vand + NaOH	8	40 °C
T5	Vand	7	25 °C
T6	Metanol	-	25 °C
T7	Ethanol	-	60 °C

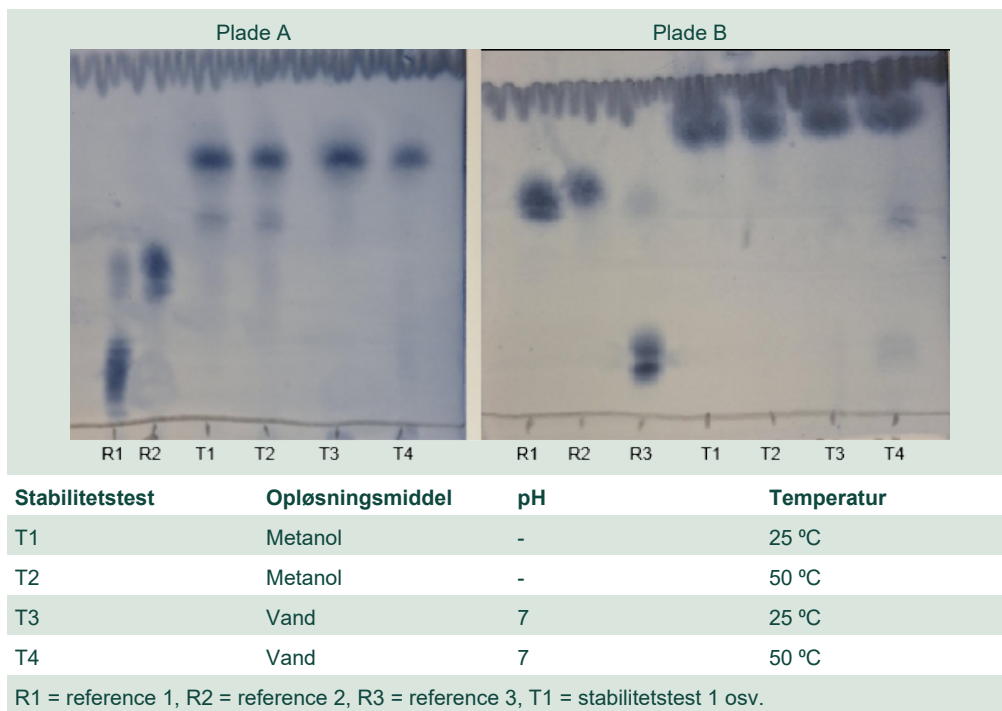
HCl = saltsyre, NaOH = natriumhydroxid, RN = reference af nedbrydningsprodukterne, RP = reference af surfaktanten før nedbrydning

Vi udtænkte derfor en strategi til at lave en stabiliseret version af S1.1. Vi syntetiserede og isolerede derfor en stabil analog af S1.1 og udførte lignende stabilitetstests i vand og metanol ved stuetemperatur og 50 °C. Der blev udført to TLC-analyser i forskellige løbevæsker.

Den øverste blå plet i begge analyser angiver S1.1-analogen med den ønskede kemiske struktur. På plade A kan man se en svag plet lidt under den øverste plet ved T1 og T2. Dette betyder, at S1.1-analogen bliver meget lidt nedbrudt i metanol ved 25 og 50 °C over 3 dages tid. I T3 og T4 blev ingen nye pletter observeret på plade A. På plade B ved T4 kan svage pletter anes som svarer til R3. Da kun meget lidt nedbrydning blev observeret ved at behandle S1.1-analogen i metanol eller vand ved 50 °C i 3 dage, kan det altså konkluderes at S1.1-

analogen udviser tilstrækkelig stabilitet til at kunne anvendes i størstedelen af alle kommercielle produkter.

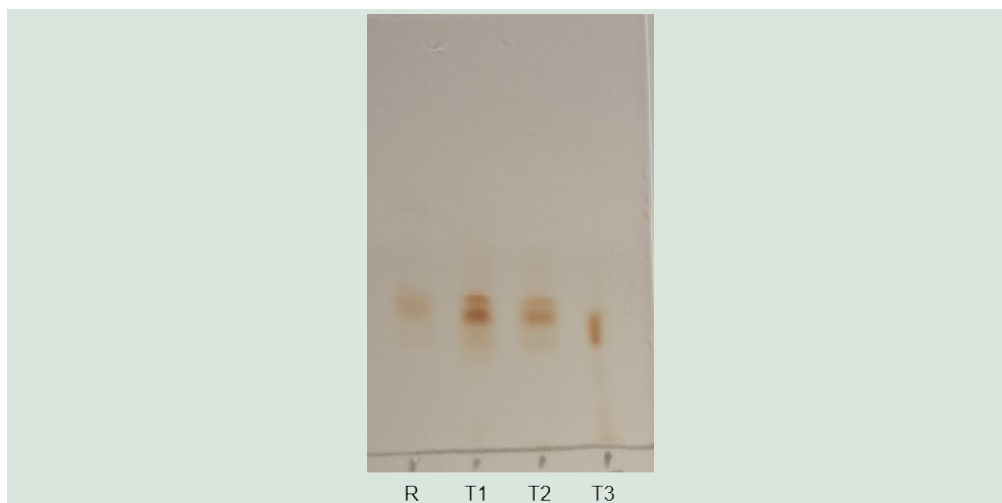
TABEL 4. TLC-analyser af stabilitetstests af S1.1 (stabil analog) efter 3 dage. Plade A og plade B viser to forskellige TLC-analyser af de samme stabilitetstests. På plade A kan det konkluderes at S1.1 er lidt ustabil i metanol og på plade B kan det konstateres at en anelse nedbrydelse forekommer i vand ved 50 °C efter 3 dage. S1.1 er helt stabil i vand ved 25 °C over 3 dage.



3.6.2 Stabilitetstest af S1.2

Efter syntese og oprensning af S1.2 (i arbejdsmappe 3) udførte vi stabilitetstests af denne surfaktant.

TABEL 5. TLC-analyse af stabilitetstests af S1.2 efter 3 dage. TLC-analysen viser ingen nye pletter, hvorfor det kan konkluderes at S1.2 er stabil under betingelserne.



Stabilitetstest	Opløsningsmiddel	pH	Temperatur
T1	Acetone	-	50 °C
T2	Metanol	-	50 °C
T3	Vand	7	50 °C

R = reference, T1 = stabilitetstest 1 osv.

Disse tests udførte vi ved at opløse S1.2 i henholdsvis acetone, metanol og vand og lod derefter opløsningerne stå ved 50 °C i tre dage. Herefter blev prøverne analyseret med TLC-analyse. Analysen viser tydeligt at de samme pletter (svarende til S1.2) er til stede efter T1, T2 og T3 som i referencen. Den kan altså konkluderes at S1.2 udviser høj stabilitet da ingen nedbrydning observeres i løbet af 3 dage.

3.6.3 Stabilitetstest af S3

Efter syntesen af S3 (i arbejdsmappe 3) blev surfaktanten opløst i vand. Denne prøve blev opbevaret i 2 måneder inden applikationstestene blev udført uden nogen tegn på nedbrydning af surfaktanten. Desuden blev kompositionen af de samme prøver analyseret med TLC efter 6 måneder i vandig opløsning. Denne TLC-analyse viste ingen nye pletter, sammenlignet med TLC-analysen foretaget umiddelbart efter syntesen blev udført. Dette data er konfidentielt og vises ikke i denne rapport af for at beskytte IP.

Det kan altså konkluderes at S3 udviser høj stabilitet i vandig opløsning, hvilket vil være de betingelser som surfaktanten oftest skal benyttes og opbevares under.

3.6.4 Valg af mest lovende surfaktant

Efter disse undersøgelser af stabilitet for de forskellige surfaktanter syntetiseret i arbejdsmappe 3, kan vi konkludere at S3 og S1.2 er de mest stabile, og S1.1 udviser tilfredsstillende stabilitet. Hvis vi også tager højde for de kemiske strukturer kan vi beslutte at S3 er den mest lovende kandidat syntetiseret i arbejdsmappe 3. Vi vil derfor fokusere på S3 i de følgende opskaleringsundersøgelser og efterfølgende applikationstests. Vi vil til sidst lave en samlet vurdering af markedspotentialet for S3.

3.6.5 Opskalering af S3

Udviklingsarbejdet i arbejdsmappe 3 resulterede i en metode til at syntetisere S3 med et højt udbytte samt en oprensningsprotokol egnet til syntese på gram skala. Vi indkøbte udstyr til at

sammensætte en laboratorieopstilling, der passede til skalaen og den udviklede oprensningsprotokol. Opskaleringen forløb planmæssigt og der var kun simple tilpasninger af opsætningen for at bygge et funktionelt setup. Gram skala syntesen blev udført fire gange med små variationer i reaktionsbetingelserne i hver batch. De efterfølgende applikationstests viste, at disse små variationer i reaktionsbetingelserne gav en forskel i de forskellige anvendelser. De fire produkter blev analyseret med vores HPLC-UV instrument, hvilket er en kombineret kromatografisk og spektrofotomerisk metode. Resultaterne viste at produktet havde den forventede komposition.

3.6.6 Benchmarking i forhold til eksisterende surfaktanter

For at kunne udføre en pålidelig række applikationstests kontaktede vi et konsulenthus indenfor denne branche. De vejledte os til at vælge, hvilke surfaktanter vi skulle sammenligne med og hvilke applikationstests, der var relevante for at demonstrere anvendelsesmulighederne af S3. Vi fandt frem til tre almindelig og vigtige surfaktantegenskaber som blev testet for S3 (emulgerings-, skumnings- og befugtningssevne). For at kunne sammenfatte en vurdering af markedspotentialet for S3, måtte disse resultater sammenlignes med de surfaktanter, som vi vil konkurrere med på markedet. Som beskrevet i kapitel 1 er de mest miljøvenlige surfaktanter på markedet rhamnolipid og sophorolipid. Vi valgte disse to som benchmarking for gruppen af bæredygtige surfaktanter. Udover disse to, valgte vi også SLES som repræsentant for gruppen af masseproducerede anioniske surfaktanter.

De mest interessante egenskaber vi valgte at undersøge var emulgerings-, skumnings- og befugtningssevne. Emulgering er vigtigt for at kunne danne stabile cremer, der kan indeholde relevante aktive stoffer. Skumning er vigtigt for forbrugere, der associerer høj skumningsevne med bedre vaskeevne for produktgrupper som opvaskemiddel. Befugtningssevne er vigtigt i tøjvask, hvor surfaktanten skal i kontakt med tekstiler. Hvis der er en høj befugtningssevne, kan vasken være kortere. Hvis der er en lav befugtningssevne, vil det typisk føre til hurtigere tørring af tøjet efter vask, så en forståelse af dette er vigtigt for at kunne vælge de mest relevante applikationer for S3.

Emulgeringen blev testet ved at blande en vandig opløsning af surfaktanterne med en olie. Miksturen blev derefter rystet voldsomt med en vortex mikser, hvorefter emulsionshøjden blev målt og sammenlignet med den totale højde af blandingen (efter både 10 og 60 min). Alle forsøg blev udført tre gange og gennemsnittene blev sammenlignet og er illustreret i TABEL 6. TABEL 6 viser tydeligt at S3, udviser samme emulgerende evne som de kommercielle surfaktanter.

TABEL 6. Emulgeringstest af S3^a. Tabellen viser resultaterne af emulgeringstesten af S3 sammenlignet med 3 kommercielt tilgængelige anioniske surfaktanter.

Surfaktant	Olie1, 10 min	Olie1, 60 min	Olie2, 10 min	Olie2, 60 min
SLES	1.00	1.00	1.00	1.00
S3.1	1.01	0.98	1.06	1.02
S3.2	1.04	0.93	1.05	1.00
S3.3	1.03	0.93	0.85	0.97
S3.4	1.04	0.98	0.85	0.97
Rhamnolipid	1.03	1.02	1.05	0.88
Sophorolipid	0.96	1.02	1.06	0.81
^a Data er normaliseret efter resultaterne fra SLES. Data er præsenteret som gennemsnittet af tre eksperimenter.				

Skumningsevne blev testet ved at hælde en vandig opløsning af surfaktanterne ned i en tilsvarende vandig opløsning af den samme surfaktant. Højden af skummet blev målt efter 0 og 5 minutter, alle eksperimenter blev udført tre gange og resultaterne er sammenlignet i TABEL 7. TABEL 7 viser tydeligt, at små ændringer i produktionsbetingelserne for S3 giver en markant forskel i skumningsevne. Det er også bemærkelsesværdigt at S3 udviser meget større skumhøjde end de to kommercielle anioniske biosurfaktanter, rhamnolipid og sophorolipid.

TABEL 7. Skumningsevnetest af S3^a. Tabellen viser resultaterne af skumningstesten af S3 sammenlignet med 3 kommercielt tilgængelige anioniske surfaktanter.

Surfaktant	Skumhøjde 0 min	Skumhøjde 5 min
SLES	100	100
S3.1	69	82
S3.2	78	80
S3.3	62	63
S3.4	63	66
Rhamnolipid	34	33
Sophorolipid	19	19
^a Data er normaliseret efter resultaterne fra SLES. Data er præsenteret som gennemsnittet af tre eksperimenter.		

Befugtningssevne blev testet ved at lade et stykke tørt tekstil ligge på overfladen af en vandig opløsning af surfaktanterne. Den tid det tog for tekstilet at starte med at synke blev målt og resultaterne er vist i TABEL 8. Vand uden surfaktant blev anvendt som reference. I denne applikationstest er det igen tydeligt at produktionsbetingelserne for S3 gav en forskel. Resultaterne viser, at S3 har en højere befugtningssevne end sophorolipid, men lavere end SLES og rhamnolipid.

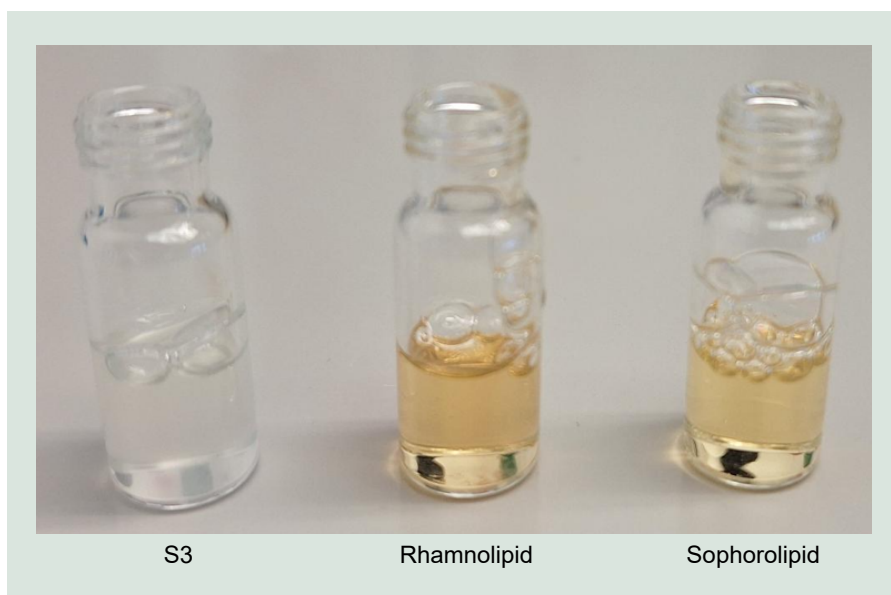
TABEL 8. Befugtningssevnetest af S3^a. Tabellen viser resultaterne af undersøgelsen af befugtningssevnen af S3 sammenlignet med 3 kommercielt tilgængelige anioniske surfaktanter.

Surfaktant	Tid i sekunder
SLES	1.0
S3.1	4.8
S3.2	7.7
S3.3	5.1
S3.4	6.2
Rhamnolipid	1.1
Sophorolipid	11.3
Vand	>60

^aData er normaliseret efter resultaterne fra SLES. Data er præsenteret som gennemsnittet af tre eksperimenter.

Det er meget almindeligt at anvende anioniske surfaktanter i færdige formulering i mængder omkring 1–20%. I disse mængder vil surfaktanterne altså have en betydelig indflydelse på helheden af den færdige formulering med hensyn til farve og lugt. I kapitel 1 nævnte vi de

forhold som rhamno- og sophorolipid bliver produceret under, og hvordan dette påvirker farven og lugten af disse to surfaktanter.



FIGUR 15. Sammenligning af farve for S3, rhamnolipid og sophorolipid.

Figuren viser forskellen i farven på vandige opløsninger af de rene surfaktanter. Det er tydeligt at farven på rhamno- og sophorolipid vil have en indflydelse på farven af den færdige formulering, hvis surfaktanten skal bruges i store mængder som 1–20%.

Fordelen ved S3 i denne sammenhæng er at den bliver produceret med biokatalyse, hvor det aktive enzym er isoleret på forhånd, fremfor fermentering hvor et kompliceret biologisk system står for produktionen af surfaktanten. Dette giver altså en reaktionsblanding for S3, der er meget mindre kompliceret end for biosurfaktanterne, hvorfor oprensningen af S3 også er simplere og billigere. Det resulterer i at S3 kan isoleres som et hvidt pulver som er helt lugtfri. Pulveret kan opløses i vand og give en klar og farveløs opløsning, hvor tilsvarende opløsninger af rhamno- og sophorolipid er gule (se FIGUR 15). Formuleringseksperten vil altså kunne anvende S3 i formuleringer uden at bekymre sig om farve- og lugtgener. S3 er således velegnet til parfume fri formuleringer modsat de fermenterede biosurfaktanter.

Ud fra ovenstående tre applikationstests sammen med det faktum at S3 er farve- og lugtfri er det altså tydeligt at S3 har potentialet til at kunne udkonkurrere kommercielt tilgængelige surfaktanter. Herefter startede vi på at sammenfatte en vurdering af markedspotentialet for S3.

3.6.7 Vurdering af markedspotentialet

Det tidligere nævnte konsulenthus assisterede os i en vurdering af markedspotentialet for S3 baseret på flere parametre:

- Resultaterne fra applikationstests
- Produktionsbetingelserne mht. miljøaftryk
- Miljøaftrykket af ingredienserne
- Hvilke mængder ingredienserne er tilgængelige i med henblik på produktionsskala
- Generel sammenligning med kommercielt tilgængelige surfaktanter

Konsulenthuset hjalp med at sammenfatte ovenstående emner og vurderede, hvilke færdige formuleringer som S3 ville være relevant i og hvilke kommercielle surfaktanter, der skulle

udkonkurreres for at S3 kunne komme på markedet. De assisterede også i vurderingen af, hvilken skala det ville være muligt at producere S3 på og gav et estimat på en tons-pris.

3.6.8 Interaktion med markedet

Under projektet har vi været i dialog med mange potentielle aftagere af S3, hvor vi har diskuteret potentialet og interessen for S3. Kunderne er direkte producenter af sæbe, kosmetik og vaskemidler, gennem eget brand eller som private label. Der er også et kundesegment som er distributører der videresælger til producenter af sæbe, kosmetik og vaskemidler, men som besidder stor viden om brugen af surfaktanter og formuleringer af slutprodukter. Fælles for samtlige kunder vi har været i dialog med, er at de mangler miljøvenlige alternativer til de nuværende petrokemisk og palmeolie baserede anioniske surfaktanter. Nogle konkurrenter forsøger at løse denne miljømæssige problemstilling ved hjælp af fermentering som er en mildere proces end de nuværende. De fermenterede surfaktanter er dog udfordret på deres produkt-performance, og gennem dialog og samarbejde med potentielle kunder har vi fokuseret på, hvordan vi med S3 kan demonstrere de bedre egenskaber for vores produkt. Kunderne har især været begejstret for at S3 er lugtfri, den forventede mildhed samt den stærke performance som er afgørende for effektive sæbe, kosmetik og vaskemiddel produkter. Den store CO₂ besparelse der er estimeret for S3 har været afgørende og anses generelt som værende en nødvendighed for at komme på markedet med nye produkter i denne branche. De mange konstruktive dialoger har forbedret NorFalks forståelse af markedet, hvilket har ført til en mere målrettet udvikling af nye surfaktanter til anvendelse i færdige produkter.

3.6.9 Konklusion på arbejdsplan 4

I arbejdsplan 4 har vi testet stabiliteten af S1.1 og S1.2, og fandt frem til molekyllære strukturer der gav stabile surfaktanter fra mPS1. Herefter valgte vi at fokusere på den mest lovende surfaktant, S3.

Syntesen af S3 blev skaleret således, at vi kunne isolere mængder af S3 så vi kunne udføre relevante applikationstests. Vi har undersøgt S3 for emulgerings-, skumnings- og befugtningssevne og alle tre tests er sammenlignet med kommercielle anioniske surfaktanter (SLES, rhamnolipid og sophorolipid). Vi er stolte af at have udviklet en ny miljøvenlig surfaktant der konkurrerer med disse kommercielle alternativer. Specielt emulgeringsevnen for S3 viste sig at være bedre end for en af de mest anvendte anioniske surfaktanter på markedet, SLES.

S3 udviser meget højere skumningsevne sammenlignet med biosurfaktanterne, rhamnolipid og sophorolipid. Desuden er S3 både farveløst og lugtfri og vil derfor give produkter, der er mere tiltalende for forbrugeren.

Vi har altså demonstreret egenskaber for en ny miljøvenlig surfaktant, der kan udkonkurrere sammenlignelige produkter, der allerede er på markedet og produceres på multiton skala.

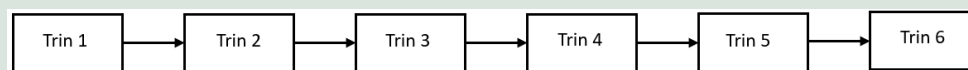
NorFalk har i marts 2025 indsendt en patentansøgning på både produktionsmetoden, anvendelserne og den kemiske struktur af S3. Vores kunder har allerede vist høj interesse for denne surfaktant, hvorfor vi er meget interesseret i at videreudvikle produktionen af S3. Vi ønsker at tage den videre i processen med det formål, at kunne tilføje S3 til vores produktkatalog og bringe den til markedet.

3.7 Arbejdsplan 5: Produktionsvalidering

Formålet med arbejdsplan 5 var opstille et "process flow diagram" (PFD), for at skabe overblik over en kommerciel produktion af S3. Denne PFD benyttes også til at beregne et klasse 5 CAPEX-estimat. Til sidst opstilles en indledende CO₂-beregning for S3, som sammenlignes med andre relevante surfaktanter.

3.7.1 Opstilling af PFD og beregning af klasse 5 CAPEX-estimat

Vi opstillede et PFD for hele to-trins syntesen af S3 inkluderende oprensningstrin i mellem og efter de to syntesetrin. Af hensyn til beskyttelse af opfindelsen, så har vi valgt ikke at beskrive de enkelte enhedsoperationer i processen. Det førmtalte konsulenthus hjalp os til at komme i kontakt med eksperter indenfor opskalering af biokatalytiske og kemiske processer. Vi har haft flere møder med førende europæiske virksomheder, der specialiserer sig i processer og produktionsudstyr, pilotproduktion samt ingeniøroptimeringer og storskala produktion. Der er generelt stor tiltro til processen og et ønske fra processpecialisterne om at være en del af den videre opskalering.



FIGUR 16. PFD af produktionen af S3^a. Figuren viser antallet af trin i produktionen af S3.

^aAf hensyn til beskyttelse af opfindelsen, vil de enkelte trin ikke blive beskrevet i detaljer.

Efter opstilling af ovenstående PFD blev det muligt at udføre en beregning til at få et klasse 5 CAPEX estimat, der dækker over to-trins-syntesen tidligere beskrevet i arbejdsmappe 3. Et klasse 5 CAPEX estimat dækker over mængden af ingredienser, udbyttet af den (bio)kemiske proces, produktionsskalaen og antallet af enhedsoperationer i processen. Disse parametre bruges til at estimere prisen på at opstille et industri anlæg til produktion af S3. Estimatet viser en omkostning på omtrent 300 mio DKK (40 mio EUR) baseret på en årlig produktion på 20.000 tons S3 om året. Omkostningerne ved at bygge egenproduktion til S3 er dermed i samme størrelsesorden som for andre etablerede surfaktantproduktioner.

3.7.2 Indledende CO₂-beregninger

Vi udførte indledende CO₂-beregninger, i samarbejde med tidligere nævnte konsulenthus, for at kunne sammenligne S3 produktet med andre lignende produkter på markedet. De totale CO₂-udledninger er beregnet ud fra ingredienserne og de to syntesetrin de udføres i løbet af en kommerciel produktion af S3. Oprensningstrinnene blev udeladt af disse beregninger, eftersom dybdegående optimering af processen helt sikkert vil medføre store ændringer i oprensningstrinnene. Størrelsen af CO₂-udledning fra de forskellige ingredienser blev fundet i CO₂-udledningsdatabaser og udledningerne i forbindelse med syntesetrinnene er beregnet med udgangspunkt i faktiske parametre og værdier brugt i laboratoriet. Herunder tidsforbrug, varmetab, omrøring m.m. Samme type beregninger af CO₂-udledning er gjort for S3, rhamnolipid og sophorolipid. I TABEL 9 vises, hvor mange kg CO₂-udledning der er for hver kg produceret surfaktant.

TABEL 9. CO₂-beregninger af S3 og kommercielle biosurfaktanter^a. Tabellen viser resultaterne af CO₂-beregninger for produktionen af S3 samt rhamno- og sophorolipid. Beregningen er baseret på CO₂-udledningen fra ingredienserne og energiinputtet nødvendig for at udføre selve synteserne.

Surfaktant	Produktionen	Ingredienserne	Total
S3	0.74	3.04	3.78
Rhamnolipid	1.10	5.49	6.59
Sophorolipid	1.15	6.93	8.09
^a Alt data er angivet i kg CO ₂ per kg produkt.			

Første kolonne uddyber CO₂-udledningen fra de to syntesettrin og den anden kolonne viser CO₂-udledningen fra de ingredienser der forbruges til produktionen af ét ton surfaktant. Sidste kolonne summerer de to værdier og giver dermed den totale CO₂-udledning. Det er tydeligt at S3, ud fra denne initiale vurdering, har en lavere CO₂-udledning end de andre surfaktanter både med hensyn til produktionen og ingredienserne. Vi har altså en CO₂-besparelse på 36% på produktionen og 56% på ingredienser, hvilket giver en total CO₂-besparelse på 53% sammenlignet med sophorolipid.

For produktionen af S3 er det ingredienserne, der bidrager mest til CO₂-udledningen. Dette ses generelt for fremstilling af kemiske stoffer og ses også tydeligt for rhamnolipid og sophorolipid. Det betyder, at en grundig undersøgelse af anskaffelsen af disse resurser til S3 kan sænke CO₂-udledningerne yderligere. Det skal også understreges, at disse beregninger er baseret på data fra en CO₂-udledningsdatabase, hvilket ikke tager højde for muligheden for at anskaffe ingredienserne fra tang, andre upcyclede bioressourcer eller affaldsstrømme fra andre produktioner.

4. Referencer

- [1] EuroMonitor, "Surfactant cleansers and Adjuvants Data Extraction", købt oktober 2, 2024.
- [2] ECHA, "[Registry of restriction intentions until outcome](#)", Tilgået: April 29, 2025. [Online]
- [3] Jensen, 1999. "Fate and effects of linear alkylbenzene sulphonates (LAS) in the terrestrial environment". John Jensen (1999). Science of The Total Environment, 226, 93–111.

Udvikling af bæredygtige surfaktanter baseret på upcycledede restfraktioner

Rapporten beskriver potentialet i tang som en bioresurse til produktionen af klimavenlige biobaserede surfaktanter. Projekter fokuserer på udvindingen af flere komponenter fra tang, der kan anvendes i produktionen af surfaktanter. Det er beskrevet, hvilke komponenter der kan udvindes fra tang og hvordan disse komponenter skal behandles for at kunne indgå i en afsluttende surfaktantsyntese.

Resultaterne viser tydeligt, at der kunne udvindes tre forskellige komponenter fra tang, som kunne nedbrydes og anvendes i syntesen af flere forskellige surfaktantkandidater. Deraf er én af surfaktanterne meget lovende. Denne kandidat viste sig at være konkurrencedygtig med kommercielt tilgængelige surfaktanter mht. performance og pris. Derudover viste det sig, at denne surfaktant kunne syntetiseres med en biokatalytisk metode, hvilket demonstrerede den høje grad af klimavenlighed for denne biobaserede surfaktant.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk