



Miljø- og
Ligestillingsministeriet
Miljøstyrelsen

Ethanolgen- indvinding MUDP-projekt

MUDP Rapport

Marts 2025

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Trine Boje Røgild, civ.ing.

Emil Damgaard-Møller, ph.d.

Allan Robertson Petersen, ph.d.

Signe Stange Grønborg, ph.d.

Peter Rosborg, civ.ing.

Søren Haack, ph.d.

Teknologisk Institut

Vibeke Helene Larsen

Mahmoud Awkal

Johannes Fabritius Petersen

Fie Harder

Carsten Johnsen

pK Chemicals A/S

Grafiker/bureau:

Teknologisk Institut

Fotos:

Teknologisk Institut

ISBN: 978-87-7038-730-9

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.

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
[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.

Indhold

Resume	6
Forord	7
1. Introduktion	8
1.1 Baggrund	8
1.1.1 Problemstilling	8
1.2 Formål med projektet	9
2. Screening af teknologier	10
2.1 Ethanolreststrømme fra pK Chemicals	10
2.1.1 DEAE Dextran - produktion	10
2.1.2 Modificeret stivelse - produktion	10
2.2 Kravspecifikationer	10
2.3 Screening af potentielle teknologier	12
2.3.1 Dybdegående undersøgelse og risikoevaluering af de mest lovende teknologier	14
2.3.2 Udvælgelse af teknologier til laboratorietest	17
3. Laboratorietest af teknologier	18
3.1 Prøveudtagning af ethanolstrømme	18
3.2 Indledende forsøg med udvalgte teknologier	19
3.2.1 Konventionel destillation	19
3.2.2 Vakuumdestillation	19
3.2.3 Centrifugering	20
3.2.4 Keramisk membranfiltrering	20
3.2.5 Ultrafiltrering	20
3.3 Resultater for de indledende forsøg	21
3.3.1 Resultater for ethanolstrøm 1	21
3.3.2 Resultater for ethanolstrøm 2	23
4. Opskalering af oprensningsteknologi	25
4.1 Opskalering af destillationsanlæg	25
4.2 Opskalering af ethanolstrøm 1	26
4.3 Opskalering af ethanolstrøm 2	27
4.3.1 Resultater for opskalering af ethanolstrøm 2	27
4.4 Stresstest af destillation	29
4.4.1 Udførelse af stresstest	29
4.4.2 Resultater fra stresstest	30
5. Produktion af modificeret stivelse med genanvendt ethanol	32
5.1 Produktion i laboratorieskala af modificeret stivelse	32
5.2 Resultater for produktion i laboratorieskala af modificeret stivelse	32
5.2.1 Kvalitetskontrol	32
5.2.2 Partikelstørrelsesfordeling	33
5.2.3 Konklusion på produktion i laboratorieskala af modificeret stivelse	34

6.	Økonomi og miljø	35
6.1	Forudsætning for økonomisk vurdering	35
6.1.1	Scenarie 1	35
6.1.2	Scenarie 2	35
6.1.3	Resultater	35
6.1.4	Rentabilitet	37
6.2	Miljøvurdering for produktion af modificeret stivelse	37
6.2.1	Anvendelse af analysen	37
6.2.2	Formålet	38
6.2.3	Metodisk afgrænsning	38
6.2.4	Livscykluskortlægning (LCI)	38
6.2.5	Vurdering af potentielle miljøpåvirkninger (LCIA)	41
6.2.6	Følsomhedsanalyse	43
6.2.7	Konklusioner	43
7.	Konklusion og anbefalinger	45
7.1	Konklusion og anbefalinger	45
8.	Referencer	47
Bilag 1.	Kortlægning af reststrømme	48
Bilag 1.1	Reststrømme fra produktion af DEAE Dextran (ethanolstrøm 1)	48
Bilag 1.2	Reststrømme fra produktionen af modificeret stivelse (ethanolstrøm 2)	48
Bilag 2.	Risikoevaluering	49
Bilag 3.	Modificeret stivelse produceret i laboratorieskala	50
Bilag 4.	Baggrundsdata til miljøberegninger	51

Resume

Formålet med dette projekt er at undersøge, om og hvordan ethanolgenindvinding kan muliggøres i farmaindustrien. I farmaindustrien er der strenge krav til kvaliteten til f.eks. den ethanol, som benyttes. Det betyder også, at man benytter fossilbaseret ethanol i stedet for bioethanol, da den fossilbaserede ethanol kan opnå højere koncentrationer og renhedsgrad. Til ethanolgenindvinding er der afsøgt og afprøvet forskellige forbehandlings- og oprensningsteknologier, som vurderes at kunne imødekomme de strenge kvalitetskrav, som farmaindustrien stiller. Projektet tager udgangspunkt i produktionen af DEAE Dextran og modificeret stivelse hos pK Chemicals A/S. I produktionen af begge produkter benyttes ethanol til at vaske produktet. Efter vaskeprocessen opsamles ethanol som farligt affald og sendes til destruktion.

Baseret på litteratursøgning og laboratorieforsøg er konventionel destillation udvalgt som oprensningsmetoden til ethanolgenindvinding, hvor forbehandling ikke er nødvendig. Oprensningsmetoden er blevet opskaleret til større laboratorieskala, og den genanvendte ethanol er benyttet til at producere modificeret stivelse. Oprensningsmetoden udviklet i dette projekt medfører et for højt toluenindhold, som overføres til produktet. Det betyder, at oprensningsmetoden skal videreudvikles, før ethanolgenindvinding er mulig. Hvis man lykkes med at kunne genindvinde 40 % ethanol, vil pK Chemicals kunne opnå en årlig besparelse på 33 % af de udgifter, der er forbundet med indkøb og bortskaffelse af fossilbaseret ethanol. Ydermere tyder de miljømæssige beregninger på, at en væsentlig besparelse i kg CO₂ ækvivalente emissioner ville kunne opnås ved brugen af 40 % ethanol.

Forord

Nærværende rapport beskriver formål, metode og opnåede resultater for projektet 'Ethanolgenindvinding'. Projektet er gennemført i samarbejde mellem pK Chemicals A/S og Teknologisk Institut.

I projektet har pK Chemicals bidraget med stor erfaring indenfor produktionsprocedurer for farmaceutiske produkter, herunder erfaring med lovgivning og krav for muliggørelse af recirkulation af oprensesolventer i processen og generelle foranstaltninger, der er nødvendige, for at sikre den kvalitet og sikkerhed, der er forbundet med recirkulering af oprenset ethanol i produktionsprocessen. Teknologisk Institut har bidraget med grundlæggende ekspertise indenfor genanvendelsesteknologier, screening af markedet for nye teknologier til genanvendelse af solventer, test af udvalgte teknologier på de konkrete produktionsethanolstrømme samt sparring i forbindelse med udviklingsstrategi til implementering og opskalering.

Projektet blev gennemført i perioden 1. januar 2021 til 31. april 2023 med økonomisk tilskud fra Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP), som administreres af Miljøstyrelsen. Projektet blev ydermere fulgt af Mette Lumbye Sørensen og Rose Rosenvold Staib (Miljøstyrelsen).

1. Introduktion

I farmaindustrien anvendes store mængder ethanol i produktionen og oprensningen af farmaceutiske produkter. For at imødekomme de høje krav til ethanolens koncentration og renhed anvendes ethanol baseret på fossile kilder. Efter brug sendes ethanolen til destruktion. Formålet med projektet er at udvikle en oprensningsmetode, som sikrer, at kvaliteten af den genanvendte ethanol er på niveau med jomfruelig ethanol og dermed kan recirkuleres direkte i produktionen.

1.1 Baggrund

Ethanol er et af de mest almindeligt anvendte opløsningsmidler indenfor produktionsindustrien. Særligt inden for farmaindustrien stilles der høje krav til den benyttede ethanol. Disse krav står beskrevet i den Europæiske Farmakopé, hvor der stilles krav til f.eks. koncentration og renhed af ethanol. Fossilbaseret ethanol kan have en højere koncentration og renhed end ethanol, der er produceret fra biomasse, og derfor benyttes den fossilbaserede ethanol inden for farmaindustrien for at imødekomme industriens høje krav. Ethanol indgår typisk ikke i det færdige produkt, men fungerer som opløsningsmiddel, som medium eller til vask af farmaceutiske produkter. Ved endt produktion klassificeres den brugte ethanol som farligt affald og sendes til destruktion ved forbrænding eller biologisk nedbrydning. Kvalitetskravene til ethanol i den farmaceutiske produktion afstedkommer, at recirkulering af ethanol er mere udfordrende i farmaindustrien end i andre industrier. Ydermere er farmaindustrien ikke underlagt samme begrænsninger mht. bæredygtighed som andre produktionsvirksomheder, hvorfor incitamentet for ethanolgenanvendelse indenfor farmaproduktion har været begrænset.

1.1.1 Problemstilling

I Danmark destrueres der hvert år mindst 16.000 tons opløsningsmidler, hvoraf ethanol udgør 70 %. Destruktionen af ethanol medfører en årlig CO₂-udledning på 22.000 tons, som potentielt kunne have været besparet ved genanvendelse eller direkte genbrug hos den enkelte virksomhed. [1] Udover den miljømæssige interesse i at genbruge ethanol via recirkulering ved den enkelte produktion er det også af forretningsmæssig interesse for virksomhederne. Som følge af Coronapandemien og krigen i Ukraine er der sket en kraftig stigning i råvarepriserne, hvilket gør anskaffelsen af ethanol dyr, samtidig med at virksomhederne skal betale for destruktion af de ethanolstrømme, der genereres ved produktionen. Dette skaber både miljømæssige og forretningsmæssige motivationsfaktorer for at oprense og genanvende ethanolstrømmene fremfor at anvende jomfruelig ethanol ved hver produktionsbatch og derefter sende den brugte ethanol til destruktion.[1]

pK Chemicals A/S (herefter benævnt PKC) producerer ingredienser til farmaceutiske produkter for en lang række virksomheder i medicinalbranchen. Som en del af sin bæredygtighedsstrategi ønsker PKC at genanvende 80 % af de anvendte solventer ved recirkulering direkte i produktionen. I produktionen anvendes primært ethanol som oprensningsvæske til at udvaske produktionsrester i det endelige produkt. Det betyder, at PKC benytter store mængder ethanol, som udskiftes efter hvert vasketrin. Udskiftningen af ethanol mellem hvert vasketrin betyder, at kontamineringskoncentrationen falder løbende igennem vaskeprocessen. Sammensætningen af kontamineringen varierer afhængigt af det produkt, der behandles. Dette er specielt udfordrende, da der ikke findes kommercielle løsninger, som muliggør oprensning af ethanol til den

kvalitet, der kræves i farmaindustrien, og som samtidig kan oprense den konkrete sammensætning af kontaminanter, som opstår i PKC's ethanolreststrømme. Dette er et generelt problem inden for solventoprensning, og derfor skal teknologien specialudvikles til de specifikke solventstrømme hos den enkelte virksomhed.

Fordelen ved recirkulering af solvent i samme produktion er, at virksomheden relativt nemt kan opnå fuld sporbarhed af de indgående strømme. Derved har virksomheden dybdegående viden om, hvilke komponenter reststrømmen indeholder, hvilke som skal fjernes under oprensningen, samt hvilke stoffer der skal undersøges for i forbindelse med kvalitetssikringen af produktet. Virksomheden vil således kunne opnå fuld sporbarhed af solventen, samtidig med at forbruget af jomfruelig solvent bliver mindsket.

1.2 Formål med projektet

Projektets formål er at udvikle en oprensningsprocedure for ethanolreststrømmene fra PKC's produktion. Oprensningsmetoden og -proceduren skal imødekomme kvalitetskravene for farmaceutisk produktion og samtidig være skalerbar. Oprensningsmetoden og -proceduren skal tillade recirkulering i produktionen og være både økonomisk og miljømæssigt rentabel sammenlignet med fossilbaseret ethanol.

2. Screening af teknologier

For at identificere og teste de mest egnede teknologier til oprensning af ethanol foretages først en bred screening af oprensnings-teknologier for væsker, som benyttes inden for forskellige brancher. Derefter vil de mest lovende teknologier blive undersøgt nærmere gennem litteraturstudier, ekspertinterviews og vurdering af risici i forhold til de krav, pK Chemicals har identificeret for deres ethanolstrømme. Sidst udvælges de teknologier, som projektet anser for mest relevante til eksperimentel test på laboratorieskala.

2.1 Ethanolreststrømme fra pK Chemicals

For at kunne udvælge oprensningsteknologier til laboratorietest og senere opskalering er PKC's reststrømme blevet kortlagt, og de relevante ethanolreststrømme er blevet udvalgt. I PKC's Køgeafdeling produceres produkterne DEAE Dextran, modificeret stivelse og forskellige Dex-tran-derivater. I projektet er reststrømmene fra produktionen af DEAE Dextran og modificeret stivelse blevet udvalgt for at kunne udvikle en oprensningsmetode til fjernelse af kontaminanter. I dette afsnit præsenteres produktionen DEAE Dextran og modificeret stivelse. En kortlægning af reststrømmene fra produktionen af DEAE Dextran og modificeret stivelse kan findes i Bilag 1.

2.1.1 DEAE Dextran - produktion

DEAE Dextran benyttes som et hjælpestof i vacciner til ikke-menneskelig brug. Til produktionen af en batch DEAE Dextran produceres omkring 24.000 kg reststrøm fra ethanolvasketrinene med en ethanolconcentration på >70 %.

2.1.2 Modificeret stivelse - produktion

Ved produktionen af modificeret stivelse genereres også reststrømme. Reststrømmen fra denne produktion vil hovedsageligt være solventerne fra de forskellige vasketrin, som indeholder forskellige koncentrationer af kontaminanter. Til produktionen af en batchmodificeret stivelse produceres omkring 25.000 kg reststrøm. Reststrømmene har en ethanolconcentration på 50-60 % og vil indeholde rester af toluen og andre kontaminanter.

2.2 Kravspecifikationer

For at kunne vurdere potentielle teknologiers egnethed til oprensning af PKC's reststrømme er der opstillet kravspecifikationer. Reststrømmenes indhold af kontaminanter dannede baggrund for fastlæggelsen af nogle af de krav, teknologien skulle imødekomme for at opnå en tilstrækkelig renhed for recirkulering i PKC's produktion. Screeningen af potentielle teknologier til oprensning af ethanol er baseret på kravspecifikationer fastsat af PKC. Kravspecifikationerne er listet i TABEL 1.

TABEL 1. Fastlagte kravspecifikationer, som potentielle teknologier vil blive vurderet på baggrund af.

Kvantitative krav	Minimum-grænse	Maksimum-grænse	Vigtighed	Kommentar
Koncentration af oprenset ethanol	85 %		5	
Renhed af oprenset ethanol		99,5 %	5	Indhold af urenheder må maksimalt være 0,5 %
Volumen af ethanol til vask af produkt (årlig)		380.000 L	5	Volumen af benyttet ethanol
Oprensningstid		5 dage	3	Den maksimale tilladte tid, som oprensningen af ethanol må tage
Indhold af komponent A		0 %	2	Værdi i oprenset ethanol
Indhold af komponent B		1 %	1	Indhold inden oprensning
		0,0 %	5	Værdi i oprenset ethanol
Indhold af Toluen		1 %	5	Indhold inden oprensning
		0 %	4	Værdi i oprenset ethanol
Indhold af komponent C		0,1 %	1	Indhold inden oprensning
		0,0 %	4	Værdi i oprenset ethanol
Indhold af tørstof		1 %	5	Indhold inden oprensning
		0,0 %	4	Værdi i oprenset ethanol
Pris for oprenset ethanol [DKK/L]	10	20	3	
Pladsbehov		500 m ²	1	Maksimumvolumen på opbevaring 30.000 L

Ydermere vil potentielle teknologier også blive vurderet på baggrund af deres universalitet.

Oprindeligt var det et krav for oprensningsprocessen, at alle ethanolreststrømme, uanset hvilken produktion de stammede fra, skulle kunne oprenses sammen. Et sådant krav ville gøre håndtering af strømme mere ligetil og ville sikre, at man ikke skulle opbevare ethanol fra bestemte produktioner separat ved f.eks. produktionspause. Det ville dog besværliggøre kvalitetskontrollen af de forskellige produktioner, og på baggrund heraf blev det besluttet at holde ethanolreststrømmene adskilt. Det vil sige, at ethanolreststrømmene skal oprenses og recirkuleres i samme produktion, som de er benyttet i. En fordel ved at holde ethanolreststrømmene adskilt er, at oprensningsteknologien ikke skal tage højde for kontaminanterne i produktionen af begge de to produkter, modificeret stivelse og DEAE Dextran. Når reststrømmene ikke sammenblandes, skal de opsamles hver for sig, for hver produktion og oprenses efter specialudviklet oprensningsspecification særligt udviklet til indholdet i den pågældende strøm.

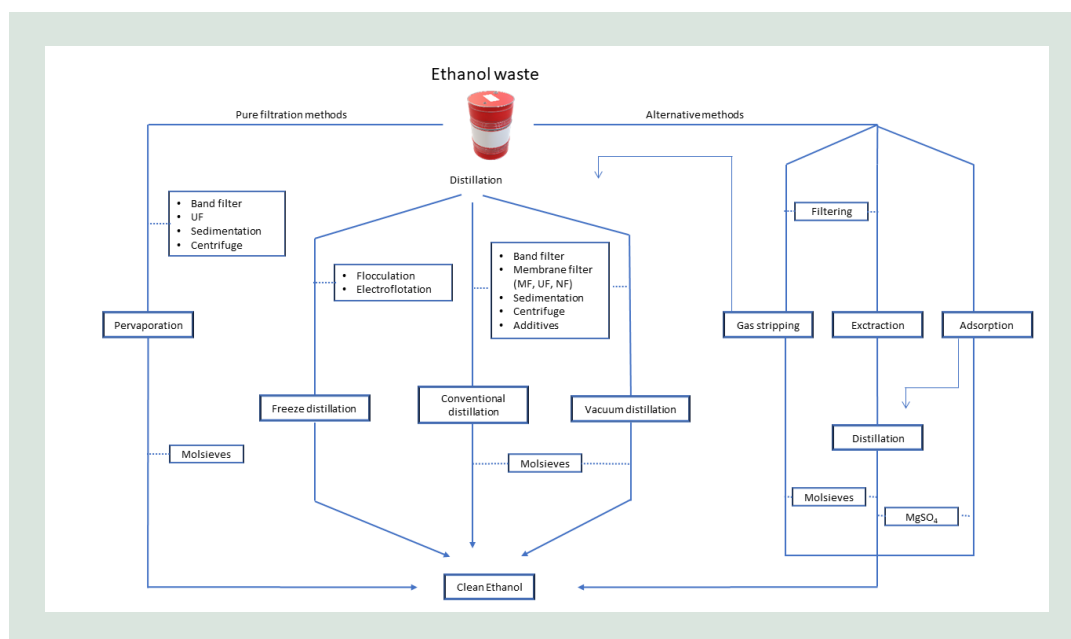
Ved udvælgelse af teknologier har der også været fokus på pris for oprensningsprocessen og på oprensningstiden. Den udvalgte teknologi og tilhørende proces skal være økonomisk rentabel for PKC for at kunne retfærdiggøre den nødvendige investering til en oprensningsproces. Ydermere, skal oprensningstiden være overkommelig, så der ikke opstår logistiske og sikkerhedsmæssige problemer ved opbevaring af store mængder ethanol.

I projektet er der også undersøgt potentielle teknologier til forbehandling af ethanolreststrømme fra PKC. Dette er gjort, da PKC ved tidligere forsøg med destillation har observeret, at rester af tørstof og stivelse fra produktionen har voldt problemer i destillationskedlen. Idet meget få teknologier effektivt kan frasortere store mængder stivelse og separere solventer, er det derfor

forventet, at den endelige løsning bliver en kombination af en forbehandling og en oprensnings-teknologi.

2.3 Screening af potentielle teknologier

Gennem en bred afsøgning indenfor oprenseteknologier for både solventer, spildevand, slam m.fl. fandt Teknologisk Institut flere potentielle oprensnings- og forbehandlingsteknologier, der var relevante for ethanoloprensning hos PKC. En grafisk illustration over teknologierne kan ses i FIGUR 1. I den brede afsøgning er der ikke taget forbehold for, hvor egnet teknologien er til PKC's ethanolreststrømme. Dette tages der først højde for ved den dybdegående undersøgelse af teknologierne.



FIGUR 1. Grafisk oversigt over tænkelige oprensningsveje. Figuren er delt op i tre hovedkategorier: Rene filtreringsmetoder (Pure filtration methods - venstre del af figuren), destillation (midterste del af figuren) og alternative metoder (alternative methods - højre del af figuren). De tre kategorier er opsat således, at der først er en eventuel forbehandling efterfulgt af en oprensningsteknologi. Efter oprensningsteknologien er der tilføjet en opkoncentrering, hvor ethanol-koncentrationen kan øges yderligere, hvis nødvendigt.

De identificerede oprensnings- og forbehandlingsteknologier er beskrevet i henholdsvis TABEL 2 og TABEL 3.

TABEL 2. Potentielle oprensningsteknologier til ethanolstrømme.

Teknologi	Beskrivelse	Ulemper ved teknologi
Konventionel destillation	Separation af komponenter baseret på kogepunkt.	Kan være ineffektiv til at adskille azeotroper og komponenter med lavere kogepunkt end ethanol.
Fryse-destillation	Separation af komponenter baseret på frysepunkt.	Kræver frysning af blandingen, hvilket kan påvirke driftsomkostningerne og energieffektiviteten. Derudover er det en meget ineffektiv destillationsform, som det ikke er let at styre udfaldet af.

Teknologi	Beskrivelse	Ulemper ved teknologi
Vakuumdestillation	Benyttes oftest ved separation af komponenter med højt kogepunkt ved atmosfærisk tryk. Et nedsat tryk nedsætter kogepunktet, hvilket derfor kræver mindre energitilførsel.	Kan være ineffektiv til at adskille visse komponenter med lavt kogepunkt, da disse vil fordampe lettere ved det lavere tryk. Vakuum sænker teoretisk driftsomkostningerne, da der skal tilføres mindre energi. Til gengæld kræver et vakuumdestillationsanlæg mere vedligeholdelse.
Ekstraktiv destillation	Tilsætning af et solvent for at hjælpe med at bryde eller omgå to eller flere kemiske stoffer, som kan koges ved en fast temperatur og tryk, uden at sammensætningen ændres. [2]	Uønskede komponenter kan blive opløst i solventen. Brugen af solvent kan også øge driftsomkostningerne. Ydermere kan tilsætning af solvent føre til miljømæssige bekymringer for f.eks. vand- og luftforurening.
Wiped thin film fordamper	Kontinuert separation af komponenter ved at introducere en mekanisk agiteret tynd film af komponenterne til en varm overflade. Teknologien benytter sig også af vakuum for at sænke kogepunktet for komponenterne. [3]	Teknologien er ikke udbredt i industrien og kræver mere udvikling end et konventionelt anlæg såsom destillationsanlæg.
Pervaporation	En membranseparationsproces til adskillelse af væskeblandinger via forskellen på komponenters damptryk. [4]	Membranerne til pervaporation er typisk dyre og kræver jævnlig vedligeholdelse for at sikre optimal ydeevne. Ydermere er pervaporation kun anvendelig for komponenter med lavt kogepunkt. Teknologien har begrænset kapacitet.
Gasstripping	Separation af en eller flere komponenter fra en væskefase ved hjælp af en gas. For ethanol ville det være relevant at benytte CO ₂ eller N ₂ .	Uønskede komponenter kan blive opsamlet af den valgte gas. Brugen af inert gas kan også øge driftsomkostningerne. Derudover er metoden ineffektiv set i forhold til de mængder, der ønskes oprenset.
Adsorption	Akkumulation af en eller flere komponenter på overflade af adsorbent, f.eks. aktiv carbon, zeolit eller en ionbytterpolymer. [5]	Uønskede komponenter kan slippe igennem den valgte adsorbent. Brugen af adsorbent kan også øge driftsomkostningerne. Ydermere kan brugen af adsorbent føre til miljømæssige bekymringer, f.eks. mht. affaldshåndtering.

TABEL 3. Potentielle forbehandlingsteknologier til ethanolstrømme.

Teknologi	Beskrivelse	Ulemper ved teknologi
Polymerbaseret membranfiltrering	Membranfiltrering, hvor membranen er fremstillet af et polymermateriale. Partikler større end porerne i membranen vil blive fanget og filtreret ud. [6]	Membranen kræver jævnlig vedligeholdelse for at sikre optimal ydeevne. Kapaciteten af membranen er begrænset og vil kunne filtrere et vist volumen, inden vedligeholdelse er påkrævet.
Keramisk membranfiltrering	Membranfiltrering, hvor membranen er fremstillet af et keramisk materiale, f.eks. silika. Membranen kan modstå højt tryk og flow samt høj temperatur og aggressive kemikalier.	Membranen er dyr og kræver jævnlig vedligeholdelse for at sikre optimal ydeevne. Kapaciteten af membranen er begrænset og vil kun kunne filtrere et vist volumen, inden vedligeholdelse er påkrævet. Keramiske membraner er mere modstandsdygtige og har væsentligt længere levetid end polymerbaserede membraner. Til gengæld er de meget dyrere og ikke så langt udviklet som polymerbaserede.

Teknologi	Beskrivelse	Ulemper ved teknologi
Centrifugering	Separation af komponenter baseret på masse.	En batchprocescentrifugering er besværlig at håndtere og kræver mandskab at styre.
Kontinuert centrifugering	Separation af komponenter baseret på masse. Komponenterne tilføres og adskilles i en kontinuerlig proces.	Kontinuert centrifugering kan køres ubemandet og fungerer rigtig godt. I udgangspunktet er der ingen ulemper ved denne teknologi.
Invers flokkulering	Reststrømmene fra PKC's produktion indeholder flokkuleringsmidler. Ved at introducere partikler til blandingen vil man kunne udfælde tørstoffet.	Det er ikke umiddelbart fordelagtigt at introducere partikler til en blanding, som skal imødekomme strenge krav til renheden af det færdige produkt.
Elektroflotation	Separation af komponenter ved brug af elektrolytisk genererede luftbobler. Luftboblerne vil løfte faste komponenter til overfladen, hvor de kan fjernes fra blandingen.	Udgør en meget stor brand-/eksplosionsrisiko, fordi der her er tale om ethanol.
Stationær sedimentering	Separation af komponenter baseret på densiteten og formen af faste komponenter afgør sedimenteringshastigheden.	Uønskede komponenter skal være faste. Teknologien kræver meget plads og regelmæssig vedligeholdelse. Ydermere kan det være en tidskrævende proces.
Båndfilter	Filteringsproces ved brug af bevægeligt bånd med filtermedium. Partikler større end porerne i filtermediet vil blive fanget og filtreret ud.	Kræver regelmæssig vedligeholdelse for at sikre optimal ydeevne. Filteret har en begrænset levetid og er ikke egnet til filtrering af viskøse væsker eller væsker med højt indhold af faste partikler.

2.3.1 Dybdegående undersøgelse og risikoevaluering af de mest lovende teknologier

På baggrund af teknologierne beskrevet i TABEL 2 og TABEL 3 samt de vurderede ulemper for teknologierne er seks teknologier udvalgt til en dybdegående undersøgelse af teknologiernes egnethed for de relevante ethanolreststrømme hos PKC. De udvalgte oprensningsteknologier er pervaporation, konventionel destillation og vakuumdestillation. De udvalgte forbehandlingsteknologier er centrifugering, membranfiltrering med fokus på ultrafiltrering og sedimentering. I dette afsnit fremgår en begrundelse for de valgte teknologier samt et resumé af den dybdegående undersøgelse. Teknologierne er blevet sammenholdt med kravspecifikationerne i TABEL 1 for at udarbejde en risikoevaluering. Risikoevalueringen vurderer risikoen for, at den pågældende teknologi ikke kan imødekomme kravspecifikationerne. Risikoevalueringen kan findes i Bilag 2.

De teknologier, der ikke er blevet udvalgt til videre undersøgelse, er enten ineffektive, dyre eller ikke teknologisk udviklede. Efterbehandlingsmetoderne vist i FIGUR 1 er ikke blevet undersøgt, da den jomfruelige ethanol allerede bliver blandet med vand i vasketrinene hos PKC. Det er derfor ikke nødvendigt at fjerne vandindholdet før recirkuleringen, så længe den oprensede ethanol imødekommer kravet på 85 % i koncentration og ikke indeholder kontaminanter.

Pervaporation

Selvom pervaporation, på nuværende tidspunkt, ikke er udviklet til stor industriel skala, er der potentielt store fordele ved teknologien. Et pervaporationsanlæg er mindre end et konventionelt destillationsanlæg. Det vurderes, at et anlæg ville have størrelse af en normal container. Derudover ville der kunne opnås stor separationsgrad, og det ville være nemmere at skille f.eks. toluen og ethanol i reststrømmen fra produktionen af modificeret stivelse. På baggrund af dette er det blevet undersøgt, igennem kontakt til leverandører, hvor udviklet teknologien er, og til hvilken kvalitet PKC's ethanolreststrømme vil kunne oprensnes. I TABEL 4 ses teknologiresumé for Pervaporation.

TABEL 4. Teknologiresumé for Pervaporation.

Beskrivelse	Pervaporation er en type af filtreringsanlæg, der udnytter forskelle i komponenters damptryk, og som er i stand til at opkoncentrere ethanol med både tørstof og andre solventer. Den forventede koncentration af den oprensede ethanol via pervaporation er omkring 95 %.
Universalitet	Processen forventes anvendelig på alle ethanolstrømme; dog skal det undersøges, om tørstofindholdet i specifikke reststrømme er så høj, at denne risikerer at stoppe filteret/membranen.
Sikkerhed	Reststrømmen vil kunne føres direkte igennem filteret og derefter tappes fra anlægget. Membranen skal holdes under vakuum, hvilket udgør den største risiko.
Modenhed af teknologi	Teknologien er dokumenteret succesfyldt anvendt til oprensning i mindre skala.
Pladsbehov	Pervaporationsanlæg er generelt mindre end destillationsanlæg.
Investering og driftsomkostninger	Investeringsvurdering (1-5 \$): \$\$-\$\$\$ Prisen for et pervaporationsanlæg købt i Danmark estimeres til 1-3 millioner DKK. Omkostningerne for oprenset ethanol ved brug af pervaporation på blandinger, som indeholder 5-10 % alkohol, er 2,8 DKK/L. Det forventes, at prisen for oprensning af blandinger med højere koncentration vil være lavere. Dog er vedligeholdelsesomkostningerne ikke inkluderet i prisen. [7]

På baggrund af leverandørkontakt angående teknologien vurderes det, at pervaporation ikke er egnet til oprensning af de store mængder ethanolreststrømme, som produceres hos PKC.

Konventionel destillation og vakuumdestillering

Konventionel destillation er udbredt i industrien og særligt indenfor farmaindustrien, hvilket giver konventionel destillation en høj universalitet. Vakuumdestillation er ligeledes udbredt inden for industrien og muliggør en mere energieffektiv destillation sammenlignet med konventionel destillation. I TABEL 5 ses teknologiresumé for vakuumdestillation og konventionel destillation.

TABEL 5. Teknologiresumé for vakuumdestillation og konventionel destillation.

Beskrivelse	Ved konventionel destillation og vakuumdestillation varmes ethanolen op og kondenseres i en kolonne, hvorved man opnår en oprenset ethanol. Renhedsgraden afhænger af urenheders kogepunkt og damptryk. Ved at påføre vakuum sænkes omkostningerne til opvarmning, da kogepunktet sænkes. For at øge renheden kan flere destillationstrin kombineres. Den forventede koncentration for destilleret ethanol er omkring 80-96 % afhængigt af kolonnen.
Universalitet	Processen kan bruges til alle reststrømme. Dog kan strømme med højt tørstofindhold hindre procesdrift og kræve hyppig rengøring af anlægget. Derfor skal destillation formentlig kombineres med en forbehandlingsteknologi, som kan fjerne tørstof. Processen kan anvendes både som batchproces og kontinuerlig proces.
Sikkerhed	Kræver, at personalet er trænet i at anvende destillationsanlægget, og at eventuelle vakuumdele håndteres med forsigtighed. Relativt store mængder ethanol kulmineres for processen, og brandfare er som i de øvrige teknologier en relevant faktor.
Modenhed af teknologi	Teknologien er den af de evaluerede teknologier, som anvendes oftest og bredest i farmaindustrien.
Pladsbehov	Et destillationsanlæg til håndtering af de relevante mængder ethanol fylder adskillige kvadratmeter (estimeret 30-500 m ² afhængigt af kapacitet). Derfor er destillationsanlægget mange meter højt (10-30 m) på grund af de høje kolonner.

Beskrivelse	Ved konventionel destillation og vakuumdestillation varmes ethanolen op og kondenseres i en kolonne, hvorved man opnår en oprenset ethanol. Renhedsgraden afhænger af urenheders kogepunkt og damptryk. Ved at påføre vakuum sænkes omkostningerne til opvarmning, da kogepunktet sænkes. For at øge renheden kan flere destillationstrin kombineres. Den forventede koncentration for destilleret ethanol er omkring 80-96 % afhængigt af kolonnen.
Investering og driftsomkostninger	Investeringsvurdering (1-5\$): \$\$-\$\$\$ Et destillationsanlæg vurderes at være billigere end et pervaporationsanlæg. Oprensning ved destillation skal potentielt kombineres med filtrering eller centrifugering. De estimerede omkostninger ved ideel fordampning med elektrisk varmeoverførsel er minimum 0,70 DKK/L. For et reelt destillations-system forventes prisen at være minimum 2-3 gange højere end ved ideel fordampning.

Centrifugering

Centrifugering er en moden, udbredt teknologi, samtidig med at det er en billig løsning. Centrifugering kan foregå som batchcentrifugering eller som kontinuert centrifugering. For at teste teknologien på laboratorieskala ville en batchcentrifugering blive benyttet, men på industriel skala vil man altid kunne 'opgradere' en batchcentrifugering til en kontinuert centrifugering. I TABEL 6 ses teknologiresumé for centrifugering.

TABEL 6. Teknologiresumé for centrifugering.

Beskrivelse	Centrifugering kan benyttes til at fjerne tørstof fra ethanolstrømmene, men kan ikke oprense ethanolen.
Universalitet	Er kun nødvendig til de reststrømme, hvor mængden af tørstof udgør et problem for procesdriften.
Sikkerhed	Korrekt installation af centrifugen er essentiel for sikkerheden. Centrifugen skal installeres forsvarligt, så der kan kompenseres for bl.a. de store kræfter, der er involveret ved f.eks. pludseligt stop. Samtidig skal det sikres, at man ikke kan komme i kontakt med centrifugen, når processen er i gang. Der er ikke behov for særlig, øget lagring af ethanol.
Modenhed af teknologi	Teknologien er meget moden og kan købes kommercielt ved flere forhandlere.
Pladsbehov	En centrifuge, som skal håndtere ethanolstrømmene hos pK Chemicals, vil fylde ca. 2 m ² .
Investering og driftsomkostninger	Investeringsvurdering (1-5\$): \$ Den største omkostning forbundet med centrifugering er det energiforbrug, der er forbundet med processen. Dog skal processen kobles med en oprensningsteknologi, da centrifugering ikke kan oprense ethanol.

Membranfiltrering

Membranfiltrering er udbredt på industriel skala, men er en dyr teknologi. For membranfiltrering er ultrafiltrering blevet undersøgt grundet partikelstørrelsen på tørstoffet i PKC's reststrømme. I TABEL 7 kan teknologiresumé for ultrafiltrering ses.

TABEL 7. Teknologiresumé for ultrafiltrering.

Beskrivelse	Membranfiltrering, som fjerner partikler større end 0,01 µm. Filtrering vil ikke opkoncentrere ethanol, men blot fjerne partikler.
Universalitet	Er kun nødvendig til de reststrømme, hvor mængden af tørstof udgør et problem for procesdriften.

Beskrivelse	Membranfiltrering, som fjerner partikler større end 0,01 µm. Filtrering vil ikke opkoncentrere ethanol, men blot fjerne partikler.
Sikkerhed	Membranfiltrering udgør ingen sikkerhedsmæssige risici. Det er muligvis en nødvendighed at tilføje en opbevaringstank til ethanol før filtrering, hvorefter lagringen af ethanol er som ved destillation.
Modenhed af teknologi	Brugt i mange industrier. Nemt at anskaffe hos mange leverandører.
Pladsbehov	Varierer i størrelse. Potentielt set skal der anvendes flere af sådanne opsætninger for at behandle den relevante mængde ethanol.
Investering og driftsoms-kostninger	Investeringsvurdering (1-5\$): \$\$\$\$\$ Membranfiltrering er et dyrt alternativ i både indkøb og vedligeholdelse samt i drift. Dog skal processen kobles med en oprensningsteknologi, da ultrafiltrering ikke kan opkoncentrere ethanol.

Sedimentering

Sedimentering er en moden metode og en billig løsning. Eftersom PKC opbevarer ethanolreststrømmene i store tanke, er det valgt at undersøge, om sedimentering i tankene kan virke som forbehandling, da forbehandling allerede er implementeret hos PKC. I TABEL 8 ses teknologiresumé for sedimentering.

TABEL 8. Teknologiresumé for sedimentering.

Beskrivelse	Sedimentering vil ikke opkoncentrere ethanol, men blot fjerne faste partikler.
Universalitet	Er kun nødvendig til de reststrømme, hvor mængde af tørstof udgør et problem for procesdriften.
Sikkerhed	Vil kræve en del plads til tanke til opbevaring af ethanol. Dette udgør en sikkerhedsrisiko i forhold til brandsikkerhed.
Modenhed af teknologi	Veletableret metode, som også anvendes på industriel skala.
Pladsbehov	Kræver en stor mængde plads og afhænger af mængden af ethanol, som skal renses.
Investering og driftsoms-kostninger	Investeringsvurdering (1-5\$): \$ Sedimenteringstanke koster ikke meget, men kræver regelmæssig vedligeholdelse. Det er en billig, men tidskrævende metode til at fjerne tørstof.

2.3.2 Udvalgelse af teknologier til laboratorietest

På baggrund af den dybdegående undersøgelse og risikoevalueringen i Bilag 2 af de undersøgte teknologier er oprensningsteknologierne konventionel destillation og vakuumdestillation samt forbehandlingsteknologierne centrifugering og membranfiltrering blevet udvalgt til test på laboratorieskala.

3. Laboratorietest af teknologier

I dette kapitel beskrives tilgangen til prøveudtag og laboratorietest af de udvalgte teknologier. Først blev prøverne fra de relevante solventstrømme analyseret for præcis at kortlægge deres indhold, og herved hvad de udvalgte teknologier skulle formå at fjerne fra prøverne. Derefter blev prøverne oprenset med de udvalgte teknologier, og på baggrund af de første resultater blev parametre optimeret og opskaleret til større laboratorieskala.

3.1 Prøveudtagning af ethanolstrømme

Til udførelse af de indledende laboratorietest er der benyttet reststrømme fra PKC's produktion af DEAE Dextran og modificeret stivelse. Produktionen er beskrevet i afsnit 2.1. Reststrømmene fra DEAE Dextran og produktionen af modificeret stivelse vil igennem rapporten blive omtalt henholdsvis ethanolstrøm 1 og ethanolstrøm 2. I produktionen benyttes ethanolstrøm 1 og ethanolstrøm 2 til at vaske produktet i forskellige vasketrin. Prøveudtagningen af ethanolstrømmene er foretaget under selve produktionen i de forskellige vasketrin.

Inden forbehandlings- og oprensningsteknologierne undersøges, analyseres ethanolstrømmene for indholdet af kontaminanter. Herved skabes udgangspunktet for det vandindhold og den koncentration af andre komponenter i reststrømmen, som ønskes udrenset.

For ethanolstrøm 1 er indholdet af ethanol, komponent A, tørstof og vand blevet undersøgt for de fire ethanolvasketrin. Indholdet af disse komponenter kan ses i TABEL 9.

TABEL 9. Indhold af komponenter i ethanolstrøm 1 inden oprensning. Indholdet af komponenter er undersøgt med gaskromatografi-massespektrometri (GC-MS). Retentionstiden og den relative responsfaktor er ikke valideret for de undersøgte stoffer, hvilket kan forklare, hvorfor resultaterne ikke summerer op til 100 %. Resultaterne kan derfor ikke benyttes som absolutte værdier, men som en indikation på forholdet mellem de analyserede komponenter.

Sample	Ethanol (%)	Komponent A (%)	Tørstof (%)	Vand (%)
Vask 1	58,8	9,2	5,2 ± 0,3	28,6 ± 3,0
Vask 2	61,8	9,2	1,9 ± 0,1	27,4 ± 2,6
Vask 3	59,0	8,8	0,9 ± 0,1	29,6 ± 2,3
Vask 4	60,1	8,9	0,6 ± 0,1	29,6 ± 2,3

For ethanolstrøm 2 undersøges indholdet af ethanol, toluen, tørstof og vand. Indholdet af komponenter kan ses i TABEL 10 for vask 1 og 2. For produktionen af modificeret stivelse er der flere vasketrin, men til laboratorietestene er vask 1 og 2 udvalgt, da de anses som de mest kontaminerede og derved vil være de vasketrin, hvor oprensning vil være sværest.

TABEL 10. Indhold af komponenter i ethanolstrøm 2 inden oprensning. Indholdet af komponenter er undersøgt med GC-MS. Retentionstiden og den relative responsfaktor er ikke valideret for de undersøgte stoffer, hvilket kan forklare, hvorfor resultaterne ikke summerer op til 100 %. Resultaterne kan derfor ikke benyttes som absolutte værdier, men som en indikation på forholdet mellem de analyserede komponenter.

Sample	Ethanol (%)	Toluen (%)	Tørstof (%)	Vand (%)
Vask 1 og 2	92,1	9	0,3 ± 0,2	4,5 ± 0,6

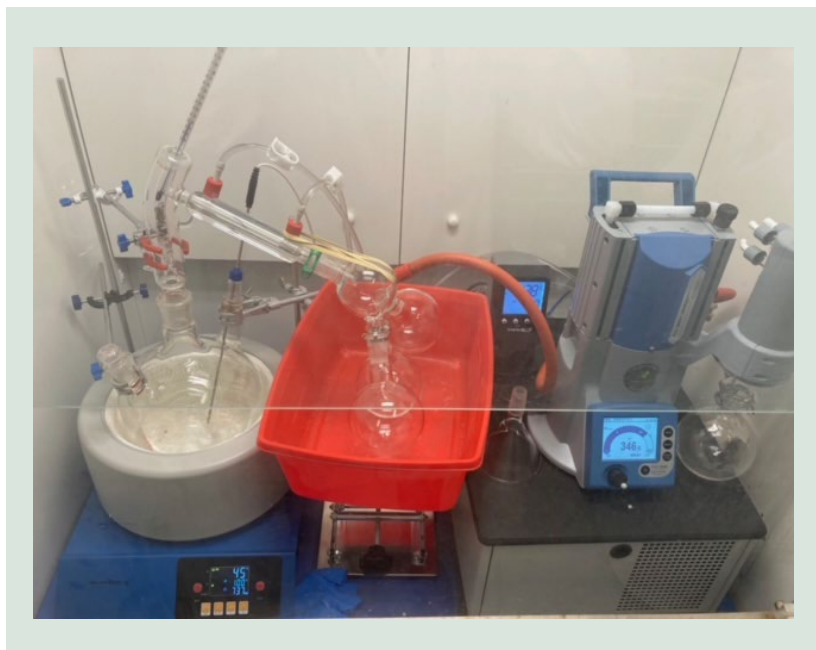
Baseret på komponentindholdet vist i TABEL 9 og TABEL 10 er vask 1 fra ethanolstrøm 1 og vask 1 og 2 fra ethanolstrøm 2 udvalgt til de indledende forsøg da de indeholder flest kontaminanter og dermed vil være de sværeste at oprense.

3.2 Indledende forsøg med udvalgte teknologier

Ethanolstrøm 1 er blevet oprenset med de udvalgte teknologier, konventionel destillation, vakuumdestillation, centrifugering og ultrafiltrering. For ethanolstrøm 1 er der også udført forsøg med keramisk membranfiltrering med en porestørrelse på 100 µm. Ethanolstrøm 2 blev oprenset med destillation, centrifugering og almindelig filtrering. I afsnit 3.2.1 til 3.2.5 er fremgangsmåden for laboratorieforsøgene beskrevet for de benyttede teknologier. Til de indledende forsøg er der benyttet 1 til 2 L.

3.2.1 Konventionel destillation

Til brug for den konventionelle destillation blev der etableret en opstilling med en 5 L glaskolbe i en varmekappe, og derefter en short-path-kolonne med sammenhørende kondensatorrør. Destillatet blev opsamlet i 3 x 1 L rundbundne kolber. Opsætningen kan ses i FIGUR 2.



FIGUR 2. Destillationsopsætning, hvor der er tilsluttet en vakuum-pumpe. Vakuumpumpen blev benyttet til vakuumdestillation.

3.2.2 Vakuumdestillation

Til udførelse af vakuumdestillation blev der benyttet samme opstilling som ved konventionel destillation. Opstillingen er vist i FIGUR 2. Til destillationen blev en vakuumpumpe tilsluttet med et tryk på 350 mbar.

3.2.3 Centrifugering

Til at undersøge effektiviteten af centrifugering til genanvendelse af ethanol blev der benyttet en Thermo Scientific Megafuge 40. Centrifugen har en kapacitet på 4 x 500 mL. Til alle forsøgene blev der benyttet en omdrejningshastighed på 4.700 omdrejninger i minuttet. Varigheden af centrifugeringen varierede i forsøgene og er angivet ved resultaterne for forsøgene.

3.2.4 Keramisk membranfiltrering

Til at undersøge effektiviteten af filtrering til genanvendelsen af ethanol blev der benyttet en keramisk membran samt båndfiltre i rustfrit stål. Membranen havde en porestørrelse på 100 µm. Filtrene blev benyttet med sugefiltrering ved brug af sugefiltreringstragt og vakuumpumpe. I forsøgene med båndfiltrene blev der anvendt parafilm for at sikre, at filteret sluttede tæt i siderne.

3.2.5 Ultrafiltrering

Til at undersøge effektiviteten af membranfiltrering til genanvendelse af ethanol blev en M20-testenhed fra Alfa Laval anvendt. M20-testenheden er et fuldt integreret membranfiltreringssystem, som kan udstyres med mange typer af membraner. Den kompakte enhed er et fuldt integreret system og omfatter en Alfa Laval LabStak™ M20 indeholdende højtrykspumpe, tank, varmeveksler, ventil, trykmålere og hydraulisk håndpumpe til modulkomprimering.

En blanding af ethanol og vand i forholdet 70:30 fra ethanolstrøm 1 blev filtreret på M20-testenheden. Blandingen indeholdt desuden komponent A samt resterende DEAE Dextran med en angivet middelvægt på 500 kDa. I TABEL 11 er angivet de 5 membrantyper, som blev undersøgt til fjernelse af dextran fra ethanolopløsningen. Alle anvendte membrantyper anvendes til ultrafiltrering.

TABEL 11. Membraner anvendt til ultrafiltrering.

Membrantype	Supportmateriale	Karakteristik	Molecular weight cut-off
PP 95	Polypropylen	Polyethersulfon	2.000
PP 80	Polypropylen	Polyethersulfon	10.000
PP 70	Polypropylen	Polyethersulfon	10.000
PP 61	Polypropylen	Polyethersulfon	10.000
PP 60	Polypropylen	Polyethersulfon	20.000

Omkring 4 L ethanolopløsning blev anvendt til forsøget på M20 testenheden. Ethanolopløsningen blev under tryk recirkuleret hen over membranerne, hvor permeatet fra membranfiltreringen blev opsamlet. Volumen af permeatet blev desuden målt ved brug af måleglas, for at kunne beregne fluxet igennem membranen over tid. For at kvantificere effektiviteten af ultrafiltrering til fjernelse af dextran, blev tørstofindholdet bestemt i de udtagne permeatprøver. Disse blev sammenholdt med tørstofindholdet i den 'rå' ethanolopløsning for at afklare, om der blev opnået en reduktion i indholdet af tørstof, der antages primært at bestå af DEAE Dextran.

Der blev udført to forsøgsomgange med ultrafiltrering af ethanolopløsning. I det første forsøg blev alle 5 typer af membraner testet til fjernelse af DEAE Dextran ved et tryk på 3-5 bar hen over membranerne. I andet forsøg blev kun GR95PP- og GR80PP-membranerne anvendt ved et tryk på 7-9 bar for at undersøge, om et forøget tryk ville resultere i en mere effektiv fjernelse af dextran. Trykket over membranerne varierede en smule, grundet viskositeten af ethanol. Membranerne blev testet hhv. 2 og 3 ad gangen i M20-testenheden for at sikre højt nok flow af ethanolopløsning hen over membranerne. GR95PP og GR80PP blev testet samtidig i M20-testenheden, mens de øvrige tre membraner ligeledes blev testet simultant. To prøver af permeat fra hver membran blev udtaget til bestemmelse af tørstofindholdet efter ca. 10 og 30 min. for at

undersøge, om membranernes evne til at tilbageholde DEAE Dextran blev forringet over tid. Hver tørstofprøve blev udført i duplikatbestemmelse.

3.3 Resultater for de indledende forsøg

I dette afsnit præsenteres resultaterne for de indledende forsøg for ethanolstrøm 1 og ethanolstrøm 2 samt en fælles konklusion, som omhandler læringer fra forsøget og forklaring på, hvilke beslutninger der blev truffet på baggrund af disse.

3.3.1 Resultater for ethanolstrøm 1

Ethanolstrøm 1 er blevet oprenset med de udvalgte teknologier: konventionel destillation, vakuumdestillation, centrifugering og ultrafiltrering. Ydermere er der også udført forsøg med keramisk membran-filtrering med en porestørrelse op til 100 µm.

I TABEL 12 og TABEL 13 kan tørstofindholdet for ethanolstrøm 1 findes efter behandling af de udvalgte teknologier.

TABEL 12. Tørstofindholdet i ethanolstrøm 1 efter konventionel destillering, vakuumdestillering og centrifugering. Tørstofindholdet er målt med GC. Retentionstiden og den relative responsfaktor er ikke valideret for de undersøgte stoffer, hvilket kan forklare, hvorfor resultaterne ikke summerer op til 100 %. Resultaterne kan derfor ikke benyttes som absolutte værdier, men som en indikation på forholdet mellem de analyserede komponenter.

Anvendt teknologi	Prøveudtagning fra	Tørstofindhold [%]
Konventionel destillation	Remanens	9,94
	Destillat	0
Vakuum destillation	Remanens	7,32
	Destillat	0
Centrifugering	Bundfraktion	4,95
	Topfraktion	4,97
Keramisk membran-filtrering	Før filtrering	2,23
	Efter filtrering	2,25

TABEL 13. Oversigt over tørstofindhold for ultrafiltrering. Tørstofindholdet er målt med GC. Retentionstiden og den relative responsfaktor er ikke valideret for de undersøgte stoffer, hvilket kan forklare, hvorfor resultaterne ikke summerer op til 100 %. Resultaterne kan derfor ikke benyttes som absolutte værdier, men som en indikation på forholdet mellem de analyserede komponenter.

Membrantype	Tørstofindhold [%]
Ingen	4,69
PP 95-1	3,4
PP 95-2	3,33
PP 80-1	3,88
PP 80-2	3,83
PP 70-1	4,04
PP 70-2	4,10
PP 61-1	4,11
PP 61-2	4,10
PP 60-1	4,05

Membrantype	Tørstofindhold [%]
PP 60-2	4,11

Tørstofmålingerne vist i TABEL 12 og TABEL 13 er foretaget på vask 1 fra ethanolstrøm 1; dog stammer den benyttede reststrøm fra to forskellige produktionsbatchs af DEAE Dextran. Dette kan forklare, hvorfor tørstofindholdet før keramisk filtrering og ultrafiltrering ikke er ens. Derudover sedimenterer DEAE Dextran, ligesom forskellen i tørstofindhold i de forskellige teknologier afhænger af omrystningen af prøven inden udført forsøg. Resultaterne af tørstofmålingerne kan ikke benyttes til at sammenligne teknologierne, men kan benyttes til at vurdere den enkelte teknologis egnethed til at fjerne tørstof fra ethanolreststrømmen.

Ud fra resultaterne i TABEL 12 ses det, at keramisk filtrering og centrifugering ikke er egnet til at fjerne tørstof fra reststrømmene. For begge destillationsmetoder ses det, at ingen tørstof overføres til destillatet og opkoncentreres i remanensen. Det ses ved destillationen, at opkoncentreringen i remanensen ikke medfører ophobning af tørstof. Resultaterne i TABEL 13 viser, at det er muligt at reducere tørstofindholdet med ultrafiltrering, hvor det gælder, at jo mindre porestørrelsen er, desto mere tørstof bliver der fjernet. Den største reduktion sker ved brug af PP 80-membran, hvor der opnås en tørstofreduktion på 27,5 % sammenlignet med tørstofindholdet inden filtrering.

Udover tørstof er indholdet af ethanol og komponent A også blevet målt for destillatet og remanensen i TABEL 12. Indholdet af andre stoffer såsom vand kunne ikke identificeres og udgør kategorien 'uidentificeret stof'. Resultaterne ses i TABEL 14.

TABEL 14. Oversigt over ethanolkoncentration og komponent A samt andre stoffer målt med GC. Retentionstiden og den relative responsfaktor er ikke valideret for de undersøgte stoffer, hvilket kan forklare, hvorfor resultaterne ikke summerer op til 100 %. Resultaterne kan derfor ikke benyttes som absolutte værdier, men som en indikation på forholdet mellem de analyse-rede komponenter.

Anvendt teknologi	Prøveudtagning fra	Ethanol [%]	Komponent A [%]	Uidentificeret stof [%]
Konventionel destillation	Destillat	71,7	11,6	3,1
	Remanens	52,0	7,3	0,2
Vakuum destillation	Destillat	68,3	11,0	1,2
	Remanens	53,6	8,0	0,4

I destillatet må der ikke være komponent A, hvis den oprensede ethanol skal recirkuleres i PKC's produktion. Dog er det planlagt fra PKC's side at udfase brugen af komponent A, og det er derfor ikke undersøgt nærmere, om der kan opnås en bedre adskillelse.

Konklusion

Ud fra de ovenstående resultater kan det konkluderes, at keramisk filtrering og centrifugering ikke er egnede forbehandlingsteknologier til at reducere tørstofindholdet i ethanolstrøm 1. Membranfiltrering reducerede tørstofindholdet med 27,5 % i ethanolstrøm 1, hvilket dog ikke er en tilstrækkelig reduktion sammenholdt med investeringen til membranfiltrering. Ydermere viser resultaterne fra TABEL 12, at tørstoffet ikke overføres til destillatet. Det betyder, at der i de videre forsøg for ethanolstrøm 1 ikke vil blive inkorporeret en forbehandlingsteknologi. I stedet vil en vedligeholdelse af oprensningsteknologien med evt. rengøring blive taget i betragtning.

Resultaterne fra destillation ses i TABEL 14. Ethanolkoncentrationen i destillatet fra henholdsvis konventionel destillation og vakuumdestillation var 71,7 % og 68,3 %. Disse koncentrationer er

ikke høje nok til at imødekomme kravspecifikationerne. I de indledende forsøg er den benyttede kolonne ikke designet til netop ethanolstrøm 1, hvilket kan forklare, hvorfor den ønskede ethanolconcentration ikke opnås. Dog vil man med et optimalt design af destillationskolonnen kunne sikre den tilstrækkelige koncentration. Vakuumdestillation undersøges ikke videre, da PKC vurderer, at det vil være for stor en investering grundet omkostningerne til anlæg og vedligeholdelse. Baseret på resultaterne fra de undersøgte forbehandlings- og oprensningsteknologier vil der til opskaleringsforsøgene blive benyttet konventionel destillering uden forbehandling.

3.3.2 Resultater for ethanolstrøm 2

Ethanolstrøm 2 blev oprenset med konventionel destillation, centrifugering og keramisk membranfiltrering. Det blev vurderet, at det ikke var nødvendigt at foretage membranfiltreringsforsøg, da de modificerede stivelsespartiklers størrelse burde kunne reduceres ved keramisk membranfiltrering. Ydermere er vakuumdestillation ikke undersøgt grundet investerings- og driftsomkostningerne. Resultaterne for tørstofindholdet fra forbehandlings- og oprensningsteknologierne kan ses i TABEL 15.

TABEL 15. Tørstofindholdet i ethanolstrøm 2 før og efter konventionel destillation, centrifugering og keramisk membranfiltrering. Tørstofindholdet er målt med GC. Retentionstiden og den relative responsfaktor er ikke valideret for de undersøgte stoffer, hvilket kan forklare, hvorfor resultaterne ikke summerer op til 100 %. Resultaterne kan derfor ikke benyttes som absolutte værdier, men som en indikation på forholdet mellem de analyserede komponenter.

Anvendt teknologi	Prøveudtagning af	Tørstofindhold [%]
Ingen	Reference	0,30
Konventionel destillation	Remanens	1,14
	Destillat	0,07
Centrifugering	5 minutter	0,18
	15 minutter	0,28
Keramisk membranfiltrering	Porestørrelse 10 µm	0,28
	Porestørrelse 75 µm	0,23
	Porestørrelse 200 µm	0,33

Tørstofmålingerne i TABEL 15 viser, at ethanolstrøm 2 ikke indeholder store mængder tørstof, inden forbehandling med centrifugering og keramisk membranfiltrering udføres. Resultaterne viser, at der ved centrifugering i 5 minutter kan fjernes 40 % af tørstofindholdet, mens keramisk membranfiltrering med en porestørrelse på 75 µm reducerer tørstofindholdet med 23,3 % sammenlignet med tørstofindholdet inden filtrering. Ved konventionel destillation ses det, at lidt af tørstoffet overføres til destillatet, samtidig med at tørstoffet opkoncentreres i remanensen. Det ses ved destillationen, at opkoncentreringen i remanensen ikke medfører ophobning af tørstof.

Udover tørstofindholdet er vand-, ethanol- og toluenindholdet blevet målt for forbehandlings- og oprensningsteknologierne. Målingerne er foretaget med GC. Ved målingerne er der observeret et peak, som antages at være toluen. Retentionstiden og den relative responsfaktor for peaket er dog ikke valideret. Resultaterne ses i TABEL 16.

TABEL 16. Oversigt over vandindhold, ethanolconcentration og toluenindhold for ethanolstrøm 2 målt med GC. Retentionstiden og den relative responsfaktor er ikke valideret for de undersøgte stoffer, hvilket kan forklare, hvorfor resultaterne ikke summerer op til 100 %. Resultaterne kan derfor ikke benyttes som absolutte værdier, men som en indikation på forholdet mellem de analyserede komponenter.

Anvendt teknologi	Prøveudtagning af	Vandindhold [%]	Ethanol [%]	Toluen [%]
Ingen	Reference	4,5	92,1	9,0
Konventionel destillation	Remanens	5,3	96,1	1,9
	Destillat	5,1	92,3	10,5
Centrifugering	5 minutter	4,7	97,2	8,4
	15 minutter	4,8	95,3	8,6
Keramisk membran-filtrering	Porestørrelse 10 µm	4,7	93,9	8,6
	Porestørrelse 75 µm	5,1	92,6	8,8
	Porestørrelse 200 µm	4,9	94,5	7,4

Resultaterne i TABEL 16 viser, at ethanolstrøm 2 indeholder relativt store mængder toluen sammenlignet med kravspecifikationerne listet i TABEL 1. Ved centrifugering i 5 minutter kan toluenindholdet reduceres med 6,7 %, hvor keramisk membran-filtrering med porestørrelse 200 µm reducerer toluenindholdet med 17,8 %. Ved konventionel destillation overføres toluenen til destillatet, samtidig med at den opkoncentreres.

Konklusion

Ud fra overstående resultater kan det konkluderes, at centrifugering i 5 minutter er bedst egnet til at reducere tørstofindholdet i ethanolstrøm 2, da der her blev opnået en reduktion på 40 %. Keramisk membran-filtrering anses ikke som egnet til at reducere tørstofindholdet, da den største reduktion var på 23,3 % ved en porestørrelse på 75 µm sammenlignet med tørstofindholdet inden filtrering. Dog er indholdet af tørstof i ethanolstrøm 2 inden nogen behandling så lavt, at det antages, at en forbehandling ikke er nødvendig.

Resultaterne for vandindhold, ethanolconcentration og toluenindhold for keramisk membran-filtrering viser en mindre opkoncentrering af ethanol og en reduktion i toluenindhold. Keramisk membran-filtrering med porestørrelse 200 µm reducerer toluenindholdet med 17,8 %. For centrifugering sker der ligeledes en mindre opkoncentrering af ethanol og en reduktion i toluenindhold. Reduktionen af toluen er ved nogle af forbehandlingsteknologierne ikke tilstrækkelig stor til at imødekomme kravspecifikationen på 0,5 % toluenindhold.

Ved konventionel destillation opnås en ethanolconcentration på 93,3 % i destillatet. Denne concentration er ikke høj nok til at imødekomme kravspecifikationerne. I de indledende forsøg er den benyttede kolonne ikke designet til netop ethanolstrøm 2, hvilket kan forklare, hvorfor den ønskede ethanolconcentration ikke opnås. Dog vil man med et optimalt design af destillationskolonnen kunne sikre den tilstrækkelige concentration. Ved konventionel destillation overføres toluenen til destillatet, og der opnås en opkoncentrering. Da concentrationen af toluen generelt er for høj ved både forbehandlings- og oprensningsteknologierne til at imødekomme kravspecifikationerne, vurderes det, at vask 1 og 2 ikke ville kunne oprenses tilstrækkeligt til, at det kan recirkuleres i PKC's produktion. Derfor vil der blive arbejdet videre med ethanolreststrømmen fra vask 3 ved opskaleringen, da toluenindholdet burde være mindre. Baseret på resultaterne fra de undersøgte forbehandlings- og oprensningsteknologier vil der til opskalingsforsøgene blive benyttet konventionel destillation uden forbehandling.

4. Opskalering af oprensningsteknologi

I dette kapitel beskrives tilgangen til opskalering af den udvalgte oprensningsteknologi. Først er teknologien blevet opskaleret og tilpasset reststrømmene. Derefter er prøverne blevet oprenset med den opskalerede teknologi og på baggrund af forsøget, er den oprensede ethanol blevet brugt til at producere modificeret stivelse hos PKC. Ydermere er der foretaget stresstest af den opskalerede teknologi for at undersøge evt. kritiske parametre for oprensningen.

4.1 Opskalering af destillationsanlæg

Til opskaleringen af destillationsanlægget blev der taget udgangspunkt i det udstyr og den opstilling til konventionel destillation, der er beskrevet i afsnit 3.2.1. Til opstillingen er der tilføjet en destillationskolonne med 'protruded metal dump-packings' som pakningsmateriale. Ydermere blev kondensoren udskiftet, og en større opsamlingsbeholder blev benyttet. Opstillingen blev oprindeligt designet til vakuumdestillation, men blev rekonstrueret til konventionel destillation ved at fjerne vakuumpumpen. Opstillingen ses i FIGUR 3.



FIGUR 3. Billede af det opskalerede destillationsanlæg. Der blev, efter at dette billede blev taget, foretaget små ændringer, som sikrede, at den fordampede ethanol ikke blev ført gennem de røde slanger, men i stedet gennem glastrør.

4.2 Opskalering af ethanolstrøm 1

For at oprense ethanolstrøm 1 er konventionel destillation uden forbehandling valgt ud fra resultaterne i afsnit 3.3.1. Der er dog ikke foretaget opskaleringsforsøg for denne reststrøm, da opskaleringsforsøg af ethanolstrøm 2 blev opprioriteret. Baggrunden herfor var en planlagt opskalering af produktionen af modificeret stivelse, således at volumen af ethanol, som anvendes og destrueres i dag, vil stige kraftigt i fremtiden. Hos PKC er der desuden allerede implementeret et destillationsanlæg i DEAE Dextran-produktionen, omend anlægget er af ældre dato og snart skal udskiftes. Ud fra de indledende forsøg er der intet, som tyder på, at en opskalering og implementering af et nyt destillationsanlæg for ethanolstrøm 1 ikke skulle kunne gennemføres.

4.3 Opskalering af ethanolstrøm 2

For at oprense ethanolstrøm 2 er konventionel destillation uden forbehandling udvalgt, på baggrund af resultaterne i afsnit 3.3.2. Opskalering er vist i FIGUR 3. I afsnit 3.3.2 ses det, at destillation af vask 1 og 2 i produktionen af modificeret stivelse ikke er egnet til genanvendelse, da destillatet fra disse ikke imødekommer kravspecifikationerne i TABEL 1. Grundet lange ventetider på disse resultater er der i mellemtiden blevet destilleret på vask 1 og 2 i den opskalede forsøgsopstilling. I opskaleringen blev der destilleret på 10 L ethanol.

Destillationen af vask 1 og 2 er udført således, at der i den opskalede forsøgsopstilling destilleres fra 78 °C indtil temperaturen når 80 °C. Når de 80 °C er opnået, opsamles destillatet, og der udtages en prøve fra remanensen. Der tilføres ny vask 1 og 2, som passer med mængden af opsamlet destillat. Dette gentages, indtil volumen i kolben forbliver konstant ved 80 °C. Når dette punkt er nået, øges temperaturen fra 80 °C til 82 °C, hvorefter destillatet opsamles, og der udtages en prøve af remanensen. Derefter tilføjes ny vask 1 og 2 og destillationen starter forfra med proceduren for 80 °C og efter 82 °C. Efter opsamling af 21 prøver med tilhørende destillat og remanens afsluttes forøget.

Efterfølgende er den opskalede forsøgsopstilling benyttet til at destillere vask 3 fra ethanolstrøm 2, således at der efter destillation er produceret 10 L destillat. Destillationen er foretaget således, at der destilleres på 4 L, hvortil der tilføres ny vask 3 løbende, så der stadig er væske i kolben. Dette gøres, indtil det ønskede volumen er opnået.

4.3.1 Resultater for opskalering af ethanolstrøm 2

Af de opsamlede 21 prøver med tilhørende destillat og remanens er der udvalgt prøver til analyse. Det er ikke alle prøver, som er blevet analyseret, og af de analyserede prøver er det ikke alle, hvor både destillat og remanens er blevet analyseret. Resultatet for destillationen af vask 1 og 2 fra ethanolstrøm 2 ses i TABEL 17 for destillationen fra 78 °C til 80 °C og i TABEL 18 for destillationen fra 80 °C til 82 °C.

TABEL 17. Resultater for destillation af ethanolstrøm 2, vask 1 og 2 til 80 °C. Det er ikke alle remanensprøver, hvor destillatet også er analyseret.

Prøvenummer		Toluen [%]	Ethanol [%]
1	Remanens	4,76	81,03
	Destillat	11,7	79,3
2	Remanens	4,24	80,01
3	Remanens	4,39	80,74
4	Remanens	3,98	80,51
5	Remanens	4,35	80,17
6	Remanens	3,99	80,41
7	Remanens	4,3	79,6
8	Remanens	4,46	80,64
	Destillat	10,94	81,8

TABEL 18. Resultater for destillation af ethanolstrøm 2, vask 1 og 2 til 82 °C. Det er ikke alle remanensprøver, hvor destillatet også er analyseret.

Prøvenummer		Toluen [%]	Ethanol [%]
9	Remanens	0,51	76,11
	Destillat	6,95	83,2
15	Remanens	0,53	72,3
20	Remanens	0,45	69,21
21	Remanens	0,15	60,48

Efterfølgende er den opskalede forsøgsopstilling benyttet til at destillere ethanolstrøm 2 fra vasketrin 3. Resultaterne ses i TABEL 19.

TABEL 19. Resultater for destillation af ethanolstrøm 2, vask 3.

	Toluen [%]	Ethanol [%]	Komponent C [%]
Destillat fra vask 3	9,46	83,9	≤0,5

Konklusion

Som vist i TABEL 17 og TABEL 18 indeholder destillatet mellem 6,95 % og 11,7 % toluen. Dette er i overensstemmelse med resultatet for konventionel destillation fra de indledende forsøg, hvor destillatet indeholdt 10,5 % toluen, som vist i TABEL 16.

Resultaterne kan forklares med, at ethanol, vand og toluen danner en tertiær azeotrop. I TABEL 20 ses den teoretiske sammensætning af destillat af den tertiære azeotrop for toluen, ethanol og vand.

TABEL 20. Teoretisk separation af tertiær azeotrop mellem toluen, ethanol og vand. [8]

Temperatur [°C]	Toluen [masse %]	Ethanol [masse %]	Vand [masse %]
73,85	47,49	42,75	9,77
76,86	31,92	68,08	0
78,15	0	95,62	4,38
84,23	80,09	0	19,91

Azeotropen med det laveste kogepunkt er en tertiær azeotrop med masseindhold af toluen på 47,49 %, ethanol på 42,75 % og vand på 9,77 %. Da ethanolstrøm 2, vask 1, 2 og 3 indeholder mindre end 47,49 % toluen, vil der ske en opkoncentrering af toluen i destillatet.

Destillationen foretaget med den opskalede forsøgsopstilling blev udført ved at destillere ethanol fra den modificerede stivelsesvask 1 og 2 og derefter spæde den op inden den er destilleret tør. Dette gør, at man ikke destillerer hele indholdet af ethanol fra den modificerede stivelses vask 2, men i stedet destillerer de azeotroper, der har det laveste kogepunkt. For at fjerne toluen kunne man havde separeret det indledende destillat fra og forsøgt at opsamle de efterfølgende destillater, der forhåbentlig havde et lavere toluenindhold, som ses af TABEL 20. Det samme gør sig gældende for destillation af ethanolstrøm 2, vask 3.

Destillationen af vask 3 indeholder 9,46 % toluen, som vist i TABEL 19. For at den genanvendte ethanol skal kunne benyttes i produktionen af modificeret stivelse, er det et krav, at indholdet af toluen maksimalt må være 0,5 %. Ydermere skal ethanolkoncentrationen være minimum 85 %.

I det genanvendte ethanol er en koncentration på 83,9 % opnået. Resultaterne viser, at oprensningsmetoden skal optimeres yderligere for at kunne imødekomme kravspecifikationerne for produktionen af modificeret stivelse. Særligt skal fokus for optimeringen være møntet på at sænke toluenindholdet. De teoretiske sammensætninger af tertiær azeotroper viser, at dette burde være muligt ved at kontrollere temperaturen og fjerne det første opsamlede destillat, indtil den rette temperatur er opnået. Der skal udføres flere forsøg for at afklare, om dette også er muligt i praksis med den opskalede forsøgsopstilling.

4.4 Stresstest af destillation

Destillationsprocesser bliver ofte udført ved at tilføje mere fødestrøm, i takt med at destillationen forløber, og destillatet opsamles. Det betyder samtidig, at tørstof kan blive opkoncentreret i remanensen, da denne oftest ikke fjernes fra destillationskolben, før mere fødestrøm tilføjes. Tørstofmålingerne for destillation af ethanolstrøm 2 på mindre skala ses i TABEL 15. Ved destillationen viser målingerne af tørstofindholdet, at dette opkoncentreres. I TABEL 15 ses det også, at en mindre mængde tørstof er overført til destillatet. På mindre skala var der ingen tegn på, at dette havde nogen konsekvens for destillationen. Men når tørstoffet opkoncentreres, bliver det vigtigt at undersøge, om dette sker til mængder, der hindrer eller skader destillation ved opskalering til fuldskala.

En opkoncentration af tørstof kan resultere i dannelse af en gel eller klistret masse, som vil kunne gøre det svært for ethanoldampene at forlade destillationskolben og dermed sænke destillationshastigheden. En geldannelse vil også kunne medføre, at destillationskolonnen skal rengøres, før destillationen kan fortsætte efter hensigten. Ydermere kan en opkoncentrering medføre overførsel af tørstof til destillatet.

4.4.1 Udførelse af stresstest

Formålet med stresstestene er at fremprovokere en situation, hvorved destillationen ikke kan forløbe som planlagt. Baseret på læringerne fra afsnit 3.3.2 vil vask 1 og 2 for ethanolstrøm 2 ikke blive genanvendt, men fortsat sendt til destruktion, hvorfor stresstestene bliver udført på vask 3 fra ethanolstrøm 2. Det vurderes, at vask 3 vil indeholde rester af toluen, komponent C, modificeret stivelse og evt. ureageret stivelse. For at simulere betydningen af opkoncentration af tørstof ved destillation undersøges først interaktionen mellem komponent C, modificeret stivelse, vand og vask 3. Dette gøres i bægerglas. Efterfølgende benyttes destillationsudstyret beskrevet i afsnit 4.1 til at udføre destillation. Komponent C har en relativt høj molekylærmasse og er derfor ikke et flygtigt stof. Det undersøges dog, om en opkoncentrering af komponent C i remanensen kan medføre, at komponenten kommer med over i destillatet eller hindrer destillationen. Det samme undersøges for modificeret stivelse. Der bliver udført fem stresstests.

Stresstest 1

Her blandes 2 g af komponent C med 2 mL vask 3. Dette giver en tyndtflydende blanding. Til blandingen tilsættes 0,1 g modificeret stivelse. Den tilsatte modificerede stivelse er opslæmmet i blandingen. Der tilsættes yderligere 1 g modificeret stivelse og 10 mL vask 3, hvor den modificerede stivelse forbliver opslæmmet i blandingen. Ved tilsætningen af 10 mL deioniseret vand klumper modificeret stivelse sammen til en porøs masse.

Stresstest 2

Her blandes 5,2 g modificeret stivelse med 50 mL demineraliseret vand, hvor der ved omrøring formes en gel. 4 g af den dannede gel overføres til et bægerglas med 10 mL vask 3. Her opløses gelen og den modificerede stivelse samles som en porøs masse i bunden af bægerglasset. Dette skyldes højst sandsynligt, at ethanol fra vask 3 fjerner vandindholdet i den modificerede stivelse. Den modificerede stivelse får en mere porøs konsistens, som ved tilsætning af mere vask 3 medfører, at den modificerede stivelse sætter sig på indersiden af bægerglasset, i stedet for at den modificerede stivelse ender på pulverform.

Stresstest 3

Her tilsættes 25 g komponent C til en rundbundet kolbe med magnetomrører. Hertil tilføres 225 g vask 3. Der destilleres på blandingen med destillationsudstyret beskrevet i afsnit 4.1. Destillationen på blandingen sker langsomt, men den tilsatte vask 3 bliver destilleret fra.

Stresstest 4

Her blandes 5 g af komponent C og 2,5 g modificeret stivelse i et bægerglas. Dette giver en klistret konsistent. Noget af blandingen komponent C/modificeret stivelse overføres til et nyt bægerglas, og vask 3 tilsættes til blandingen. Dette resulterer i en udvaskning af komponent C, og den modificerede stivelse bundfælder som pulver. Hvis man i stedet tilsætter vand til blandingen komponent C/modificeret stivelse, svulmer den modificerede stivelse op og danner en mere porøs konsistens.

Stresstest 5

Her fremstilles en gel bestående af 10 % modificeret stivelse, 40 % demineraliseret vand og 50 % vask 3. Testen bliver udført på et volumen af 300 mL. Modificeret stivelse og vand blandes indledningsvis sammen for at danne gelen, og derefter tilsættes vask 3. Blandingens overføres til destillationsudstyret beskrevet i afsnit 4.1 under magnetomrøring og opvarmning fra en varmekappe. Destillationen foregår således, at varmekappen først indstilles til en temperatur på 85 °C. Ved denne temperatur sker der ingen destillation. Temperaturen hæves til 105 °C, hvor omrøring af blandingen ikke længere er muligt. Temperaturen hæves til 120 °C, hvor blandingen begynder at koge og destillationen dermed er påbegyndt. Temperaturen hæves til 150 °C, og destillationen er fuldendt. Baseret på vægten af destillat, med antagelsen om at destillatet indeholder 96 % ethanol, er omkring 80 % af vask 3-mængden blevet destilleret.

4.4.2 Resultater fra stresstest

Formålet med stresstest 1, 2 og 4 er visuelt at detektere eventuelle problemer ved destillationen under de fremstillede forhold. Ved stresstest 1, 2 og 4 er der ingen tegn på, at en evt. geldannelse vil opstå og ej heller skabe problemer for destillationen. Destillatet fremstillet i stresstest 3 og 5 er blevet analyseret for indholdet af toluen, ethanol og komponent C. Resultaterne ses i TABEL 21.

TABEL 21. Resultater for destillat fra stresstest 3 og stresstest 5.

	Toluen [%]	Ethanol [%]	Komponent C [%]
Stresstest 3	3,74	93,9	≤0,5
Stresstest 5	3,44	81,3	≤0,5

Konklusion

I stresstest 3 blev der destilleret på en 10 % komponent C-opløsning for at teste om en forøget koncentration af komponent C ville medføre problemer i destillationen. Bedømt ud fra mængden af den tykflydende remanens, der var tilbage i destillationskolben, er vurderingen, at komponent C ikke vil blive destilleret med over i betydelig mængde. Resultaterne i TABEL 21 bekræfter, at komponent C ikke bliver destilleret med over, da komponent C-koncentrationen blev målt til ≤0,5 %. Ud fra resultaterne konkluderes det, at komponent C ikke skaber problemer for destillationen. Det kan dog ikke afgøres, om komponent C kommer med over i destillatet i mindre mængder, da detektionsgrænsen på analysemetoden er ≤0,5 %.

I stresstest 5 blev der destilleret fra modificeret stivelse, vand og ethanol fra vask 3. Her blev mængden af komponent C også målt til at være ≤0,5% som set i TABEL 21. Tilstedeværelsen af modificeret stivelse og vand hindrer ikke destillationen ved at lave en gel, som kan observeres

på ethanolindholdet i destillatet. Indholdet af ethanol fra destillationen med modificeret stivelse og vand er på 81,3 %. Til sammenligning er ethanolindholdet i destillatet fra komponent C-stresstesten 93,9%. Det formodes, at forskellen i ethanolindhold er grundet en erstatning af vand. Dog er vandindholdet ikke blevet målt i analysen, og det er derfor kun en formodning.

5. Produktion af modificeret stivelse med genanvendt ethanol

I dette kapitel beskrives tilgangen til produktionen af modificeret stivelse med genanvendt ethanol fra den opskalerede teknologi. I produktionen er der benyttet 40 % genanvendt ethanol. Den producerede modificerede stivelse vil blive testet baseret på PKC's kvalitetskontrol.

5.1 Produktion i laboratorieskala af modificeret stivelse

For at undersøge om det genindvundne ethanol kan benyttes i PKC's produktion af modificeret stivelse, testes dette på laboratorieskala. Til forsøget benyttes det destillerede ethanol fra ethanolstrøm 2, vasketrin 3, som er beskrevet i TABEL 19.

Da PKC står overfor ændringer i sammensætningen af vaskesekvens, benyttes den nye vaskesekvens til at oprense den modificerede stivelse i dette forsøg.

Baseret på læringerne fra de indledende forsøg i afsnit 3.3.2 er det ikke alle vasketrin fra ethanolstrøm 2, som vurderes egnet til oprensningen med destillation. Sammenkoblingen mellem den nye vaskesekvens og læringerne fra de indledende forsøg betyder, at PKC vurderer, at det destillerede ethanol fra vasketrin 3 kan benyttes til at erstatte 40 % af den jomfruelige ethanol benyttet i den nye vaskesekvens.

Til fremstillingen af modificeret stivelse med genindvundet ethanol benyttes PKC's processtandard for at sikre ensartethed mellem forsøg og produktion.

Udbyttet af oprenset modificeret stivelse var 74,4 g i forsøget. Det oprensede modificerede stivelse er blevet analyseret efter PKC's kvalitetskontrolparametre. Her er ID, rest efter forbrænding, tørstofstab ved tørring, kontaktvinkel og andre parametre blevet analyseret. Ydermere er fosfor-, boron-, toluen- og ethanolindholdet blevet analyseret. Resultatet af kvalitetskontrolparametrene er blevet sammenholdt med kvalitetskravene til produktionen af modificeret stivelse for at evaluere, om det destillerede ethanol fra vasketrin 3 er egnet til brug i vaskeprocessen.

5.2 Resultater for produktion i laboratorieskala af modificeret stivelse

I dette afsnit er resultater fra produktionen i laboratorieskala af modificeret stivelse med brug af 40 % genanvendt ethanol vist. Der er foretaget analyser baseret på PKC's kvalitetskontrol og partikelstørrelsesfordelingen i den producerede modificerede stivelse.

5.2.1 Kvalitetskontrol

I TABEL 22 ses resultaterne for kvalitetskontrolparametrene analyseret for den producerede modificeret stivelse med destilleret ethanol fra ethanolstrøm 2, vasketrin 3 samt indholdet af andre komponenter. I tabellen ses de analyserede parametre, kvalitetskravet for de pågældende parametre og resultatet af analysen af den producerede modificerede stivelse med genindvundet ethanol.

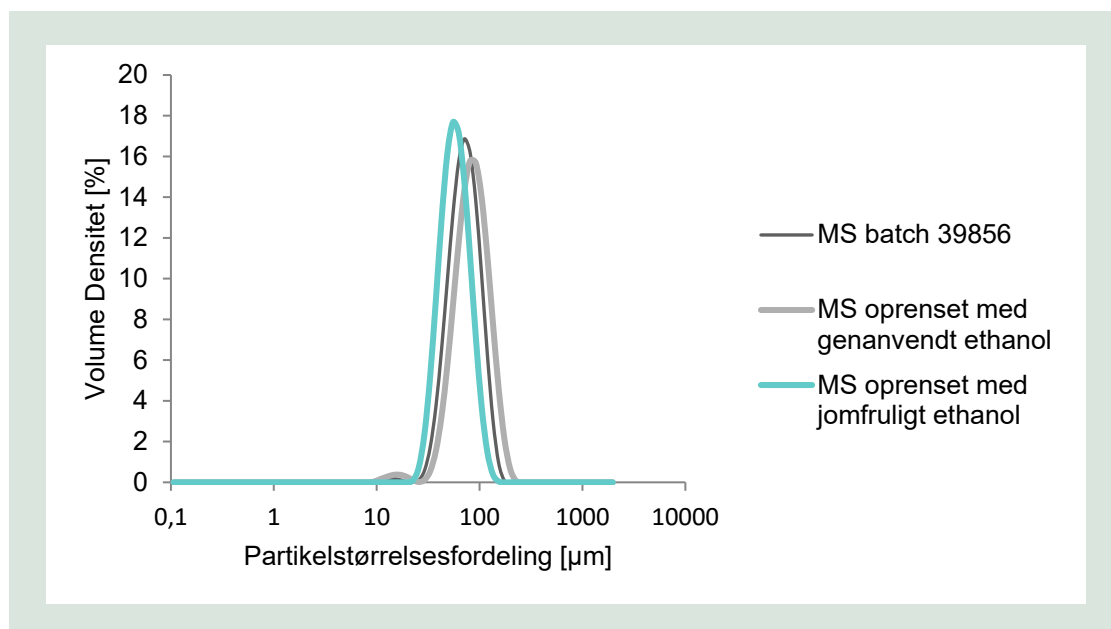
TABEL 22. Resultater for de analyserede kvalitetskontrolparametre for produktion af modificeret stivelse med destilleret ethanol, vasketrin 3.

Parameter	Kvalitetskrav	Resultat
ID ved FTIR	Bestået test	Bestået
Rest efter forbrænding	<0,85 %	0,29 %
Tørstofstab ved tørring	<12,00 %	4,02 %
Kontaktvinkel	<90 °	Ikke bestået
Fosforindhold	<0,20 %	0,04 %
Boronindhold	< 50 ppm	2 ppm
Toluenindhold	<90 ppm	11.000 ppm
Ethanolindhold	<7,50 %	3,80 %

Som vist i TABEL 22 er de fleste af kvalitetskravene for modificeret stivelse blevet mødt ved brugen af 40 % genanvendt ethanol. Dog imødekommer kontaktvinklen med blod og toluenindholdet ikke kvalitetskravene. I TABEL 19 ses det, at indholdet af toluen var højere end hvad kravspecifikationerne i TABEL 1 tillod i den genanvendte ethanol. Det ses også i resultatet her, hvor indholdet af toluen ligger væsentligt over den acceptable grænse. Det viser også, at destillationsmetoden skal optimeres yderligere for at sænke toluenindholdet, således at ethanol fra ethanolstrøm 2 kan benyttes til at producere modificeret stivelse.

5.2.2 Partikelstørrelsesfordeling

Ydermere er partikelstørrelsesfordelingen i tre prøver af modificeret stivelse blevet analyseret. De tre prøver er: modificeret stivelse oprenset med 40 % genindvundet ethanol, modificeret stivelse oprenset med 100 % jomfruelig ethanol og modificeret stivelse Batch 39856 benyttet som referenceprøve. De analyserede parametre er det specifikke overfaldeareal, partikelstørrelsesfordelingen D [3,2] og D [4,3] og volumenbaseret diameter ved kumulativ volumen (Dv(10), Dv(50), DV(90)). Resultatet er vist i FIGUR 4.



FIGUR 4. Partikelstørrelsesfordeling i tre prøver af modificeret stivelse (MS).

Ved at sammenligne partikelstørrelsesfordelingen i de tre prøver af modificeret stivelse ses det, at modificeret stivelse oprenset med 40 % genanvendt ethanol producerer større partikler sammenlignet med de to øvrige prøver. De større partikler kunne potentielt påvirke egenskaberne

af modificeret stivelse ved brug, og derfor skal dette undersøges yderligere inden implementering af genanvendt ethanol i vaskeprocessen.

5.2.3 Konklusion på produktion i laboratorieskala af modificeret stivelse

Brugen af genanvendt ethanol til oprensning af modificeret stivelse giver lovende resultater for de fleste af kvalitetsparametrene i PKC's kvalitetskontrol. Dog skal der arbejdes yderligere med oprensningsmetoden for at sænke indholdet af toluen. Det forhøjede toluenindhold i det genanvendte ethanol medfører en koncentration af toluen på 11.000 ppm, hvilket er væsentligt over den acceptable grænseværdi på <90 ppm. Dog tyder resultaterne på, at hvis det lykkes at mindske toluenindholdet, så vil brugen af genanvendt ethanol have den ønskede virkning og karakteregenskaber for modificeret stivelse.

Når modificeret stivelse oprenses med 40 % genanvendt ethanol produceres større partikler end referenceprøven med modificeret stivelse oprenset med 100 % jomfruelig ethanol. Dette indikerer, at egenskaberne for modificeret stivelse med den forøgede partikelstørrelse skal undersøges for at sikre, at disse ikke påvirkes af den forøgede partikelstørrelse.

På baggrund af disse resultater anbefales det, at der yderligere optimeres på oprensningsmetoden for at mindske toluenindholdet og samtidig bibeholde et acceptabelt ethanolindhold. Ydermere skal der udføres flere sammenlignende forsøg mellem brugen af genanvendt og jomfruelig ethanol i vaskeprocessen for bedre at kunne forstå genanvendt ethanols påvirkning af modificeret stivelse.

6. Økonomi og miljø

I dette kapitel beskrives de økonomiske og miljømæssige konsekvenser af implementeringen af den udvalgte teknologi hos PKC. Først beskrives de økonomiske beregninger, og om implementeringen er økonomisk rentabel for PKC. Derefter beskrives de miljømæssige beregninger og resultaterne heraf.

6.1 Forudsætning for økonomisk vurdering

De økonomiske beregninger er foretaget på baggrund af PKC's produktion af modificeret stivelse fra 2022. I 2022 producerede PKC 1.150 kg modificeret stivelse, hvortil der blev benyttet 266.000 kg ethanol. For 2022-produktionen er de udgifter, der er forbundet med indkøb af jomfruelig ethanol samt bortskaffelse inkluderet. I 2022 var gennemsnitsprisen for ethanol 14 til 17 kr. per kg.

For at vurdere om genindvinding af ethanol er økonomisk rentabel for PKC, er to der opstillet scenarier. De to scenarier er beskrevet nedenfor. Om det er økonomisk rentabelt for PKC baseres på en samlet besparelse per År, som er beregnet på baggrund af både 14 og 17 kr. per kg ethanol.

6.1.1 Scenarie 1

I det første scenarie beregnes de potentielle besparelser ved brugen af 40 % genanvendt ethanol i vaskeprocessen for modificeret stivelse. I scenariet er investeringsomkostningerne samt driftsomkostningerne for et destillationsanlæg inkluderet.

Investeringsomkostningerne for et destillationsanlæg i fuldskala, som passer til PKC's produktion, estimeres til 6 mio. Kr. Til investeringsomkostningerne skal lægges en udgift på 1 mio. Kr. til en dampkedel. Driftsomkostningerne for anlægget estimeres til 49.000 kr. per år til vedligeholdelse og forsikringer. Til driftsomkostningerne skal lægges omkostningerne for opvarmning af damp med naturgas. Til beregningen benyttes en pris på 0,28 kr. pr. kg destilleret ethanol til opvarmningen.

6.1.2 Scenarie 2

I det andet scenarie beregnes de potentielle besparelser ved brugen af 100 % genanvendt ethanol i vaskeprocessen for modificeret stivelse. I scenariet er inkluderet de samme poster som beskrevet i scenarie 1.

6.1.3 Resultater

I TABEL 23 ses de udgifter, der er forbundet med indkøb og bortskaffelse af jomfruelig ethanol, som det ser ud i 2022 hos PKC.

TABEL 23. Udgifter til ethanolforbrug forbundet med produktionen af modificeret stivelse.

Produktion af modificeret stivelse - 2022	Ethanolforbrug [kg]	Samlet udgift (14 kr. pr. kg ethanol) [kr.]	Samlet udgift (17 kr. pr. kg ethanol) [kr.]
100 % Jomfruelig ethanol	266.000	4.123.000	4.921.000
Pris pr. L ethanol		12,2	14,6

Indkøb og forbrug af 266.000 kg ethanol er estimeret til 14-17 kr./kg, hvilket vil resultere i en samlet udgift på 3.724.000-4.522.000 kr. Bortskaffelsen af 266.000 kg ethanolaffald vil have en takst på 1,5 kr./kg, hvilket resulterer i en udgift på 399.000 kr. Samlet set vil udgifterne vedrørende ethanol være 4.123.000-4.921.000 kr. Disse udgifter er benyttet til at beregne en samlet besparelse for de to scenarier.

I TABEL 24 ses udgifterne forbundet med scenarie 1.

TABEL 24. Udgifter for ethanolforbrug forbundet med produktionen af modificeret stivelse, som følger scenarie 1. Den samlede besparelse er beregnet ved brug af udgifterne i TABEL 23.

Scenarie 1	Ethanolforbrug [kg]	Samlet udgift (14 kr. pr. kg ethanol) [kr.]	Samlet udgift (17 kr. pr. kg ethanol) [kr.]
60 % Jomfruelig ethanol	160.000	2.248.000	2.960.000
40 % genanvendt ethanol	106.000	520.000	520.000
Samlede besparelse pr. år		1.123.000	1.441.000
Pris pr. L ethanol		8,2	10,3

Forsøg i laboratorieskala viste, at ved anvendelse af 40 % genanvendt ethanol i stedet for 100 % indkøbt ethanol vil kunne spares 106.000 kg ethanol. Dette vil resultere i en besparelse på 1.500.000-1.800.000 kr. i indkøbsomkostninger og 160.000 kr. i bortskaffelsesomkostninger. Omkostningerne for opvarmning af damp med naturgas estimeres til 0,28 kr. pr. kg destilleret ethanol. For 106.000 kg ethanol vil omkostningerne løbe op i 30.000 kr. Hertil lægges de faste driftsudgifter til vedligeholdelse og forsikringer på 490.000 kr. Samlet set vil udgifterne med 40 % genanvendt ethanol være 3.000.000-3.480.000 kr.

I TABEL 25 ses udgifterne forbundet med scenarie 2.

TABEL 25. Udgifter for ethanolforbrug forbundet med produktionen af modificeret stivelse, som følger scenarie 2. Den samlede besparelse er beregnet ved brug af udgifterne i TABEL 23.

Scenarie 2	Ethanolforbrug [kg]	Samlet udgift (14 kr. pr. kg ethanol) [kr.]	Samlet udgift (17 kr. pr. kg ethanol) [kr.]
100 % genanvendt ethanol	266.000	565.000	565.000
Samlede besparelse pr. år		3.560.000	4.360.000

Scenarie 2	Ethanolforbrug [kg]	Samlet udgift	Samlet udgift
		(14 kr. pr. kg ethanol) [kr.]	(17 kr. pr. kg ethanol) [kr.]
Pris pr. L ethanol		1,7	1,7

Ved anvendelse af 100 % genanvendt ethanol i stedet for 100 % indkøbt ethanol vil der kunne spares 266.000 kg ethanol. Dette vil resultere i en samlet besparelse på 3.560.000-4.436.000 kr. i indkøbs- og bortskaffelsesomkostninger, hvis det antages, at intet af ethanolen bortskaffes. Omkostningerne til naturgas til destillation af 266.000 kg ethanol vil løbe op i 75.000 kr. i naturgas, hvortil lægges de faste driftsudgifter til vedligeholdelse og forsikringer på 490.000 kr. Samlet set vil udgifterne med 100 % genanvendt ethanol beløbe sig til 565.000 kr.

6.1.4 Rentabilitet

De årlige udgifter forbundet med ethanolforbruget til produktion af modificeret stivelse vil blive sænket med 27-29 % ved brug af 40 % genanvendt ethanol. Hvis man på sigt hos PKC vil kunne benytte 100 % genanvendt ethanol, vil de årlige udgifter blive reduceret med 86-89 %.

I TABEL 23, TABEL 24 og TABEL 25 er udgifterne for det årlige ethanolforbrug til produktion modificeret stivelse vist. I tabellerne ses også prisen pr. L ethanol. I TABEL 1 er en af kravspecifikationerne, at genanvendt ethanol som maksimum må koste 20 kr. pr. L. Ethanolforbruget til produktion af modificeret stivelse beløb sig i 2022 til mellem 12,3 kr. og 14,6 kr. pr. L ethanol. Implementeringen af 40 % genanvendt ethanol vil sænke denne pris til mellem 8,2 og 10,3 kr. pr. L ethanol, mens brugen af 100 % genanvendt ethanol vil sænke prisen yderligere til 1,7 kr. pr. L ethanol. Baseret på ethanolprisen pr. L konkluderes det, at ethanolgenindvinding vil være økonomisk rentabel for PKC.

De økonomiske beregninger er baseret på estimater og skal derfor tages med forbehold. I kapitel 5 blev det vist, at den genanvendte ethanol ikke kunne imødekomme alle kvalitetskravene, og at oprensningsprocessen derfor kræver yderligere optimering. Resultaterne i kapitel 5 viste, at de fleste af den modificerede stivelses egenskaber blev bibeholdt, og der er derfor ikke belæg for at antage, at 40 % genanvendt ethanol ikke skulle kunne benyttes, efter at oprensningsprocessen er blevet optimeret. I de økonomiske beregninger er der ikke taget højde for, om optimeringen kommer til at medføre yderligere investerings- og driftsmæssige omkostninger.

6.2 Miljøvurdering for produktion af modificeret stivelse

I dette afsnit beskrives den udførte LCA-screening for produktionen af modificeret stivelse, hvor to scenarier for affaldshåndtering af ethanolstrøm 2 undersøges. De undersøgte affaldshåndteringer er ethanoldestruktion ved forbrænding med energigenindvinding og 40 % ethanolgenindvinding ved destillation.

6.2.1 Anvendelse af analysen

Miljøvurderingen er udført som en livscyklusvurderingsscreening (LCA-screening) og har til formål at undersøge potentielle besparelser i udledning af CO₂-ækvivalenter (kg CO₂ eq.) hos PKC ved implementering af et destillationsanlæg til oprensning af ethanol i stedet for at sende ethanolen til destruktion. Screeningen er baseret på faktuelle data fra PKC's produktionsenheder i Køge og Hårlev samt estimerede værdier for destillationen af ethanol baseret på termodynamiske beregninger.

LCA-screeningen er udarbejdet i overensstemmelse med de overordnede principper i ISO-standard 14040 og 14044, men afviger i forhold til kritisk review. Det betyder, at resultaterne fra denne vurdering ikke kan bruges til postulater om den samlede miljøpræstation for det undersøgte produkt, modificeret stivelse, eller til sammenlignende påstande. Resultatet kan i stedet

bruges til at indikere potentielle miljøbelastningsområder i forbindelse med produktionsprocesserne og anvendte materialer. Hensigten med miljøvurderingen er at undersøge, om der eventuelt vil kunne opnås miljømæssige besparelser ved 40 % ethanolgenindvinding.

6.2.2 Formålet

Formålet med miljøvurderingen er at belyse de miljømæssige effekter ved implementering af et destillationsanlæg hos PKC i virksomhedens produktion af modificeret stivelse for at oprense ethanolstrøm 2. LCA-screeningen opstiller to scenarier, som dækker produktionen af modificeret stivelse, hvor reststrømmene sendes til henholdsvis forbrænding og genindvinding. De tilsendte modtagere af resultaterne fra LCA-screening er primært Miljøstyrelsen, PKC og farmaindustrien. Resultaterne i denne LCA-screening afrapporteres som emissioner af CO₂-ækvivalenter (kg CO₂ eq.) og kan anvendes til at estimere, om genindvinding af 40 % ethanol fra produktionsreststrømme vil kunne medføre en miljømæssig besparelse.

6.2.3 Metodisk afgrænsning

Systemet, der er benyttet til analyse af ethanoldestruktion, involverer alle trin i produktionen af modificeret stivelse, herunder fremskaffelse og udvinding af materialer, transport til produktionslokationen, forbrug af energi, vand og andre sekundære materialer samt bortskaffelse af farligt affald. Emballage, forsendelse, brug og bortskaffelse af selve den modificerede stivelse er ikke medtaget i systemet. Der er derfor tale om en vugge-til-port-tilgang.

Systemet er afgrænset til fremstillingen af 1 kg modificeret stivelse, hvor der ved destillationen antages 1 omgang destillat, som recirkuleres til produktionen. Der beregnes kun 1 omgang destillation, selvom det forventes, at ethanolen kan genindvindes i flere omgange. Baggrunden er en forventning om, at 1 omgang destillation vil vise, at 40 % genindvinding er favorabel med hensyn til emissioner af kg CO₂ eq. Systemet er modelleret inklusive al transport. Emballage er ikke inkluderet i systemet.

6.2.4 Livscykluskortlægning (LCI)

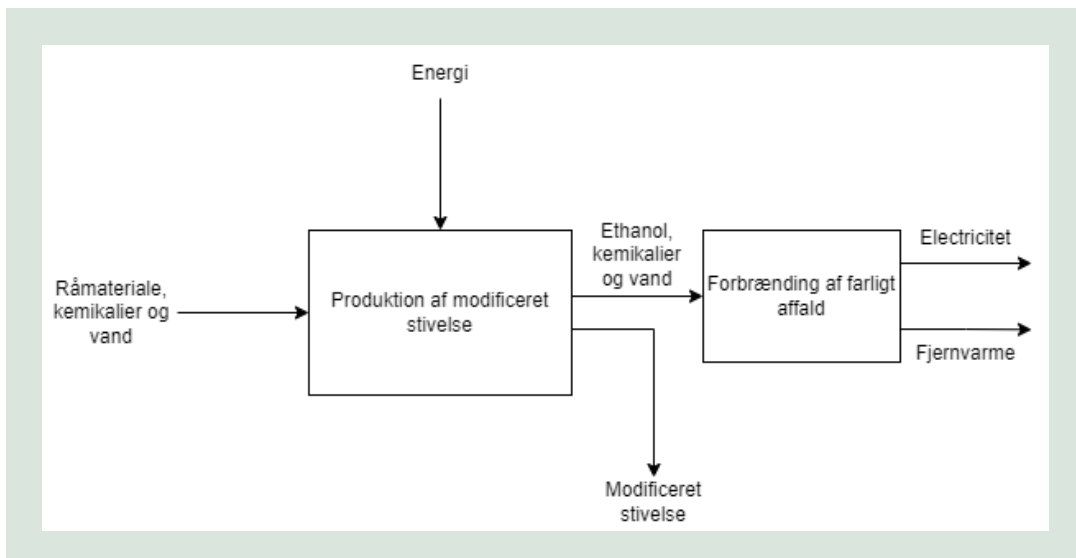
Scenariebeskrivelse

I dette afsnit beskrives de to scenarier undersøgt i LCA-screeningen. I afsnittet ses også de benyttede materialeinput for scenariet samt de benyttede baggrundsdata til analysen.

Ethanoldestruktion

Den nuværende produktion af modificeret stivelse hos PKC er modelleret baseret på udleverede data. Det benyttede system for modellering af ethanoldestruktion ved forbrænding ses i FIGUR 5.

Den modificerede stivelse produceres i batcher a 195 kg. De udleverede data er skaleret således, at inputmængderne tilsvarende produktionen af 1 kg modificeret stivelse. Energiforbruget til produktionen af modificeret stivelse samt oparbejdelse af stivelsesingrediensen er baseret på energiforbruget hos PKC i 2021. Produktionen af modificeret stivelse foregår i Køge, og det totale energiforbrug i Køge er allokert baseret på massen af de færdige produkter. Produktionen af modificeret stivelse tegner sig dermed for 2,52 % af Køgeafdelingens energiforbrug. Den samme tilgang er benyttet til estimering af energiforbruget ved oparbejdning af stivelsen. Oparbejdningen foregår hos PKC i Hårlev. Allokeringen viser, at stivelsen tegner sig for 0,58 % af Hårlevafdelingens samlede energiforbrug.



FIGUR 5. Procesdiagram over PKC's nuværende produktion af modificeret stivelse. Figuren viser det system, der er benyttet til miljøvurderingen af ethanoldestruktion ved forbrænding.

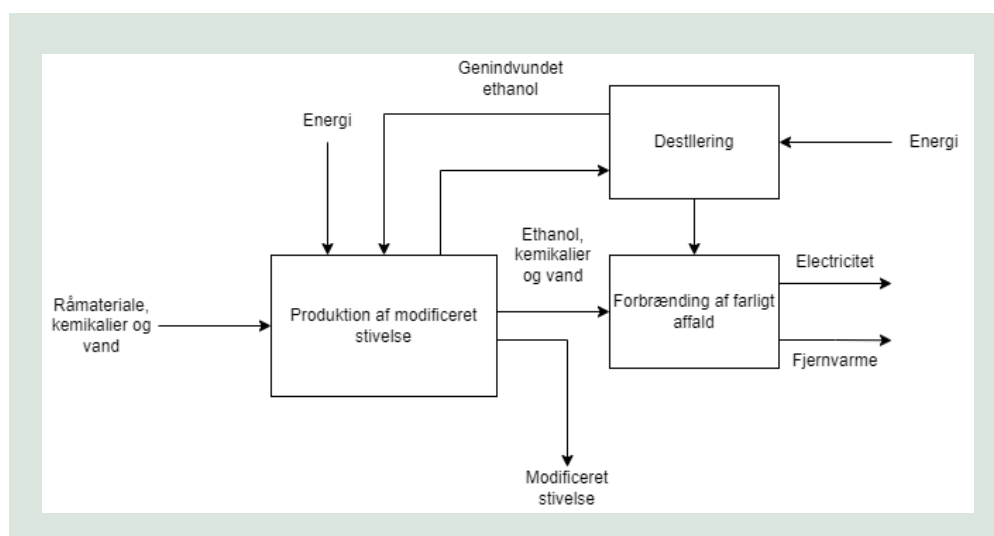
I TABEL 26 ses in- og outputmateriale til produktion af 1 kg modificeret stivelse.

TABEL 26. In- og outputmateriale til produktion af 1 kg modificeret stivelse.

Materialeinput	Enhed	Pr. kg modificeret stivelse	Distance [km]
Procesvand	Kg	51,3	
Stivelse	Kg	1,4	19
Kemikalie 1	Kg	0,3	20
Kemikalie 2	Kg	0,01	478
Toluen	Kg	4,1	940
Kemikalie 3	Kg	0,1	5.444
Kemikalie 4	Kg	0,2	444
Ethanol	Kg	78,3	1900
Kemikalie 5	Kg	0,3	444
Elektricitet	MJ	206,8	
Naturgas	MJ	2.196,8	
Materialeoutput	Enhed	Pr. kg modificeret stivelse	Distance [km]
Modificeret stivelse	Kg	1	
Farligt affald	Kg	134,9	270

Ethanolgenindvinding

Til at analysere 40 % ethanolgenindvinding i produktionen af modificeret stivelse er et destillationsanlæg implementeret i systemet, vist i FIGUR 6. Baseret på resultaterne i afsnit 3.3.2 sendes vask 1 og 2 til destruktion, således at ethanolreststrømmene fra vask 3-17 sendes til destillation. I destillationsprocessen antages det, at 40 % af ethanolen benyttet i produktion kan genindvindes med en koncentration på 96 %. Det antages, at de sidste 4 % er vand. I destillationsprocessen er der kun taget højde for det energiforbrug, der kræves for at opvarme en blanding af ethanol og vand fra 25 °C til 82 °C. Der er antaget et isoleret system, hvor der ikke tages højde for evt. energitab eller energigenindvinding via brug af f.eks. varmeveksler. I de økonomiske beregninger er driftsomkostningerne for destillation estimeret på prisen for naturgas. Den energi, det kræver at hæve temperaturen, antages derfor at være baseret på naturgas.



FIGUR 6. Procesdiagram over PKC's produktion af modificeret stivelse med implementeret destillationsanlæg. Figuren viser det system, der er benyttet til miljøvurderingen af ethanolgenindvinding.

I TABEL 27 ses in- og outputmateriale til produktionen af 1 kg modificeret stivelse med 40 % ethanolgenindvinding.

TABEL 27. In- og outputmateriale til produktionen af 1 kg modificeret stivelse med ethanolgenindvinding.

Materialeinput	Enhed	Pr. kg modificeret stivelse	Distance [km]
Procesvand	Kg	51,3	
Stivelse	Kg	1,4	19
Kemikalie 1	Kg	0,3	20
Kemikalie 2	Kg	0,02	478
Toluen	Kg	4,1	940
Kemikalie 3	Kg	0,1	5.444
Kemikalie 4	Kg	0,2	444
Ethanol	Kg	78,3	1.900
Kemikalie 5	Kg	0,3	444
Elektricitet	MJ	206,7	DK
Naturgas	MJ	2.209,7	Envida/ DCC Energi
Materialeoutput	Enhed	Pr. kg modificeret stivelse	Distance [km]
Modificeret stivelse	Kg	1	
Genindvundet ethanol 96 %	Kg	60,3	
Farligt affald	Kg	74,6	270

Baggrundsdata til modellering

I Bilag 4 ses baggrundsdata benyttet til modelleringen af de to scenarier. I de to scenarier ændres de overordnede flows i modellerne ikke, men mængderne pr. kg modificeret stivelse ændres.

Kilder til generisk data

Generiske baggrundsdata er baseret på Ecoinvent 3.8.

Datavalidering

Data til beregning af miljøpåvirkningen af ethanoldestruktion er baseret på primærdata fra produktionen af modificeret stivelse hos PKC. Der er anvendt matchende baggrundsdatasæt fra Ecoinvent. Størstedelen af data vurderes som værende af god kvalitet mht. geografiske, temporale og teknologiske aspekter. Der er anvendt proxy for kemikalie 3, da der ikke eksisterede data i den benyttede database.

Til beregningen af ethanolgenindvinding er der beregnet et teoretisk energiforbrug for destillationen, hvor der ikke er taget højde for evt. energitab eller energigenindvinding via varmevekslere. Baggrunden er, at destillationsprocessen endnu ikke er implementeret hos PKC. Ellers er der benyttet samme baggrundsdata som ved ethanoldestruktion, da forskellene i systemerne ligger i destillationsanlægget og i mængderne i in- og outputmateriale.

6.2.5 Vurdering af potentielle miljøpåvirkninger (LCIA)

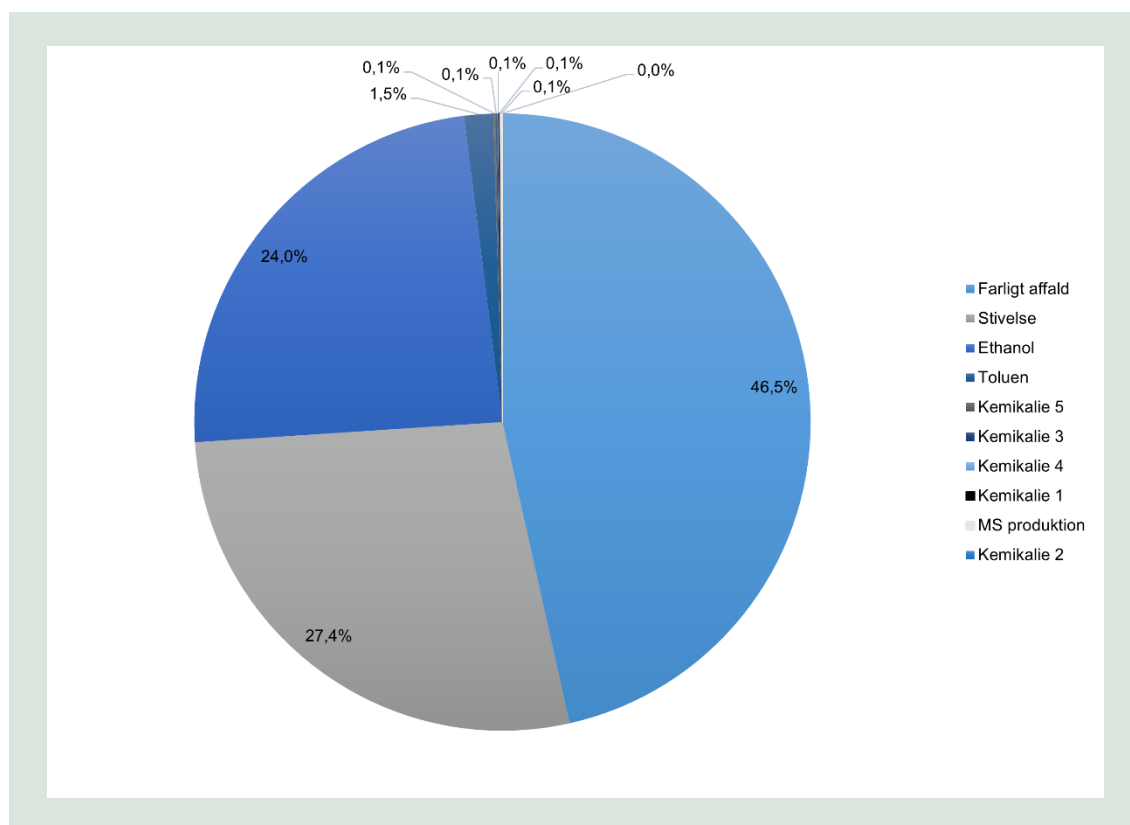
I dette afsnit præsenteres resultaterne for potentielle miljøpåvirkninger for de to scenarier (inklusive transport). Beregningerne er foretaget i LCA-værktøjet openLCA 1.11.0, hvor karakteriseringsmodellen EF 3.0 (Environmental Footprint 3.0) er benyttet med fokus på miljøpåvirkningskategorien: climate change - global warming potential (GWP100) [kg CO₂ eq.].

LCIA-resultater for ethanoldestruktion

TABEL 28. LCIA-resultater for produktionen af 1 kg modificeret stivelse med ethanoldestruktion.

Proces	Enhed	Total	Procent af total [%]
Farligt affald	Kg CO ₂ -Eq	223,8	46,5
Stivelse	Kg CO ₂ -Eq	132,1	27,4
Ethanol	Kg CO ₂ -Eq	115,7	24,0
Toluen	Kg CO ₂ -Eq	7,3	1,5
Kemikalie 5	Kg CO ₂ -Eq	0,5	0,1
Kemikalie 3	Kg CO ₂ -Eq	0,5	0,1
Kemikalie 4	Kg CO ₂ -Eq	0,4	0,1
Kemikalie 1	Kg CO ₂ -Eq	0,3	0,1
Produktion af modificeret stivelse	Kg CO ₂ -Eq	0,6	0,1
Kemikalie 2	Kg CO ₂ -Eq	<0,01	<0,001
Destillation	Kg CO ₂ -Eq	0	0
Total	Kg CO ₂ -Eq	481,1	100

En grafisk illustration af TABEL 28 kan ses i FIGUR 7.



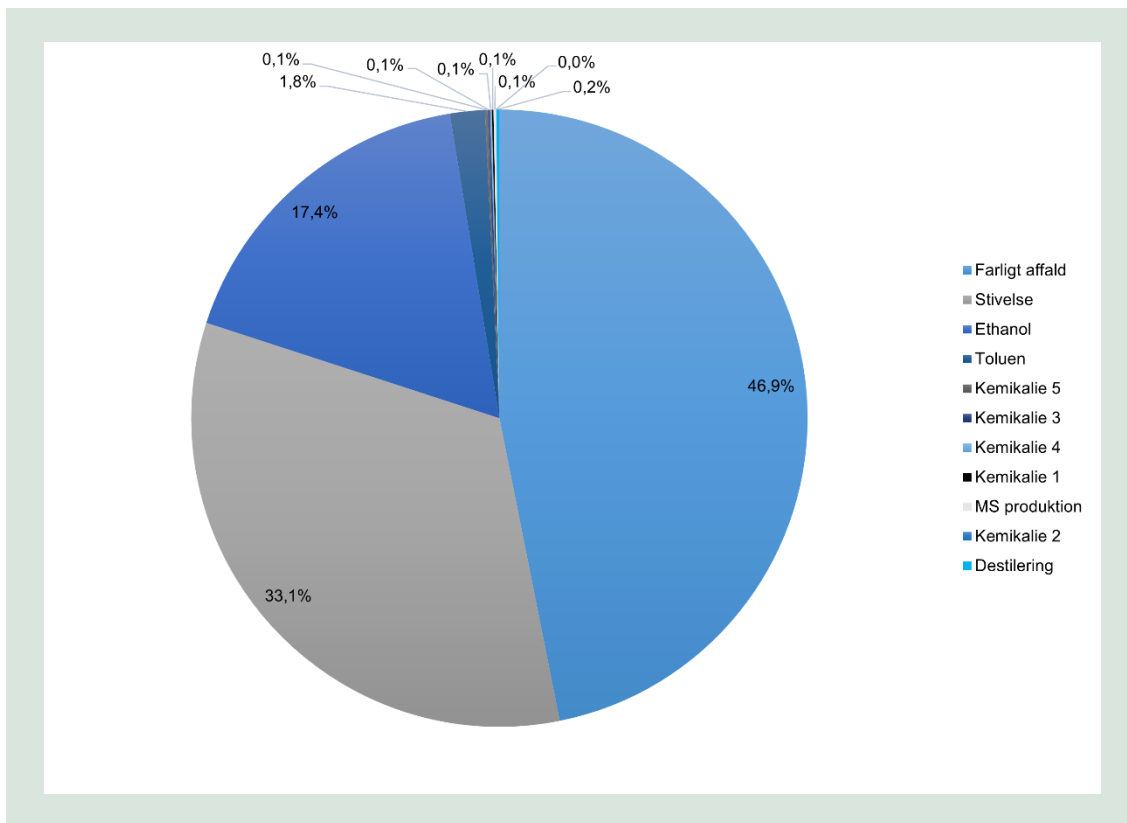
FIGUR 7. Emissioner i kg CO₂ eq. for produktion af 1 kg modificeret stivelse (MS) med ethanoldestillation.

LCIA-resultater for ethanolgenindvinding

TABEL 29. LCIA-resultater for produktion af 1 kg modificeret stivelse med 40 % ethanolgenindvinding.

Proces	Enhed	Total	Procent af total
Farligt affald	Kg CO ₂ -Eq	186,8	46,9
Stivelse	Kg CO ₂ -Eq	132,1	33,1
Ethanol	Kg CO ₂ -Eq	69,4	17,4
Toluen	Kg CO ₂ -Eq	7,3	1,8
Kemikalie 5	Kg CO ₂ -Eq	0,5	0,1
Kemikalie 3	Kg CO ₂ -Eq	0,5	0,1
Kemikalie 4	Kg CO ₂ -Eq	0,4	0,1
Kemikalie 1	Kg CO ₂ -Eq	0,3	0,1
Produktion af modificeret stivelse	Kg CO ₂ -Eq	0,6	0,1
Kemikalie 2	Kg CO ₂ -Eq	<0,01	<0,001
Destillation	Kg CO ₂ -Eq	0,7	0,2
Total	Kg CO ₂ -Eq	398,5	100

En grafisk illustration af TABEL 29 kan ses i FIGUR 8.



FIGUR 8. Emissioner i kg CO₂ eq. for produktion af 1 kg modificeret stivelse (MS) med ethanolgenindvinding.

6.2.6 Følsomhedsanalyse

I følsomhedsanalysen er det undersøgt, hvor følsomt resultatet i scenariet for ethanoldestruktion er overfor brugen af kemikalie 3-proxyen, samt hvor følsomt resultatet i scenariet for ethanolgenindvinding er overfor energibrugen i destillationen. Følsomhedsanalysen er udført ved at gange originalinputtet i modellen med 1.000 for at se, hvor meget resultatet ændrer sig.

Når proxyen for kemikalie 3 øges med en faktor 1.000, øges den totale emission i kg CO₂ eq. for produktionen af 1 kg modificeret stivelse med en faktor 1,7. Det vurderes, at kemikallet anvendes i tilpas små mængder, så valget af proxyen ikke er af stor betydning for de overordnede resultater.

Ved at øge energiforbruget i destillationsprocessen med en faktor 1.000 øges den totale emission i kg CO₂ eq. for produktionen af 1 kg modificeret stivelse med en faktor 2,7. Det vurderes på baggrund af dette, at resultaterne er ikke følsomme overfor det energiforbrug, der er forbundet med destillationen.

6.2.7 Konklusioner

Resultaterne fra denne LCA-screening indikerer, med forbehold for usikkerhederne i estimerede data, at der kan opnås en besparelse i kg CO₂ eq. ved at implementere destillationsanlægget hos PKC. Samlet set viser resultaterne i denne screening, at produktionen af 1 kg modificeret stivelse med ethanoldestruktion udleder 481,1 kg CO₂ eq. sammenlignet med produktionen af 1 kg modificeret stivelse med 40 % ethanolgenindvinding, som udleder 398,5 kg CO₂ eq. Det er altså potentielt muligt at opnå en reduktion på omkring 21 %, hvor bidraget for produktionen af jomfruelig ethanol sænkes med 40 % for den totale udledning.

Den største bidrager til den samlede udledning for ethanoldestruktion er behandling af farligt affald ved forbrænding. Derefter følger oparbejdning af stivelse og produktion af jomfruelig

ethanol, som bidrager mest til den totale emission. I scenariet med ethanolgenindvinding reduceres mængden af farligt affald til forbrænding med 24 %, hvilket medfører en reduktion af CO₂ eq.-emissionerne, men behandling af farligt affald er stadig den største bidrager til CO₂-aftrykket. Oparbejdning af stivelsen udgør kun 0,58 % af PKC's Hårlevafdelings samlede energiforbrug, men det er stadig en meget energitung proces, hvilket forklarer det store bidrag til den totale emission for både ethanoldestruktion og ethanolgenindvinding.

På baggrund af de data, som har været til rådighed for udredningerne, kan det konkluderes, at 40 % ethanolgenindvinding bidrager til en reduktion i emissionerne af CO₂ eq., når dette destilleres og erstatter produktionen af jomfruelig ethanol. Dette skal dog tages med visse forbehold, for selvom resultatet ikke er følsomt over for energiforbruget, kan det tænkes, at destillationen kræver anden vedligeholdelse, som der ikke er taget højde for i beregningerne, hvilket ville kunne modvirke nogle af besparelserne i emissioner. Ydermere bygger beregningerne på, at 40 % af ethanolstrøm 2 kan genanvendes. Som set i afsnit 4.3.1 og 5.2.3 har det ikke været muligt at destillere ethanol til et niveau, som kan imødekomme kravspecifikationerne. Det er derfor muligt, at der ikke vil kunne genanvendes 40 % ethanol. Hvis dette viser sig at være tilfældet, vil dette også modvirke besparelserne i emissionerne.

7. Konklusion og anbefalinger

I dette kapitel vil projektets konklusioner blive opsummeret, ligesom der gives anbefalinger baseret på resultaterne opnået i projektet.

7.1 Konklusion og anbefalinger

I projektet er der afsøgt forskellige oprensningsteknologier og forbehandlingsteknologier, som kunne benyttes til at oprense og derved genanvende ethanolreststrømme i farmaindustrien. I afsøgningen er otte oprensningsteknologier og otte forbehandlingsteknologier blevet beskrevet. Af de i alt 16 teknologier er seks udvalgt til en mere dybtgående undersøgelse: tre oprensningsteknologier og tre forbehandlingsteknologier. Disse seks teknologier er udvalgt på baggrund af en vurdering af, hvilke der vil kunne imødekomme produktions- og kvalitetskravene fastsat af PKC. Baseret på den mere dybdegående undersøgelse er oprensningsteknologierne konventionel destillation og vakuumdestillation samt forbehandlingsteknologierne centrifugering og membranfiltrering blevet udvalgt til test på laboratorieskala, da det vurderes, at disse passer bedst til PKC's produktion.

Til laboratorieforsøgene er de udvalgte teknologiers egnethed testet med ethanolreststrømme fra PKC's produktion. Her er der benyttet ethanolreststrømme fra produktionen af DEAE Dextran, betegnet ethanolstrøm 1, og ethanolreststrømme fra produktionen af modificeret stivelse, betegnet ethanolstrøm 2. Reststrømmene fra de to produktioner er grundet kvalitetskontrol holdt adskilt. Resultaterne fra laboratorieforsøgene viser, at forbehandling med centrifugering eller filtrering for tørstof ikke er nødvendig, da tørstofindholdet ikke skaber noget problem i de udvalgte oprensningsteknologier. For ethanolstrøm 1 resulterede konventionel destillation i et højere ethanolindhold end vakuumdestillation. Ethanolstrøm 2 er kun testet med konventionel destillation, som blev udvalgt på grund af lavere investerings- og driftsomkostninger.

I de indledede forsøg benyttes ethanol fra vask 1 og 2 ud af i alt 15 vasketrin. Her opnås et toluenindhold på 10,5 %, hvor den maksimalt acceptable grænse er 0,5 %. Af den grund anses vasketrin 1 og 2 ikke for egnet til genanvendelse og skal fortsat sendes til forbrænding, og af samme grund udføres destillation af vasketrin 3 til opskaleringen.

Konventionel destillation blev udvalgt til opskalering i laboratoriet. I opskaleringen er der udført forsøg med ethanolstrøm 2, da denne produktion er planlagt til at skulle opskaleres hos PKC. Grundet opprioritering af ethanolstrøm 2 er forsøg med opskaleret forsøgsopstilling på ethanolstrøm 1 ikke blevet udført.

Den opskalerede forsøgsopstilling er benyttet til stresstest. I alt er der udført fem stresstests, hvor det er undersøgt, om en geldannelse vil skabe problemer for destillationen, samt om en ophobning af komponent C og produktet modificeret stivelse ville skabe problemer eller forringe kvaliteten af destillatet. Stresstesten viser, at geldannelse ikke er noget problem. Analyse af destillatet fra stresstest 3 og 5 viser, at modificeret stivelse ikke overføres til destillatet. Mængden af komponent C er analyseret til $\leq 0,5$ % i både stresstest 3 og 5. Dette er under detektionsgrænsen for analysemetoden, og det kan derfor hverken be- eller afkræftes, at komponent C overføres i destillatet. En eventuel overførsel ville dog være i begrænsede mængder.

Til det opskalerede forsøg med ethanolstrøm 2 er der benyttet ethanol fra vask 3. Igen opnås et for højt toluenindhold på 9,46 %. Toluen, ethanol og vand danner en tertiær azeotrop, hvilket besværliggør destillationen.

Den genanvendte ethanol fra vask 3 med for højt toluenindhold blev benyttet til at producere modificeret stivelse på laboratorieskala. Her blev der benyttet 40 % genanvendt ethanol. Den producerede modificerede stivelse blev testet efter PKC's kvalitetsprotokol, hvor stivelsen bestod på syv ud af ni testparametre. Den producerede modificerede stivelse havde ikke en kontraktvinkel på $<90^\circ$, hvilket bevirker, at den ikke består testen. Ydermere havde stivelsen et forhøjet toluenindhold på 11.000 ppm, hvor den acceptable grænse er <90 ppm. Partikelstørrelsesfordelingen blev også testet for den producerede modificerede stivelse. Ved at bruge 40 % genanvendt ethanol produceres større krystaller.

Resultaterne fra de indledende forsøg, opskaleringen og produktionen af modificeret stivelse viser, at den benyttede destillationsmetode skal optimeres for at kunne imødekomme kravspecifikationerne opstillet for den genanvendte ethanol. Optimeringen skal særligt fokusere på at sænke toluenindholdet.

Økonomiske og miljømæssige beregninger er foretaget på baggrund af den antagelse, at man kan lykkes med at sænke toluenindholdet via optimering. Ved at PKC vil kunne benytte 40 % genanvendt ethanol i virksomhedens produktion af modificeret stivelse, vil en økonomisk besparelse på 27-29 % kunne opnås for omkostningerne til ethanol. Brugen af genanvendt ethanol vil sænke ethanolprisen til 8,2-10,3 kr. pr. L. Hvis man med optimeringen ville kunne mindske toluenindholdet, ville vask 1 og 2 muligvis også kunne benyttes til genanvendelse. Ved brugen af 100 % genanvendt ethanol vil PKC opnå en besparelse på 86-89 % på ethanolomkostningerne. Dette vil sænke ethanolprisen til 1,7 kr. pr. L. Baseret på dette konkluderes det, at ethanolgenindvindelse vil være en økonomisk rentabel proces.

Udover at være en økonomisk rentabel proces viser de miljømæssige beregninger en potentiel besparelse på 21 % CO₂ eq.-emissioner ved brugen af 40 % genanvendt ethanol til produktion af 1 kg modificeret stivelse. Disse tal skal tages med forbehold, idet det antages, at en optimering af oprensningsprocessen ikke kræver implementering af forbehandling eller ændringer i energiforbrug. Hvis det viser sig, at vask 3 ikke er egnet til genanvendelse, og at flere vasketrin også skal kasseres, vil dette påvirke de økonomiske og miljømæssige beregninger.

Yderligere optimering er krævet, for at oprensningsmetoden kan imødekomme alle kravspecifikationerne. Dette betyder også, at der skal udføres flere forsøg, før man kan konkludere, om destillation kan opfylde kravene. Hvis man ikke optimerer på destillationsmetoden, viser resultaterne, at vask 1, 2 og 3 fra ethanolstrøm 2 ikke er egnede til genanvendelse. Man vil derfor være nødt til at teste, om andre vasketrin vil være mere favorable. Det betyder også, at der stadig vil blive genereret ethanol til farligt affald. Der foreligger også den mulighed at sænke destillationseffektiviteten ved at bortskaffe noget af det først producerede destillat, indtil toluenindholdet er reduceret tilstrækkeligt, og den tertiære azeotrop er brudt.

I optimeringen af destillationen kan muligheden for at tilføje en forstærker til destillationen afdækkes. Forstærkeren øger opløseligheden af stoffer med lav flygtighed i opløsningsmidlet og giver selektiv opløselighed i tilfældet med flere opløsningsmidler. Forbehandlings- eller efterbehandlingsteknologier, som er beregnet til at fjerne toluen, kan også undersøges. Hvis toluen forsat er et problem, skal man kigge ind i at substituere toluen med et andet tilsætningsstof, som ikke danner en azeotrop med vand og ethanol og derved ikke vil blive destilleret med over. Dette ville muligvis også kunne forøge genanvendelsen af andre tilsætningsstoffer, hvis de kan adskilles.

8. Referencer

- [1] INGENIØREN, "CleanTechWatch", september 2019. <https://ctwatch.dk/nyheder/raastof/article11678696.ece> (set 24. januar 2023).
- [2] A. P. Harvey og J. G. M. Lee, "Intensification of Biofuel Production", i *Comprehensive Renewable Energy*, Elsevier, 2012, s. 205–215. doi: 10.1016/B978-0-08-087872-0.00516-3.
- [3] GMM Pfaudler Systems, "Wiped Film Evaporators". <https://www.gmmpfaudler.com/systems-processes/process-systems-packages/evaporation-distillation/wiped-film-evaporators> (set 24. januar 2023).
- [4] A. F. Ismail og T. Matsuura, "Pervaporation", i *Membrane Separation Processes*, Elsevier, 2022, s. 113–132. doi: 10.1016/B978-0-12-819626-7.00014-4.
- [5] S. Karimi, M. Tavakkoli Yarak, og R. R. Karri, "A comprehensive review of the adsorption mechanisms and factors influencing the adsorption process from the perspective of bioethanol dehydration", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, bd. 107, s. 535–553, jun. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.03.025.
- [6] S. K. Lim, K. Goh, T.-H. Bae, og R. Wang, "Polymer-based membranes for solvent-resistant nanofiltration: A review", *Chin J Chem Eng*, bd. 25, nr. 11, s. 1653–1675, nov. 2017, doi: 10.1016/j.cjche.2017.05.009.
- [7] P. Kaewkannetra, N. Chutinate, S. Moonamart, T. Kamsan, og T. Y. Chiu, "Experimental study and cost evaluation for ethanol separation from fermentation broth using pervaporation", *Desalination Water Treat*, bd. 41, nr. 1–3, s. 88–94, mar. 2012, doi: 10.1080/19443994.2012.664682.
- [8] L. Zhao, X. Lyu, W. Wang, J. Shan, og T. Qiu, "Comparison of heterogeneous azeotropic distillation and extractive distillation methods for ternary azeotrope ethanol/toluene/water separation", *Comput Chem Eng*, bd. 100, s. 27–37, maj 2017, doi: 10.1016/j.compchemeng.2017.02.007.

Bilag 1. Kortlægning af reststrømme

Bilag 1.1 Reststrømme fra produktion af DEAE Dextran (ethanolstrøm 1)

For ethanolstrøm 1 er der undersøgt volumen per år samt reststrømmens ethanolkoncentration, vandkoncentration, komponent A-indhold og tørstofindhold.

TABEL 30. Kortlægning af ethanolreststrømme fra produktionen af DEAE Dextran.

Vasketrin	Volumen [kg/år]	Ethanol [%]	Vand-indhold [%]	Komponent A [%]	Tørstof-indhold [%]	Komponent B [%]
Vask 1	7.500	60	30	9	5	-
Vask 2	5.800	60	30	9	2	-
Vask 3	5.400	60	30	9	1	-
Vask 4	5.400	60	30	9	0,5	-

– betyder, at koncentrationen ikke er blevet målt.

Bilag 1.2 Reststrømme fra produktionen af modificeret stivelse (ethanolstrøm 2)

For ethanolstrøm 2 er der undersøgt volumen per år samt reststrømmens ethanolkoncentration, vandkoncentration og tørstofindhold. Reststrømme med samme koncentrationer er summeret til én samlet reststrøm.

TABEL 31. Kortlægning af ethanolreststrømme fra produktionen af modificeret stivelse.

Reststrøm	Volumen [kg/år]	Ethanol [%]	Vand-indhold [%]	Toluen [%]	Tørstof indhold [%]	Komponent C [%]
1	1.500	-	-	-	0,9	-
2	1.500	-	-	-	1,6	-
3	1.500	>90	<10	-	0,7	-
4	1.500	>90	<10	-	0,2	-
5	12.300	80	20	-	-	-
6	7.500	>90	<10	-	-	-
7	250	>90	-	-	-	-
Total	26.050					

– betyder, at koncentrationen ikke er blevet målt.

Bilag 2. Risikoevaluering

Risikoevalueringsskema															
Risiko score (1-25) for hver teknologi-risiko kombination (Produkt af Sansynlighed 1-5 og Alvorlighed 2-5)															
Teknologi/Materiale	Renhed	Volumen	Hastighed af Teknologi	Tørstof	Tørstof, indgående	Komponent C	Komponent B	Toluen	Pris	Antal anlæg	Komponent A	Komponent C, indgående	Komponent B, indgående	Footprint	Info/Kommentarer
Forklaring til risiko	Renheden når ikke 99,5% ethanol	Teknologien kan ikke håndtere min. 3800 tons/år	Det tager mere end 5 dage at udføre teknologien (pr batch)	Teknologien bringer ikke indholdet af tørstof ned på 9 %	Teknologien kan ikke håndtere indgangsstrom med 1% tørstof	Teknologien bringer ikke indholdet af komponent C ned på 0 %	Teknologien bringer ikke indholdet af komponent B ned på 0 %	Teknologien bringer ikke indholdet af Toluen ned på 0,5 %	Prisen overstiger 10 kr/L	Kræver mere end et anlæg for at oprene strøme	Teknologien bringer ikke indholdet af komponent A ned på 0 %	Teknologien kan ikke håndtere indgangsstrom med 0,1% komponent C	Teknologien kan ikke håndtere indgangsstrom med 1% komponent B	Teknologien fylder mere end 25m ² 0m	
Alvorlighed	A 5	A 5	A 4	A 4	A 4	A 4	A 4	A 3	A 3	A 3	A 2	A 2	A 2	A 4	
Pervaporation	S 2	S 1	S 1	S 1	S 4	S 1	S 3	S 2	S 3	S 2	S 4	S 1	S 1	S 1	Det vides ikke hvor robust pervaporation er over for signifikante mængder tørstof.
(Vakuum) Destillation	S 1	S 1	S 1	S 2	S 2	S 3	S 3	S 4	S 2	S 4	S 4	S 1	S 1	S 1	
Extractive destillation	S 2	S 3	S 2	S 1	S 1	S 2	S 2	S 3	S 3	S 2	S 4	S 1	S 1	S 3	Det antages at mængden af komponent B og C reduceres ved ekstraheringen.
Centrifugering	S 3	S 1	S 1	S 2	S 1	S 4	S 5	S 5	S 1	S 5	S 5	S 1	S 1	S 1	
Ultrafiltrering	S 3	S 1	S 1	S 1	S 3	S 3	S 3	S 5	S 4	S 3	S 3	S 1	S 1	S 3	
Sedimentering	S 3	S 2	S 4	S 2	S 1	S 3	S 3	S 5	S 1	S 5	S 3	S 1	S 1	S 4	
	25	10	16	8		20	20	15		15	10			16	

FIGUR 9. Risikovurderingsskema. I TABEL 1 er anført de kravspecifikationer, som risiko er vurderet for. Alvorligheden er baseret på den anførte vigtighed. Grøn farve angiver, at der ingen risiko er. Gul farve angiver medium risiko, hvor tallene 5-10 angiver størrelsen af risikoen. Rød farve angiver høj risiko, hvor tallene 15-25 angiver størrelsen af risikoen.

Bilag 3. Modificeret stivelse produceret i laboratorieskala

TABEL 32. Partikelstørrelsesfordelingen i tre prøver af modificeret stivelse.

Prøve	Parameter	Resultat
Modificeret stivelse oprenset med genindvundet ethanol	Specific Surface Area	77.63 m ² /kg
	D [3,2]	73.6 µm
	D [4,3]	87,5 µm
	Dv (10)	50,5 µm
	Dv (50)	83,2 µm
	Dv (90)	132 µm
Modificeret stivelse oprenset med jomfruelig ethanol	Specific Surface Area	105,3 m ² /kg
	D [3,2]	54,3 µm
	D [4,3]	60,1 µm
	Dv (10)	37,3 µm
	Dv (50)	57,1 µm
	Dv (90)	87,0 µm
Modificeret stivelse Batch 39856 (standardprocedure)	Specific Surface Area	88,52 m ² /kg
	D [3,2]	64,6 µm
	D [4,3]	73,9 µm
	Dv (10)	44,4 µm
	Dv (50)	70,8 µm
	Dv (90)	109 µm

Bilag 4. Baggrundsdata til miljøberegninger

TABEL 33. Baggrundsdata for modellering af de to scenarier. De benyttede baggrundsdata stammer fra Ecoinvent 3.8. Processen er modificeret i modellen, da baggrundsdata ikke indeholdt substitution af energi. Der er derfor i modellen tilføjet substitution af 17,11 MJ/kg termisk energi og 1,27 MJ/kg elektricitet.

Materiale	Flow	Proces	Geografi
Procesvand	Water, deionised	Market for water, deionised	Europe without Switzerland
Stivelse	Potato starch	Market for potato starch	Global
Kemikalie 1	Kemikalie 1	Market for kemikalie 1	Global
Kemikalie 2	Kemikalie 2	Market for kemikalie 2	Global
Toluen	Toluene, liquid	Market for toluene, liquid	Europe
Kemikalie 3	Kemikalie 3 proxy	Kemikalie 3 proxy	Global
Kemikalie 4	Kemikalie 4	Market for Kemikalie 4	Global
Ethanol	Ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene	Ethylene hydration	Europe
Kemikalie 5	Kemikalie 5	Market for Kemikalie 5	Global
Elektricitet	Electricity, medium voltage	Market for electricity, medium voltage	Danmark
Naturgas	Heat, district or industrial, natural gas	Market for heat, district or industrial, natural gas	Europe without Switzerland
Farligt affald	Hazardous waste, for incineration	Treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration, with energy recovery *	Europe without Switzerland
Transport	Transport, freight, lorry, unspecified	Market for transport, freight, lorry, unspecified	Europe
	Transport, freight, sea, container ship	Market for transport, freight, sea, container ship	Global

Ethanolgenindvinding

Formålet med dette projekt er at undersøge, om og hvordan ethanolgen-indvinding kan muliggøres i farmaindustrien. I farmaindustrien er der strenge krav til kvaliteten til f.eks. den ethanol, som benyttes. Det betyder også, at man benytter fossilbaseret ethanol i stedet for bioethanol, da den fossilbaserede ethanol kan opnå højere koncentrationer og renhedsgrad. Til ethanolgenindvinding er der afsøgt og afprøvet forskellige forbehandlings- og oprensningsteknologier, som vurderes at kunne imødekomme de strenge kvalitetskrav, som farmaindustrien stiller. Projektet tager udgangspunkt i produktionen af DEAE Dextran og modificeret stivelse hos pK Chemicals A/S. I produktionen af begge produkter benyttes ethanol til at vaske produktet. Efter vaskeprocessen opsamles ethanolen som farligt affald og sendes til destruktionsanlæg.

Baseret på litteratursøgning og laboratorieforsøg er konventionel destillation udvalgt som oprensningsmetoden til ethanolgenindvinding, hvor forbehandling ikke er nødvendig. Oprensningsmetoden er blevet opskaleret til større laboratorieskala, og den genanvendte ethanol er benyttet til at producere modificeret stivelse. Oprensningsmetoden udviklet i dette projekt medfører et for højt toluenindhold, som overføres til produktet. Det betyder, at oprensningsmetoden skal videreudvikles, før ethanolgenindvinding er mulig. Hvis man lykkes med at kunne genindvinde 40 % ethanol, vil pK Chemicals kunne opnå en årlig besparelse på 33 % af de udgifter, der er forbundet med indkøb og bortskaffelse af fossilbaseret ethanol. Ydermere tyder de miljømæssige beregninger på, at en væsentlig besparelse i kg CO₂ ækvivalente emissioner ville kunne opnås ved brugen af 40 % ethanol.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk