



TEKNOLOGISK  
INSTITUT

---

# Energieffektiv separation ved hjælp af frysekoncentrering

Markedspotentiale

---

**Titel:**

Energieeffektiv separation ved hjælp af frysekoncentrering - markedspotentiale

**Udarbejdet af:**

Teknologisk Institut  
Teknologiparken  
Kongsvang Allé 29  
8000 Aarhus C  
Køle- og Varmepumpeteknik

August 2017

Forfatter: Jóhannes Kristófersson

## Indholdsfortegnelse

1. Introduktion .....	5
2. Teknologier til koncentration.....	6
2.1. Inddampning .....	6
2.2. Membraner .....	7
3. Frysekoncentration .....	9
3.1. Indirekte varmeveksling .....	11
3.1.1. Isfremstillingsenheden - isgeneratoren .....	12
3.1.1.1. Skrabe overflade varmeveksler (SSHE).....	14
3.1.1.2. Overrislingsvarmeveksler .....	15
3.1.1.3. Underkølet vand isfremstillingsenheder.....	17
3.1.1.4. Ejektor type isfremstillingsenhed .....	18
3.1.2. Isseparator .....	18
3.1.2.1. Mekaniske vaskekolonner.....	19
3.1.2.2. HybridICE .....	20
3.1.2.3. Isseparationstank .....	21
3.1.2.4. Firetrins separation .....	22
3.2. Direkte varmeveksling.....	23
3.2.1. Sekundære kølemiddel frysekoncentration .....	23
3.2.2. Vakuumis frysekoncentration.....	24
3.2.2.1. Vakuumisgenerator .....	25
3.2.2.2. Kompressoren .....	25
3.2.2.3. Isseparator .....	25
3.2.2.4. Energieffektiviseringer .....	26
4. Markedspotentiale .....	29
4.1. Spildevand.....	29
4.2. Vandproduktion .....	34
4.3. Fødevarerindustrien .....	34
4.4. Konklusion.....	36
5. Økonomisk analyse .....	37
5.1. Undersøgte anlægsløsninger .....	38
5.1.1. Frysekoncentration.....	38
5.1.1.1. Skrabevarmevekslere .....	38
5.1.1.2. Vakuum .....	39
5.1.2. Tretrins inddamper (TE).....	40

5.1.3.	Membran .....	41
5.2.	Anvendte investerings- og driftsomkostninger .....	42
5.2.1.	Generelt for alle processer .....	42
5.2.2.	Skrabevarmeveksling .....	42
5.2.3.	Vakuum .....	43
5.2.4.	Tretrins inddamper.....	43
5.2.5.	Membran .....	44
5.3.	Bær/juicekoncentrering .....	44
5.4.	Limvand .....	46
5.5.	Valle .....	48
6.	Konklusion.....	50
7.	Referencer.....	52

## 1. Introduktion

I projektet er muligheden for at bruge alternative metoder til koncentration af forskellige produkter og spildevandstrømme blevet undersøgt. I stedet for at bruge inddampning, hvor vandet koges ud af de strømme, der skal koncentreres, anvendes frysekoncentrering, hvor vandet fryses til iskrystaller. Ved at anvende denne metode fjernes vandet fra koncentratet ved at separere iskrystallerne, hvorefter de optøs. Frysekoncentreringen kan opdeles i to processer. Den ene proces er isdannelse, hvor vand omdannes til is i produktstrømmen, som koncentreres, og den anden proces er isseparation, hvor isen udskilles fra koncentratet og optøs på den måde at fjerne vandet.

Metoder til isdannelse bruges ofte i dag, f.eks. til at lave grødis (slurry ice) af havvand. Der bruges isgeneratorer med skraber, som fjerner iskrystallerne fra varmevekslerens væg. En anden metode er såkaldt vakuum isgenerering, som er uden varmevekslere. Disse to metoder til isgenerering er i projektet sammenlignet med inddampning med tretrins inddamper og membranfiltrering.

Formålet med koncentration af produktstrømme er enten at lave rent vand ud af spildevandsstrømme, hvor vandet er produktet, eller fjerne vandet ud af produktet, hvor koncentratet er produktet.

Fra fysikken ved man, at indfrysning af et kilo is kræver 333 kJ/kg, mens inddampning kræver 2114 kJ/kg. Dette peger derfor på, at besparelsen i energi kunne være omkring seks gange så høj. Energien har indflydelse på omkostningerne, men anlægsprisen og vedligehold er også væsentlige dele. Metoderne, som er undersøgt i projektet, er derfor sammenlignet ved hjælp af "Life Cycle Cost" analyse (LCCA), og resultaterne er afbildet i en omkostningsgraf.

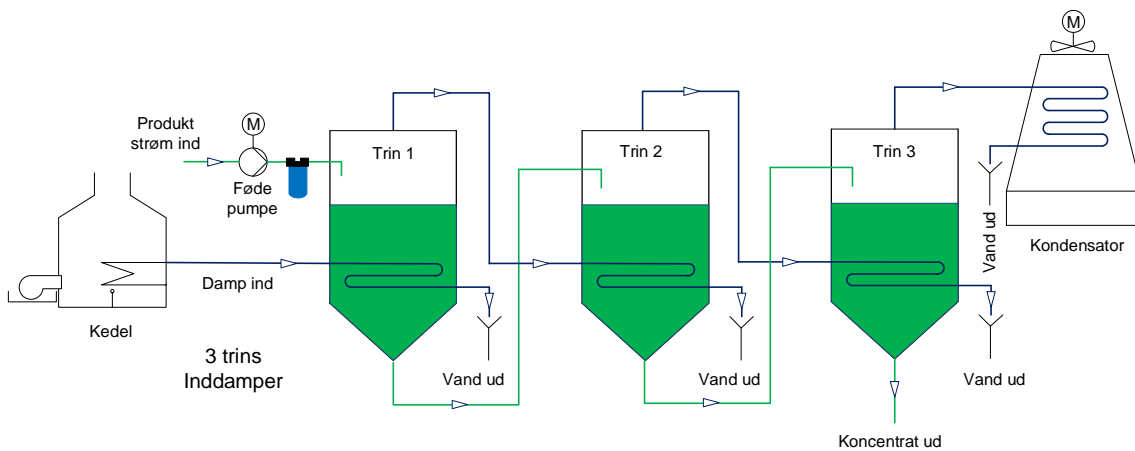
Rapporten starter med en beskrivelse af de metoder, der findes til koncentration. Derefter følger en beskrivelse af de metoder, som findes til frysekoncentrering, deriblandt dem som er undersøgt i projektet. Der er lavet en markedsundersøgelse, der ser på de markeder, hvor teknologien kan bruges. Fra markedsundersøgelsen er der valgt tre produktstrømme, hvor der efterfølgende er lavet en økonomisk analyse for at sammenligne frysekoncentrering med de konventionelle metoder til koncentration. Rapporten slutter med en konklusion.

## 2. Teknologier til koncentration

Følgende afsnit er en redegørelse af de teknologier, som findes til koncentration, herunder inddampnings- og membranteknologier.

### 2.1. Inddampning

Inddampning er den mest udbredte teknik for koncentration, der findes i dag. Inddampning bygger på at koge vand ud af produktet, der skal koncentreres, hvorefter man står tilbage med koncentratet. Vandet kondenseres herefter igen til destilleret vand. I de fleste tilfælde bruges damp til at opvarme produktet til kogepunktet, hvorefter vandet fordamper og forsvinder fra overfladen. Dampen, som dannes på denne måde, kondenseres og forlader processen som rent vand.



**Figur 1: Tretrins forward fødet inddamper**

Figur 1 viser en tretrins inddamper, hvor dampen, som genereres i en kedel, får temperaturen på produktstrømmen i trin 1 op på kogepunktet. Efter opvarmningen forlader dampen trin 1 som kondenseret vand. Den damp, der kommer fra opkoget af produktvæsken, bliver brugt i trin 2 til at opvarme produktet til kogepunktet. Produktet i trin 2 er altså koncentratet fra trin 1. Det samme sker i trin 3. Kogepunkterne i de forskellige trin sker ved faldende temperaturniveauer, som bliver styret af trykket i hvert trin. Det kondenserede vand fra alle trin og fra kondensatoren samles og udgør det udskilte vand. Koncentratet kommer ud fra trin 3.

For at lave den damp, der skal til for at køre processen, skal der for hvert kilo damp, der produceres i kedlen, bruges 2114 kJ/kg, idet damptemperaturen er 150°C. I en éttrins inddamper uden tab betyder det, at for hvert kilo vand, som koges ud af produktvæsken, skal det et kilo damp til. For at reducere energiforbruget til inddampningen kan der bruges forskellige metoder:

1. Flertrins direkte opvarmet inddamper (MEE): For at udnytte energimængden bedre kan der laves flere forskellige trin (se figur 1). Dette gøres ved at temperaturen og trykket i det første trin skal være så højt, at trykket kan blive reduceret i de efterfølgende trin. Trykket i det sidste trin afhænger af, hvad der er til rådighed i kondensatoren. I tilfælde af, at der bruges tre trin, bliver energiforbruget til at fjerne hvert kilo vand ud af produktet mindsket fra 2114 kJ/kg til 705 kJ/kg.
2. Mekanisk gas rekompresion (MVR): Her bruges der et trin og en gaskompressor, som komprimerer dampen, der kommer fra produktet, op til et højere tryk, inden den kondenseres ved en højere temperatur, der kan bruges til at vedligeholde kogningen af produktstrømmen. Disse anlæg er meget energieffektive, men dyre i indkøb.

På markedet findes der forskellige udformninger af MEE, hvor flowretningen af dampen og produktet definerer navnet, f.eks. forward, backward og parallel. Ved forward fødet flowretning strømmer produktet og dampen i samme retning, som vist i figur 1. Ved backward fødet flowretning strømmer produkt og damp modsat hinanden. Ved parallel flowretning er produktet delt parallelt igennem hvert trin.

For mange produkter forsvinder der også smags- og næringsstoffer ud sammen med kondensatet. Der skal således installeres udstyr til at genvinde disse smags- og næringsstoffer fra vandet, hvormed de kan tilføjes koncentratet igen. Dette øger kompleksiteten og prisen for anlægget. I nogle tilfælde, f.eks. alkohol, er det umuligt at bruge inddampning, fordi det ødelægger produktet.

I dette projekt er sammenligningen lavet ud fra en tretrins forward fødet inddamper.

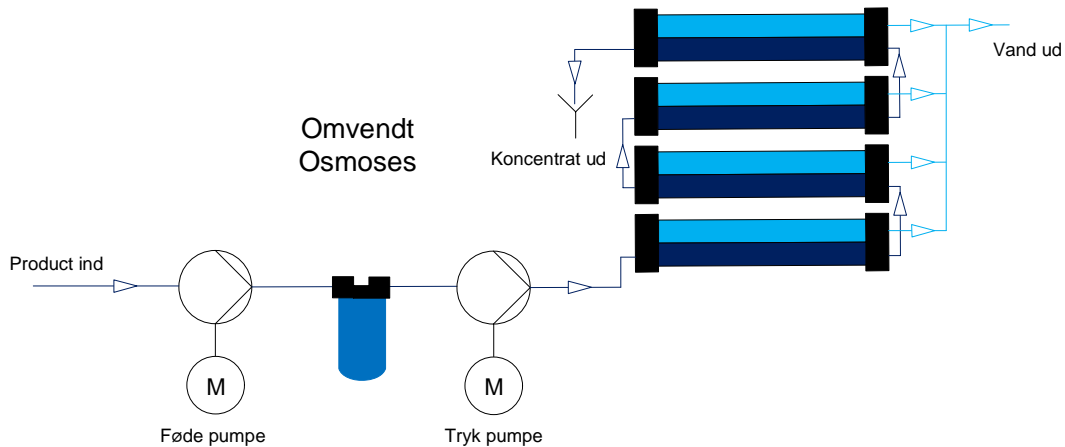
## 2.2. Membraner

Membranfiltre er opdelt i fire forskellige klasser afhængig af filtreringsgraden. De fire klasser er mikro, ultra, nano og omvendt osmoses (reverse osmosis RO). Forskellen i filtreringsgrad ses i tabel 1.

Porestørrelser	Proces	Filtreringstryk	Fjerner
> 0,1 µm	Mikrofiltrering	< 2bar	Store bakterier, gær, partikler
100 – 2 nm	Ultrafiltrering	1-10 bar	Bakterier, makro molekyler, proteiner, store virusser
2-1 nm	Nanofiltrering	3-20 bar	Virusser, ioner
< 1 nm	Omvendt osmoses	10-80 bar	Salt, små organiske molekyler

**Tabel 1: Klassefisering af membraner**

For koncentration, hvor formålet er at fjerne vandet ud af produktet, bruges omvendt osmose membraner, hvor driftstrykket på produktet kan ligge fra 10 til 80 bar afhængigt af produktet.



**Figur 2: Omvendt osmose proces**

I omvendt osmose bliver produktet, som skal koncentreres, presset igennem rør bestående af membraner (se figur 2). Dette tillader vandmolekylerne at vandre igennem membranen på grund af forskelle i det osmotiske tryk, mens koncentrationen fortsætter lige igennem røret.

Den største fordel ved membranprocessen er, at der ikke forekommer faseskift som f.eks. ved kogning. Den er derfor i de fleste tilfælde en energivenlig proces. For højere koncentrationer og mere vanskelige produkter kræver det et højt tryk at få produktet igennem membranen, hvilket kræver en del energi til pumperne. En anden udfordring ved membraner er, at de tilsmudses hurtigt ved svære produkter, hvilket nedsætter filtreringsevnen og kræver hyppige udskiftninger af filtrene. I disse tilfælde bliver driftsomkostningerne relativt høje.

Teorien bag membraner er at vandring af vandmolekylerne igennem membranmaterialet sker ved diffusion. Det vand, som skal fjernes, er opløst i produktet, og vandmolekylernes flow igennem membranmaterialet er bestemt af trykdifferencen imellem det osmotiske væsketryk og det tryk, som systemet er tilføjat.

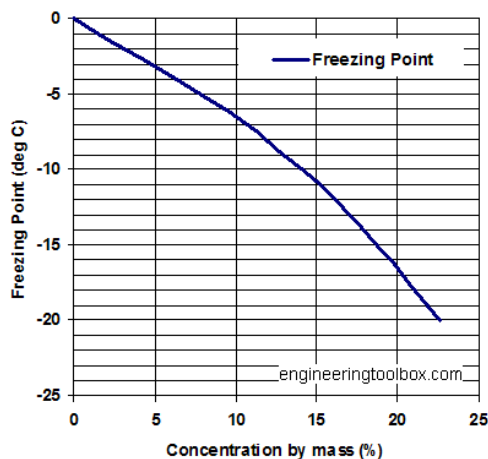
Ved omvendt osmose kan produktet maksimum koncentreres til 30% TDS (Total Dissolved Solids) (1), og ydelsen aftager ved stigende tilsmudsning af membranerne. I dette projekt ses der bort fra tilsmudsning, og i stedet bruges der en gennemsnitsydelse per dag.



### 3. Frysekoncentrering

Ved frysekoncentrering fryses vandet i produktet til is i stedet for at blive fordampet. Fordampning af et kilo vand kræver 2114 kJ/kg, mens indfrysning af et kilo is blot kræver 333 kJ/kg. Frysekoncentrering bruger derfor mere end seks gange mindre energi i forhold til en éttrins inddamper og knap to gange mindre i forhold til en tretrins inddamper set ud fra en ideal betragtning.

Frysekoncentrering går ud på, at vandet, som skal fjernes fra produktstrømmen, er frosset til is, hvorefter isen kan fjernes fra produktet. Slutproduktet er et koncentrat med lavere vandindhold. For at kunne frysekoncentrere er det vigtigt, at produktet indeholder et stof, som sænker produktets frysepunkt i forhold til rent vand. Dette kan f.eks. være calcium, natriumchlorid (salte) eller sukker. Eftersom vandet fryser til is (bundet vand), sidder de frysepunkts sænkende stoffer tilbage i produktet, hvorved koncentrationen øges i forhold til det frie vand, som medfører en yderligere sænkning i frysepunktet (se figur 3) (2). På denne måde er den mængde is, som er indfrosset, afhængig af temperaturen på blandingen af koncentrat og is. Dette giver en udmærket mulighed for at regulere indfrysningen ved hjælp af temperaturen på koncentratet. Som eksempel: ved en koncentrattemperatur på  $-5^{\circ}\text{C}$  viser figur 3, at is koncentrationen bliver 7,5 %. I tilfælde af rent vand, fryser det ved samme temperatur ( $0^{\circ}\text{C}$ ) indtil alt vandet er omdannet til is.



**Figur 3: Frysepunktskurve for NaCl vandopløsning**

Hvis frysekoncentreringsprocessen er udført i et trin, er det kun muligt at fjerne cirka 40% (3) af vandet i produktet som is. Ved højre iskoncentrationer begynder der at blive problemer med at håndtere koncentratet i forbindelse med pumper, istanke og andet udstyr. Disse problemer kan løses ved at have flere trin i frysekoncentreringen, hvor isen fjernes i hvert trin, og koncentratet føres videre til det næste trin. På den måde kan der også spares energi, hvis hvert trin er udført med forskellige temperaturer på kølemediet, som svarer til frysepunktet på det pågældende trin.

Teknikker til isfremstilling kan kategoriseres i:

- Indirekte varmeveksling
- Direkte varmeveksling

Ved indirekte varmeveksling er der kølemiddel på den ene side af en væg og produkt på den anden side. Typisk benyttede varmevekslere til denne teknik er skrabevarmevekslere, hvor overfladen af varmeveksleren bliver skrabet fri for is (SSHE, Scraped Surface Heat Exchangers).

Den anden type er direkte varmeveksling, hvor kølemidlet fordamper direkte i produktet. En af de anvendte teknikker er vakuumteknologien, hvor vandet i produktet fordampes og derved optager varme, som medfører, at noget af det resterende vand fryses til is. En anden metode, som har været forsøgt, er at sprøjte et flydende uopløseligt kølemiddel, f.eks. isobutan, ind i produktet. Isobutanen fordampes og optager varme, som derved omdanner noget af vandet til is. Det fordampede kølemiddel samles således igen, komprimeres og kondenseres til væske. Denne metode har dog vist et højt kølemiddelstab, og at kølemidlet i nogen grad stadig findes i koncentratet. Det er meget uheldigt især for fødevarer.

Begge metoder til frysekoncentrering består af følgende komponenter:

- Isfremstillingsenhed (isgenerator)
- Køleanlæg
- Is/koncentrat lagertank
- Isseparationsenhed

I isfremstillingsenheden bliver vandet i produktet omdannet til is. Udstyret til denne del varierer meget, afhængig af om der er tale om den indirekte eller den direkte varmeveksling. Her er det vigtigt, at de iskrystaller, der dannes, er så rene som muligt, dvs. at der er indfrosset så lidt produkt som muligt. Renheden afhænger af produktet og temperaturen på kølemidlet.

Køleanlægget er den enhed, hvor kølemediet, som forsyner isfremstillingsenheden med køling, er komprimeret og kondenseret. Denne enhed er forskellig for de to metoder. For skrabevarmevekslersystemer bruges traditionelle køleanlæg, men for vakuum systemer, hvor meget vanddamp skal flyttes, bruges centrifugale eller aksiale blæsere med højt omdrejningstal.

Is/koncentratlagertanken er der, hvor koncentratet og isen fra isfremstillingsenheden er lageret, indtil den går over til issepareringen. Denne del af anlægget er ens for begge metoder.

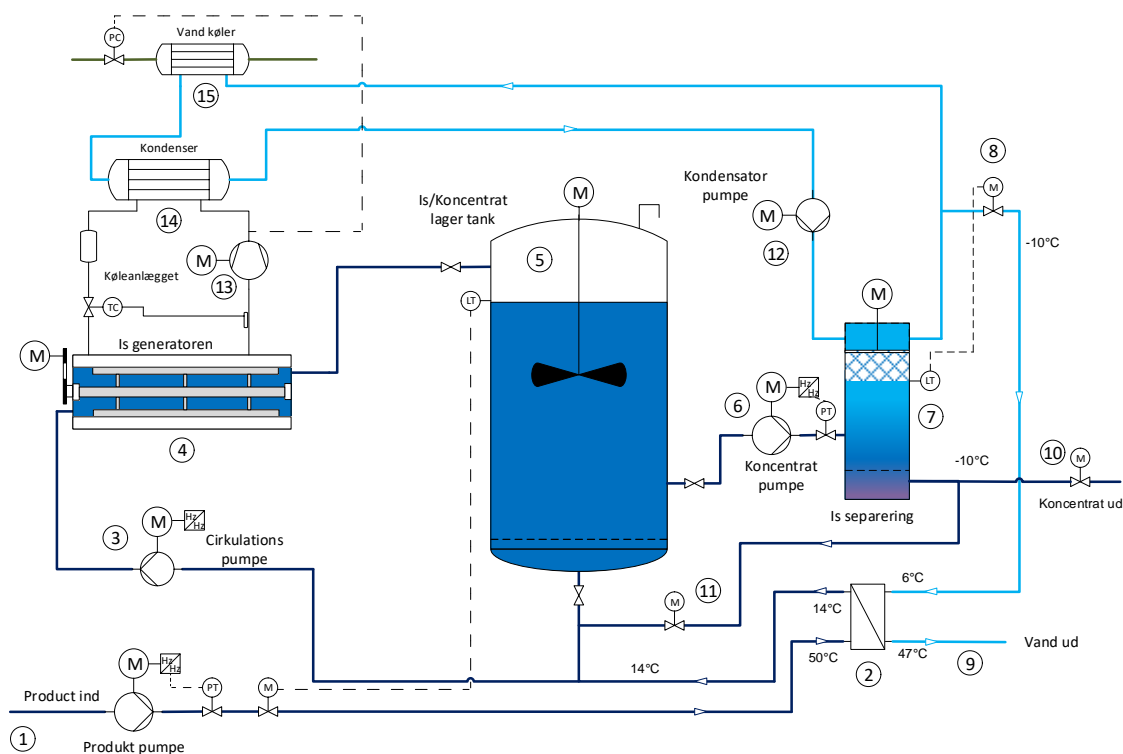
Isseparationsenheden er der, hvor isen er separeret fra koncentratet. Dette er den sværeste del af processen. Det er vigtigt at nå at separere isen og produktet helt, for at mindske produkttab sammen med isen. For nogle produkter er vedhæftningen af produktet på isen betydelig, hvilket fører til store produkttab. For nogle produkter bliver produktet også fanget i iskrystallen, hvis indfrysningshastigheden er for høj, dvs. hvis kølemiddeltemperaturen er for lav. Den del af produktet er vanskeligt at separere.

### 3.1. Indirekte varmeveksling

Ved indirekte varmeveksling er der adskillelse imellem kølemidlet og produktet i isfremstillingsenheden. Et skematisk anlæg af denne type er vist i figur 4 sammen med de forskellige komponenter, som frysekoncentreringsanlægget består af.

Isfremstillingsenheden, som omdanner frit vand i produktstrømmen til is, er vist som nr. 4. Anlægget bruger skrabet overflade varmeveksler (SSHE), hvilket betyder, at der sidder skraberne på en aksel inde i et rør. Skraberne roterer og skraber isen af rørvæggen. Dette rør er omsluttet af et andet rør, som har en større diameter, og som er lukket i enderne. I mellem de to rør strømmer kølemidlet, som køler produktet.

Køleanlægget består af komponenterne nr. 13, 14 og 15. Anlægget bruger fordampende kølemiddel, hvor fordampningen sker i isfremstillingsenheden, hvorved vandet i produktet indfryses inde i røret. Efter isfremstillingsenheden suges kølemidlet ind i kølekompresoren, nr. 13, som øger trykket på kølemidlet, så det kan kondenseres til væske i kondensatoren, nr. 14. Derfra flyder kølemiddelvæsken tilbage til isfremstillingsenheden og bliver ekspanderet i ekspansionsventilen til et tryk inde i isfremstillingsenheden, som passer til den temperatur, som indfrysningen skal ske ved. Vandkredsen med vandkøler, nr. 15, er brugt til både at køle kondensatorvandet og smelte isen i isseparatoren. På denne måde kan kondenseringen ske ved laveste mulig kondenseringstemperatur, som giver den højeste effektivitet.



Figur 4: Frysekoncentreringsanlæg med skrabet varmeveksler og varmegenvinding

Is/koncentratlagertanken, som lagrer koncentratet og isen fra isfremstillingsenheden, er vist som nr. 5, og isseparationsenheden er vist som nr. 7. Sidstnævnte separerer isen ud af koncentratet og smelter isen til vand.

Frysekoncentreringen forgår på den måde, at produktet, som skal koncentreres, kommer ind ved nr. 1 og pumpes igennem forkøleren nr. 2, inden produktet kommer til is-fremstillingsenheden nr. 4. Flowet ind til systemet er styret af højden i lagertanken, nr. 5. Pumpen nr. 3 er en cirkulationspumpe, som pumper produktet over isfremstillingsenheden og videre til lagertanken nr. 5. På den måde kan iskoncentrationen ud af isfremstillingsenheden holdes på et lavt niveau, som sikrer problemfri drift af isfremstillingsenheden. Blandingen af koncentrat og is pumpes fra lagertanken ind i isseparationsenheden. I denne flyder isen, som har en lavere vægtfylde, op og samles i toppen af is-separationsenheden, mens koncentratet forlader isseparationsenheden igennem et filter i bunden.

Med ventilen nr. 11 er det muligt at recirkulere koncentratet ind i lagertanken, og derved styre koncentrationen ud af anlægget. Vandkredsen igennem kondensator nr. 14, vandkøleren nr. 15 og isseparationsenheden nr. 7 benyttes til at flytte varmen fra kondensator nr. 14 til smeltning af is i isseparationsenheden nr. 7. På denne måde udnyttes varmen, som er genereret i kondensatoren, til at smelte isen. Overskydende varme fra motoren på kølekompressorerne køles væk i vandkøleren, nr. 15.

### 3.1.1. Isfremstillingsenheden - isgeneratoren

Isfremstillingsenheden omdanner det frie vand i produktstrømmen til iskrystaller. Denne enhed i frysekoncentreringen er den, der er mest afprøvet ved indirekte varmeveksling. Den bliver i dag kommercielt benyttet til eksempelvis at lave grødis (slurry ice) til afkølingsformål, f.eks. til fiskeindustrien. Her er produktstrømmen og isen tilsammen brugt til afkøling og bliver derved ikke bagefter separeret til to produkter, som det kræves i frysekoncentreringen, hvor isen skal fjernes fra koncentratet i isseparatoren.

Der findes forskellige isfremstillingsenheder på markedet, som kan bruges til isfremstilling. Når frysekoncentrering skal benyttes til koncentrering af fødevarer, er det et krav, at udstyret er fødevarer-godkendt, det er nemt at rense og kan holde til CIP (Cleaning In Place) rensning.

De mest almindelige kategorier af varmevekslere til isproduktion er:

- Skrabet overflade varmevekslere (SSHE)
- Falling film varmevekslere
- Underkølet vandgenerator

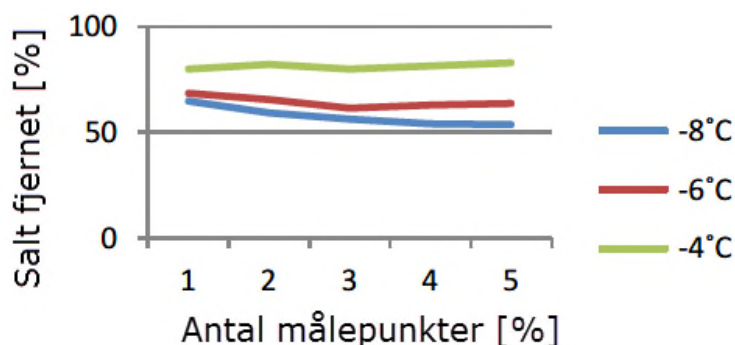
Udløbstemperaturen på produktet ud af isfremstillingsenheden styres af frysepunktet, og derfor af koncentreringsgraden, som er forklaret i kapitel 3 og i figur 3.

Kølemidlets fordampningstemperatur i isfordampningsenheden styres af, hvor stort et areal der er til rådighed for varmeveksling samt det samlede varmeoverføringstal og temperaturdifferencen imellem temperaturen på produktet og kølemidlet. I almindelige isfremstillingsenheder i dag er temperaturdifferencen mellem 10°C og 20°C, dvs. for produkter med et frysepunkt på -2°C vil kølemiddeltemperaturen være -12°C til -22°C. Ved en lavere temperaturdifferens (<10°C) bliver varmeoverføringen lavere, hvilket kræver

større vekslere for at kunne overføre den samme mængde varme. For at holde prisen og størrelsen på varmevekslerne nede bruger mange producenter højere temperaturdifferencer ( $>20^{\circ}\text{C}$ ). Dette går dog ud over effektiviteten, idet køleanlæggets kølekompresor skal arbejde med lavere sugetryk, som kræver mere energi.

Høj temperaturdifferens, dvs. lav kølemiddeltemperatur på kølesiden, har indflydelse på renheden af de producerede iskrystaller. Ved temperaturer langt under frysepunktet er der risiko for at iskrystallerne dannes så hurtigt, at produktet bliver indkapslet inde i isen. Dette fører til øget produkttab.

En anden risiko, når temperaturdifferencen er meget høj, er, at krystaldannelse på overfladen af røret sker hurtigt, hvilket kan medføre, at iskrystallerne fryser sig fast, inden skraberen når at passere. Dette kan til sidst medføre, at skraberne sætter sig fast, hvis ikke andre tiltag er foretaget for at afhjælpe problemet. Når temperaturdifferencen falder, formes krystallerne mere langsomt, og der er derfor mindre risiko for at produktet bliver fanget i iskrystallerne. Dette fører til en renere is og et mindre produkttab.



**Figur 5: Fjernelse af salt fra initial 2% NaCl-opløsning ved forskellige fordamningstemperaturer.**

Figur 5 (4) viser, hvor meget salt der fjernes i forhold til den initiale saltprocent i produktstrømmen ind  $[(\%ind - \%ud) / \%ind]$  i forhold til optøet is ud ( $\%ud$ ). Flowet er konstant på 25 L/min ved forskellige fordamningstemperaturer. Produktet ind i figuren indeholder 2% NaCl og 98% vand. Figuren kan bruges for at vurdere indflydelsen af fordamningstemperaturen ved isproduktionen. Frysepunktet for 2% NaCl-opløsning ligger på ca.  $-1^{\circ}\text{C}$ , som indikeret i figur 3. Ser man på en fordamningstemperatur på  $-8^{\circ}\text{C}$ , medfører det, at der kan fjernes ca. 55% af det initiale saltindhold, jf. figur 5. Dette betyder, at vandet fra den optøede is indeholder 45% af saltene, der er tilbage. De 45% af de 2% initial saltprocent bliver til 0,9% af salt i vandet fra isen. Derimod kan der ved en højere fordamningstemperatur på eksempelvis  $-4^{\circ}\text{C}$  fjernes ca. 80% af saltene, således at vandet fra isen kun indeholder 20%, svarende til 0,4% salt i det optøede vand.

Dette viser vigtigheden af at holde fordamningstemperaturen så høj som mulig, når isfremstillingsenheden bruges til frysekoncentrering. Herudover har dette også stor indflydelse på driftsomkostningerne for køleudstyret.

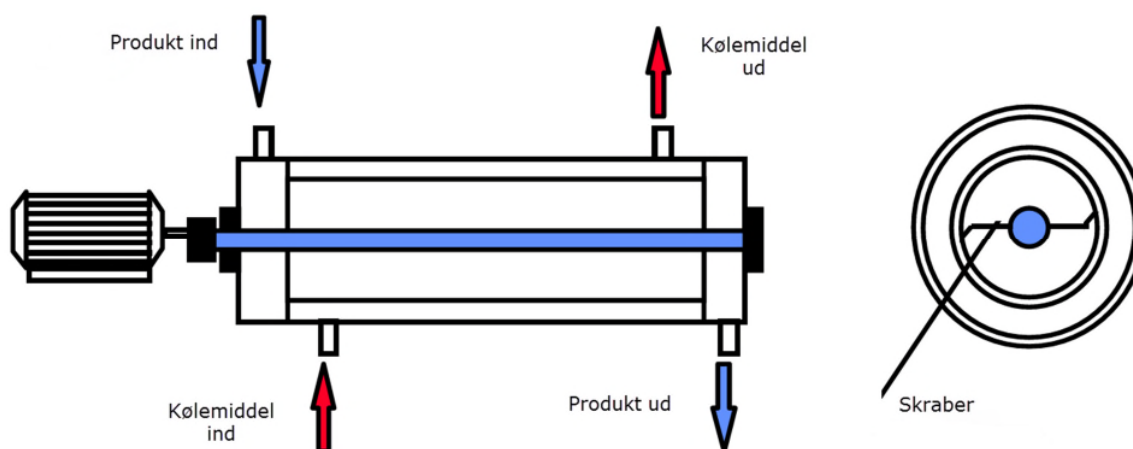
Mange kommercielle isfremstillingsenheder kører med temperaturdifferencer imellem produkt og kølemiddel på op til 18°C for NaCl-opløsninger for at mindske pris og størrelse på isfremstillingsenhederne. Det vil, ifølge grafen i figur 5, betyde, at der er en del salt tilbage i vandet, som er optøet fra isen.

På markedet findes der forskellige typer af isfremstillingsenheder, hvor de mest brugte beskrives i de følgende afsnit.

### 3.1.1.1. Skrabe overflade varmeveksler (SSHE)

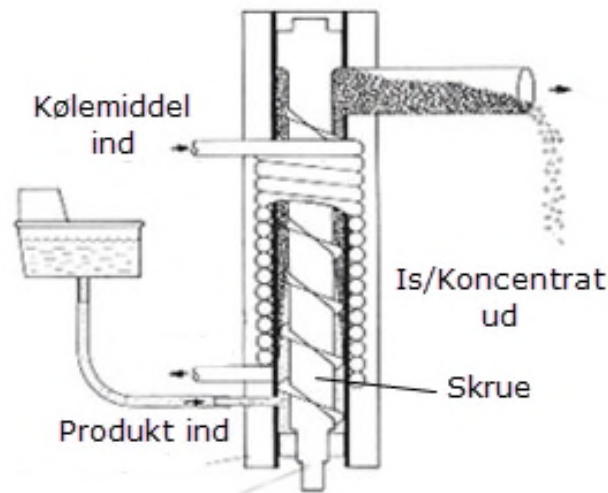
Den mest almindelige type isfremstillingsenhed er den nævnte skrabe overflade varmeveksler (SSHE). I denne type flyder kølemidlet imellem et indre rør og et ydre rør, som er lukket i begge ender (se figur 6). Produktet, der skal koncentreres, flyder inde i det indre rør.

Iskrystallerne bliver lavet på overfladen af det indre rør og skrabet af ved hjælp af skraber, som roterer inden i røret. For at mindske størrelsen og derved omkostningerne og for at skaffe overhedning til ekspansionsventilerne, kører disse isfremstillingsenheder typisk med høje temperaturdifferencer imellem kølemidlet og produktets frysepunkt (12 – 18°C). Dette betyder mere energi til kølesystemet for at lave koncentringen og mere indkapslet produkt i isen, som beskrevet tidligere. Det er derfor et spørgsmål om pris, driftsomkostninger og renheden i den is, der fremstilles. En mere driftsøkonomisk løsning med mange kvadratmeter varmeoverføringsareal imod en billig løsning med høje temperaturdifferencer. På grund af pris bruger disse isfremstillingsenheder mest tør fordampning, hvor kølemidlet kommer overhedet ud af isfremstillingsenheden. Dette bidrager også til lave sugetryk på kølemiddelsiden, som straffes med højere energiforbrug.



Figur 6: Skrabe overflade varme veksler. Kilde: (5)

En anden type isfremstillingsenhed fra firmaet Ziegra ses i figur 7. I denne type fryses isen fast på overfladen af et rør og skrubes af overfladen med en skrue. Kølemidlet er ført i kanaler udenom røret, hvor isen fryser på. Produktet kommer ind i bunden og is/koncentrat forlader i toppen af isfremstillingsenheden.

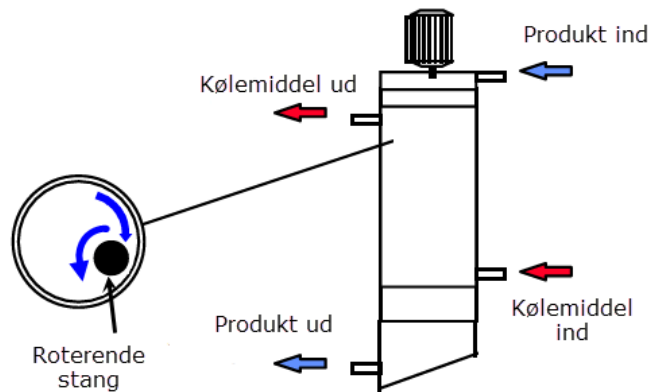


**Figur 7: Skrabe overflade varmeveksler med skrue**

Denne type har også, som den mere traditionelle skrabevarmeveksler, et lavt sugetryk til at indfryse isen og bliver derfor også straffet på økonomien. Det, at isen får lov til at fryse fast på overfladen, betyder, at der skal bruges en del energi til at drive skruen og skrabe isen af. Dette forværrer yderligere økonomien.

### **3.1.1.2. Overrislingsvarmeveksler**

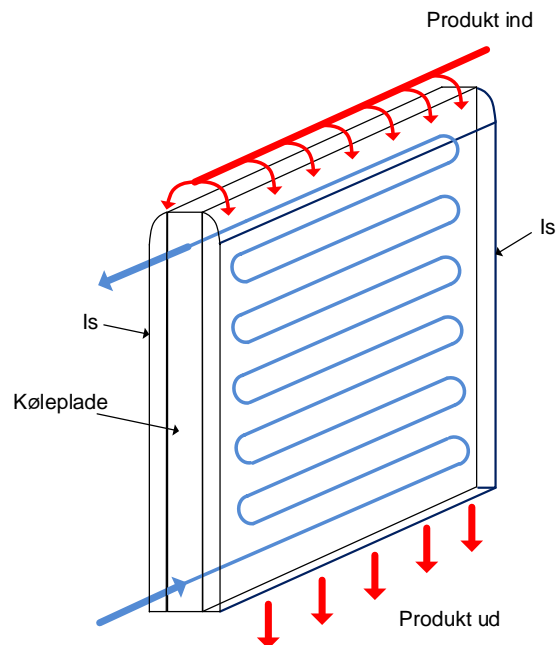
En anden type isfremstillingsenhed er overrislingsvarmeveksler, "falling film" varmevekslere (FFHE). Her bruges normalt oversvømmet varmeveksler, hvor kølemidlet koger imellem to rør, som beskrevet for skrabevarmevekslerne under afsnit 3.1.1.1. I det indre rør strømmer produktet ned langs væggen og bliver underkølet. Produktet er distribueret rundt om røret med en roterende stang (se figur 8) for at forhindre de mikroskopiske iskrystaller, som dannes, i at samle sig og fryse fast på rørets overflade. Produktet sammen med iskrystallerne falder ned i bunden af isfremstillingsenheden og strømmer ud af bunden som grødis.



**Figur 8: Falling film varmeveksler. Kilde: (5)**

Der er meget lille friktion imellem stangen og røroverfladen, som medfører, at der bruges mindre energi til at drive dem rundt for at forhindre, at iskrystallerne fryser fast på rørets indre overflade i forhold til de skrabende isfremstillingsenheder.

I en anden type overrislingsvarmeveksler strømmer produktet ned langs plader, hvor kølemidlet koger inden i (se figur 9). Produktet kommer ind i toppen og strømmer ned langs pladen. Vandet i produktet fryser fast til pladen, mens koncentratet flyder videre. Kølemidlet strømmer ind i pladen forned og fordamper i kanaler i pladen, indtil den forlader pladen i toppen.



**Figur 9: Falling film plade isgenerator**

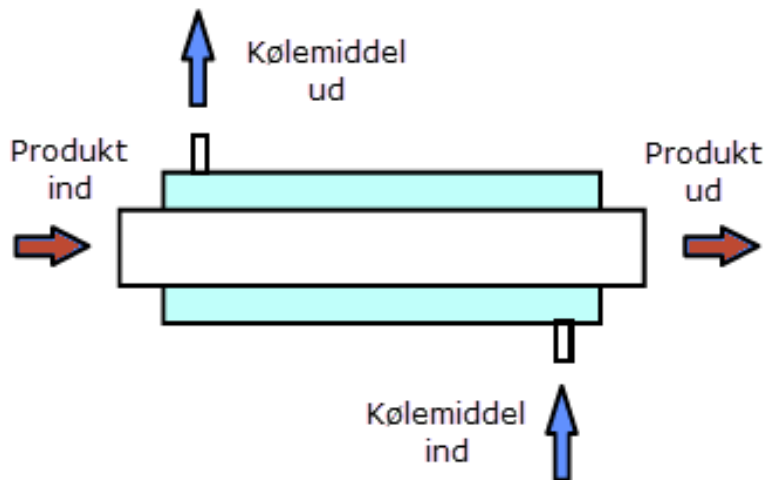


I denne type fryser isen fast på pladerne og bliver fjernet ved at varmt kølemiddelgas under tryk er ført ind i toppen af pladen. Når kølemiddelgassen kondenserer inde i pladen, smelter isen på overfladen af pladen, hvorved ispladen falder ned og derefter smelter.

Pladerne er samlet i grupper af eksempelvis otte plader, som så danner en isfremstillingsenhed.

### 3.1.1.3. Underkølet vand isfremstillingsenheder

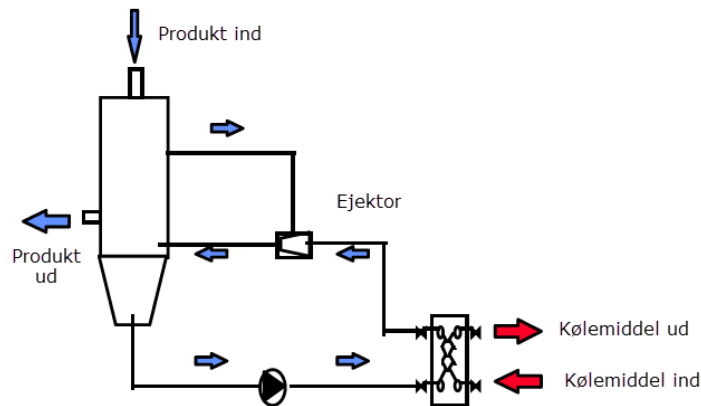
Isfremstillingsenheder kan også laves ved hjælp af underkølet vand (Supercooled Slurry Ice), hvor fordampere placeres horisontal. Produktet flyder også her inde i røret og kølemidlet udenom. Produktet underkøles i fordampere uden at danne is. Når produktet kommer ud af fordampere, er det udsat for en forstyrrelse, som sætter gang i isdannelsen. Isproduktionen er afhængig af, hvor meget underkøling produktet kan køles ned til, uden at der sker isdannelse inde i fordampere. Ismængden, der kan laves for hver grad underkøling, er ca. 1,25%/°C underkøling.



Figur 10: Underkølet vand isgenerator. Kilde: (5)

### 3.1.1.4. Ejektor type isfremstillingsenhed

I denne type af isfremstillingsenhed kommer produktet ind i toppen af en beholder. Metoden bygger på brugen af en væske, som er tungere end produktet, som skal koncentreres, og som har meget lavere frysepunkt og ikke er blandbart med produktet. Væsken falder til bunds i udskilningsbeholderen og ved hjælp af en pumpe cirkuleres igennem en varmeveksler, hvor temperaturen er sænket godt under produktets frysepunkt. På den anden side af varmeveksleren er der kølemiddel, som nedkøler væsken.



Figur 11: Ejektor type isgenerator. Kilde: (5)

Fra varmeveksleren flyder kold væske med forhøjet tryk, hvilket skyldes pumpen, videre til en ejektor, som ved hjælp af hastighedsændring suger produktet ind i væskestrømmen. På grund af turbulens og det at væsken er koldere end frysepunktet på produktet, så indfryses vandet i produktet til is. I separationsbeholderen er altså koncentreret produkt, is og kold væske separeret. Isen flyder til tops og skal fjernes ud af separatorens. Koncentreret produkt tages ud af midten, og tung kold væske samler sig i bunden, inden den igen pumpes til varmeveksleren.

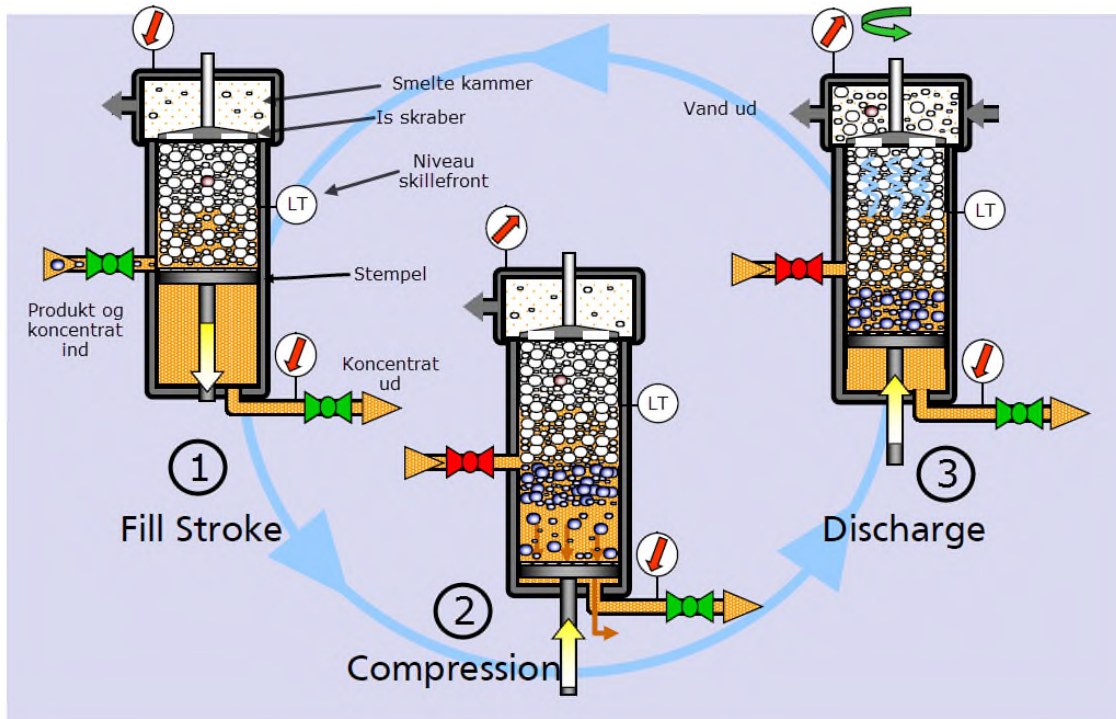
### 3.1.2. Isseparator

Issepareringsenheden er en kritisk del af frysekonzentreringen og er den del, som mangler at blive undersøgt nærmere for forskellige produkttyper. For nogle produkttyper hænger koncentratet på iskrystallerne, hvilket vanskeliggør separationen. Afhængigt af indfrysningshastigheden kan produktet blive indespærret i iskrystallen. Det sker, hvis iskrystaldannelsen sker for hurtigt, og det er dermed svært at få isen separeret. Begge udfordringer fører til forurening af det udskyllede vand med produkttab til følge.

Der findes få issepareringsenheder på markedet i dag, og der er plads til udvikling af en metode, som kan bruges for de fleste produkttyper. I dette afsnit bliver eksisterende enheder gennemgået, og der evalueres på deres fordele og ulemper.

### 3.1.2.1. Mekaniske vaskekolonner

En eksisterende metode til at separere is og koncentrat er ved brug af en såkaldt vaskekolonne. Denne teknologi bruges af blandt andre GEA og Sultzer. Navnet er opstået ved at iskrysterne bliver vasket i processen, inden de smelter. Dette sikrer et mindre produktspild.

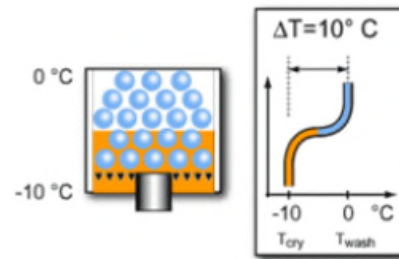


Figur 12: GEA vaskekolonne proces

For at forklare princippet i vaskeprocessen er der taget udgangspunkt i GEA's udstyr, som er vist i figur 12. Udskilningsprocessen består af tre faser. Den første fase er fyldning af vaskekolonnen, se nr. 1 i figur 12. Produkt sammen med iskryster er pumpet ind, imens et stempel bevæger sig ned for at gøre plads til fyldningen. Når stemplet har nået bundpositionen, begynder den næste fase (se nr. 2 i figuren). Ventilen til indløbet lukker, og stemplet begynder at bevæge sig op ad. Stemplet består af en filterplade, hvor koncentratet kan strømme igennem, mens iskrysterne er holdt tilbage. Stemplet presser på iskrager og presser dermed koncentratet ud af isen. På denne måde opnås 70-80% densitet i iskagen. Herefter starter fase 3 (se nr. 3 i figuren), hvor stemplet stadigvæk holder tryk på iskagen, og en iskraber i toppen af vaskekolonnen begynder at rotere. Isen skrubes således op i smeltekommeret, hvor varmt vand flyder igennem og smelter isen. Stemplet bevæger sig op ad, indtil den når indløbet, og derved begynder cyklussen igen.

For at sikre at koncentratet ikke forlader vaskekolonnen ud med isen og smeltevandet, er trykket på smeltevandet så højt, at der dannes væskefront i vaskekolonnen. Herved presses rent vand ned i iskagen og vasker resterende urenheder af iskrysterne. Væskefronten kan styres af temperaturen i ismassen, idet isen smelter ved 0°C, og temperaturen i

is/koncentratblandinger er en del lavere. Disse forhold kan ses i figur 13, hvor temperaturen på is/koncentratblandinger er  $-10^{\circ}\text{C}$ . Hvis temperaturføleren begynder at mærke en lavere temperatur en  $0^{\circ}\text{C}$ , har væskefronten bevæget sig op ad, og derved øges trykket på smeltevandet.



Figur 13: Væskefrontens placering

I (6) er det vist, at iskrystallernes størrelse er meget vigtig for en effektiv separation i vaskekolonnen. Større og uniforme iskrystaller resulterer i højere separationskapacitet og derfor bedre økonomi. Der er derfor ofte brug for modningstid for iskrystallerne i istanken for at sikre en størrelse, som kan skabe god separation i vaskekolonnen.

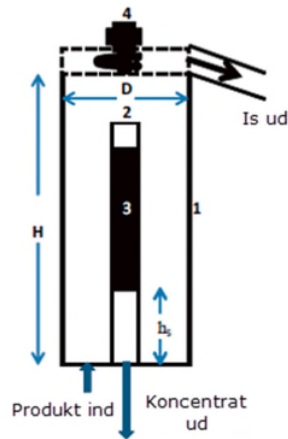
Den omtalte vaskekolonne bruges ved produkter, som har højere massefylde en is, som derved ved hjælp af tyngdekraften flyder op og hjælper til ved separationen. I tilfælde af at krystallernes densitet er mindre end produktet, er følgende proces vendt på hoved. Iskrystallerne samler sig i bunden af vaskekolonnen, og koncentratet tages ud af toppen.

Udstyret til denne type isseparation er ret dyrt og kræver kompleks styring, men har til gengæld en god udskilningsgrad.

### 3.1.2.2. HybridICE

I forsøg på at lave billigere alternative til de mekaniske vaskekolonner, har Tshwane University of Technology undersøgt en issepareringsenhed, som de kalder HybridICE. Man indikerer, at denne metode er en simpel separeringsmetode og relativt billig. Med denne metode er der ifølge (4) ikke behov for isvask af mange produkter.

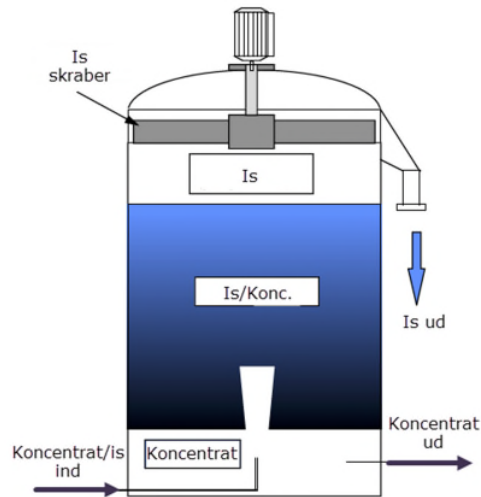
Produktet pumpes ind i bunden af HybridICE filteret (se figur 14). Inde i midten af filteret er der et filteringsrør, hvor koncentratet suges ud af isen. Isen, som har mindre vægtfylde, fortsætter op i separatoren og skrubes ud i toppen. Bevægelsen af is opad i separatoren opretholdes på grund af trykket ind i produktstrømmen, som presser isen opad. Krystallernes størrelse er ikke så vigtig for HybridICE filteret, som det er tilfældet i den mekaniske vaskekolonne isseparationsenhed.



Figur 14: Skitse af HybridICE filter. Kilde: (3)

### 3.1.2.3. Isseparationstank

En anden metode til at udskille isen fra koncentratet er at bruge en stillestående tank, som vist i figur 15. Med denne metode er opdriftskraften i isen brugt til at stå for udskillelsen. Isen samler sig i toppen af tanken og bliver skrabet bort ved hjælp af en isskraber.



Figur 15: Isseparationstank

Koncentrat og is kommer ind i bunden af issepareringstanken, hvorefter isen flyder op og samler sig i toppen af tanken. Koncentratet forlader tanken i bunden. Denne type separationstank kan bruges til både batch og kontinuert udskilning.

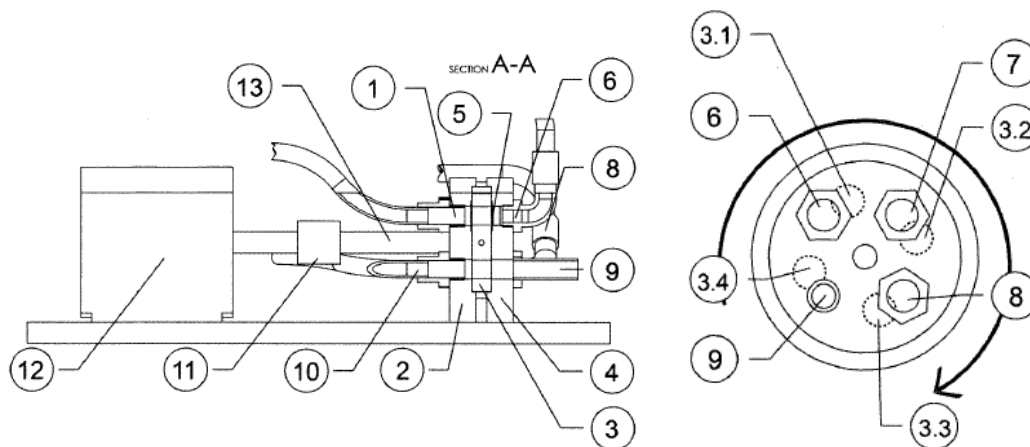
I batchkørslen er produktet fyldt på hele tiden, mens isen bliver fjernet. Herved holdes niveauet i tanken konstant, uden at koncentratet er tappet af tanken. På denne måde bliver indholdet mere og mere koncentreret. Når den ønskede koncentration er opnået, er isgenereringen stoppet, og tanken er tømt for koncentrat, hvorved en ny portion fyldes på igen.

I kontinuerlig kørsel er produktet konstant fyldt på for at holde niveauet i tanken. Aftapning af koncentrat ud af tanken starter, når den ønskede koncentration er opnået.

### 3.1.2.4. Firetrins separation

En patenteret isseparationsteknik fra Thor-Ice går ud på at separere is og koncentrat i nogle trin. Udstyret, som ses i figur 16, bygger på, at der er roterende hjul (3), som er klemmt mellem to endeplader (2) og (4). I endepladerne er der fire huller, og det roterende hjul har tilsvarende fire kanaler. Hjulet roterer med uret på en eldrevet aksel. Koncentrat og is kommer ind gennem rør (1). Når kanalen i den roterende del (3.1) og rør (1) er over for hinanden, er is/koncentratblanding fyldt i kanalen. I endedæksel (4) over for rør (1) sidder et filter, som filtrerer koncentratet fra isen i første trin, hvorefter koncentratet flyder videre ud gennem rør (6). På denne måde er maksimal is pakket ind i kanalen (3.1) i hjul (3).

Ved rotationen på hjul (3) til trin 2 flyttes kanal (3.1) over til rør (7) og bliver til kanal (3.2). Koncentratet, som stadigvæk sidder på iskrystallerne, bliver suget ud gennem filteret i plade (4) og videre ud igennem rør (7). På denne måde bliver koncentratet yderligere fjernet fra iskrystallerne, som sidder tilbage i kanalen (3.2).



Figur 16: Firetrins udskilning. Kilde: (7)

Når hjul (3) roterer videre til trin 3, hvor kanal (3.3) er over for rør (8), suges det koncentrat, der stadigvæk er tilbage fra trin 2, ud gennem rør (8). Trin 2 og 3 kan også bruges til at vaske iskrystallerne, hvis dette ønskes.

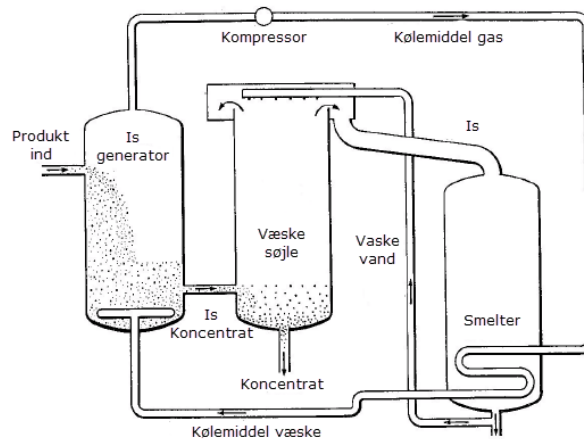
I sidste trin er kanal (3.4) over for rør (9) og (10). Der bruges trykluft igennem rør (10) til at skyde ren is, som sidder i kanal (3.4), ud af isseparatoren gennem rør (9).

### 3.2. Direkte varmeveksling

Isfremstilling med direkte varmeveksling er en metode, hvor der ikke bruges varmevekslere til at overføre varmen fra produktet over til kølemidlet. Det kan ske ved at mediet, der skal koncentreres, er kølemidlet selv eller at kølemidlet bliver indført i produktet og efterfølgende skilt fra og genbrugt. Den førstnævnte kaldes for vakuum isfrysekoncentration og den anden sekundære kølemiddel frysekoncentrering (secondary refrigerant freezing SRF).

#### 3.2.1. Sekundære kølemiddel frysekoncentrering

Sekundære kølemiddel frysekoncentrering er anlæg, hvor et kølemiddel, som ikke er blandbar med produktet, benyttes, f.eks. butan, som ikke er blandbar med vand. Kølemiddelvæsken, som er under tryk, er ekspanderet direkte ind i produktet, hvormed kølemidlet optager varmen ved ekspansionen og indfryser derved isen i produktet (se figur 17).



Figur 17: SRF anlæg

Kølemiddelsgassen samler sig i toppen af isgeneratoren og suges væk af kompressoren. Kompressoren øger trykket på kølemiddelsgassen, som så kondenserer i smelteren ved at smelte isen fra produktet. Is og koncentrat flyder fra isgeneratoren til isseparation, hvor isen flyder til tops, mens koncentratet tappes ud i bunden. En del af det smeltede vand fra smelteren sprøjtes over isen i isseparatoren for at vaske isen fri for koncentrat.

Et prototypeanlæg blev udviklet i USA i halvfjerdsere (8), som fungerede tilfredsstillende. Denne metode blev dog aldrig kommercialiseret.

Fordelen ved anlægget er den direkte varmeveksling, men ulemperne er tab af kølemiddel, som således ender i vandet og koncentratet.

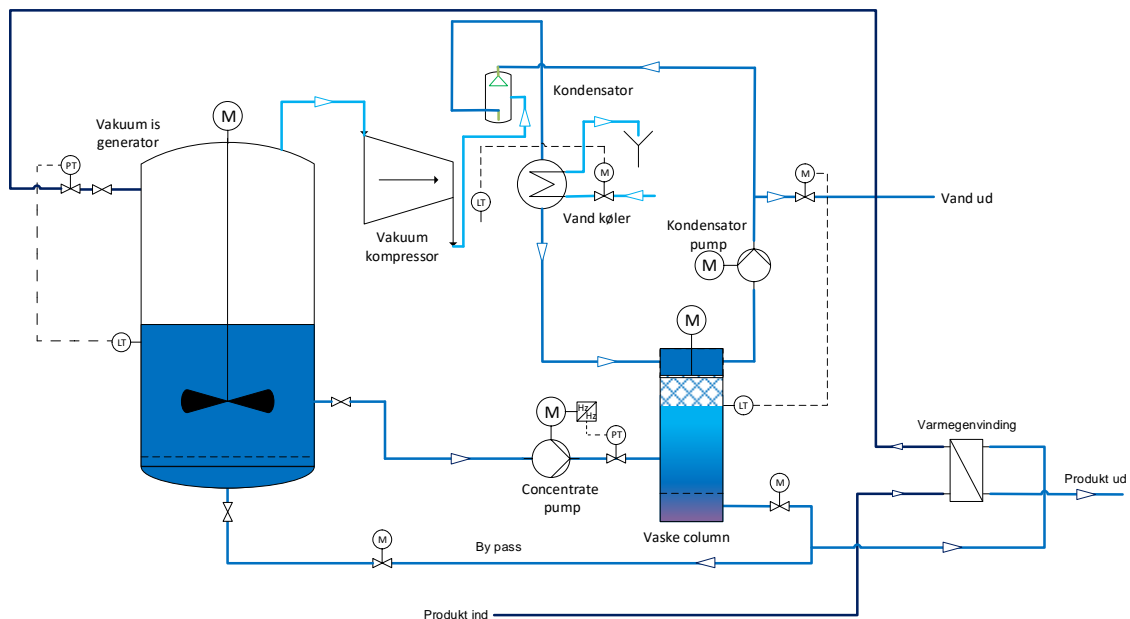
Denne type anlæg til frysekoncentrering er ikke omhandlet mere i denne rapport.

### 3.2.2. Vakuumis frysekonzentrering

Frysekonzentrering ved hjælp af direkte varmeveksling i vakuum virker på den måde, at en del af vandet i produktet fordampes, og energien til fordampningen bruges til at indfryse iskrystaller i isgeneratoren ved vandets trippelpunkt (ved tryk på 611 Pa absolut tryk). Trippelpunktet er der, hvor alle tre faser af materialet (vand, vanddamp og is) kan være i ligevægt på samme tid ved en specifik temperatur og tryk. Vakuumsfrysekonzentrering bruger trippelpunktskonceptet til at generere vanddamp og iskrystaller i vakuumtanken og derved koncentrere produktet.

Produktet strømmer ind til en varmegenvindingsvarmeveksler (se figur 18) og derfra ind i isgeneratoren. Den del af vandet, som fordampes fra produktet, er komprimeret i kompressoren og senere sendt til kondensatoren. Kondensatoren er direkte varmeveksling, hvor vanddampen fra kompressoren er kondenseret til rent vand ved varmeveksling imod koldt vand fra issmeltningen, som er rislet ned i kondensatoren i modstrøm med vanddampen.

Is og koncentrat pumpes fra isgeneratoren over til issepareringsenheden. I figur 18 er denne vist som vaskekolonne, men kan i princippet være de samme metoder, som er beskrevet under indirekte varmeveksling. I issepareringsenheden bliver iskrystallerne fjernet fra koncentratet og smeltet. Koncentratet kan så pumpes til isgeneratoren igen, indtil den ønskede koncentration er opnået. Herefter tappes den ud af systemet igennem varmegenvindingsvarmeveksleren.



**Figur 18: Vakuums frysekonzentreringsanlæg**

I toppen af isseparatorenheden bliver iskrystallerne smeltet ved hjælp af vand, som kommer fra vanddampkondenseringen. Det overskydende vand tappes ud af systemet som rent vand. Styringen af det vand, som forlader systemet, gøres ud fra princippet om at holde væskefronten i isseparatoren konstant.



Vakuumfrysekoncentrering indeholder i princippet følgende komponenter:

- Vakuumisgeneratorenhed
- Vakuumkompressor
- Kondenser
- Isseparationsenhed

Isseparationsenheden for direkte varmeveksling er den samme som for indirekte varmeveksling og er forklaret under afsnit 3.1.2.

### **3.2.2.1. Vakuumisgenerator**

Vakuumisgeneratoren er en tønne, hvor produktet, som skal koncentreres, er suget ind i. Trykken inde i tanken er styret af produktets trippelpunkt. Når en del af vandet i produktet fordampes ved trippelpunktets ligevægtstilstand, overføres energi til fordampningen ved at en del af vandet i produktet fryser til is.

Ved forsøg har man fundet ud af, at den maksimale isprocent i isgeneratoren højest kan være 15%. Dette skyldes, at der ved højere koncentrationer begynder at akkumulere is på vandoverfladen i isgeneratoren. Dette sker, idet der ved højere iskoncentrationer bliver for megen opdrift i isen, som medfører, at den flyder til tops i stedet for at flyde i produktet, som distribuerede iskrystaller. Derved dannes der islag, som vandet ikke kan dampes igennem, og processen stopper. Herudover er det svært at få isen ud af tønden, hvis den ikke er opblandet i produktfasen. For at løse dette skal der omrøres i tønden. Den løsning arbejdes der på i øjeblikket i et udviklingsprojekt, som kører ved Teknologisk Institut.

### **3.2.2.2. Kompressoren**

Vanddampen, som opstår ved trippelpunktet, fjernes med en mekanisk eldrevet kompressor og forvandles til væske i en kondensator. Vanddampen, som dannes, er ved meget lave tryk, hvilket medfører, at den fylder meget per kilo damp. Det betyder, at der skal flyttes store mængder damp, og derfor bruges aksial eller centrifugale kompressorer, som roterer ved høj hastighed (omkring 14000 RPM). Dette er gjort for at mindske størrelsen på kompressoren.

På grund af den meget lille specifikke volumen på vanddampen bliver rør, kompressor og udstyr stort og forholdsvis dyrt. Derfor er frysekoncentrering med vanddamp bedre egnet til større kapaciteter.

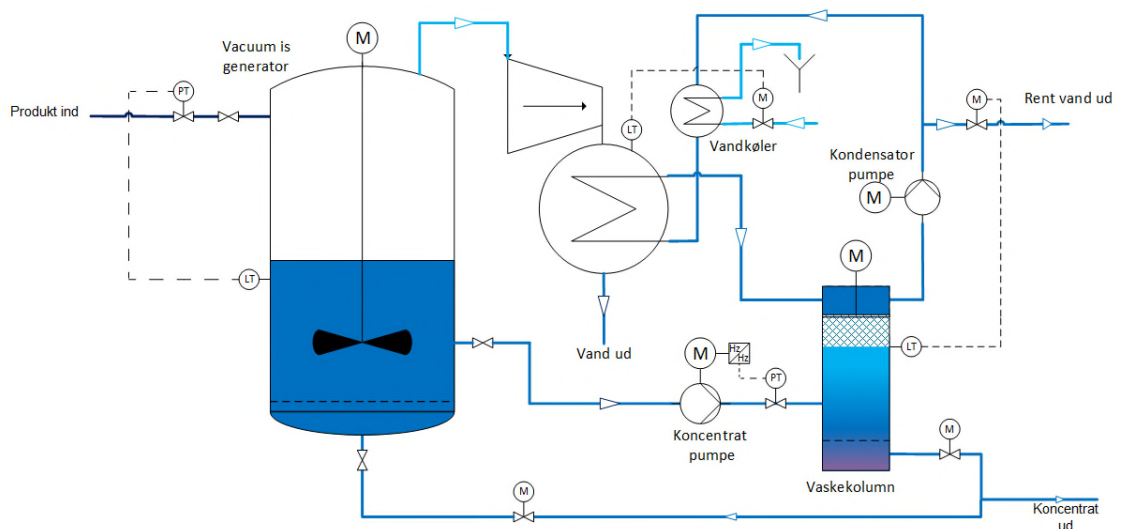
### **3.2.2.3. Isseparator**

Isseparatorer til vakuum is er de samme som for skrabe varmevekslerne og er beskrevet i afsnit 3.1.1.3.

### 3.2.2.4. Energieffektiviseringer

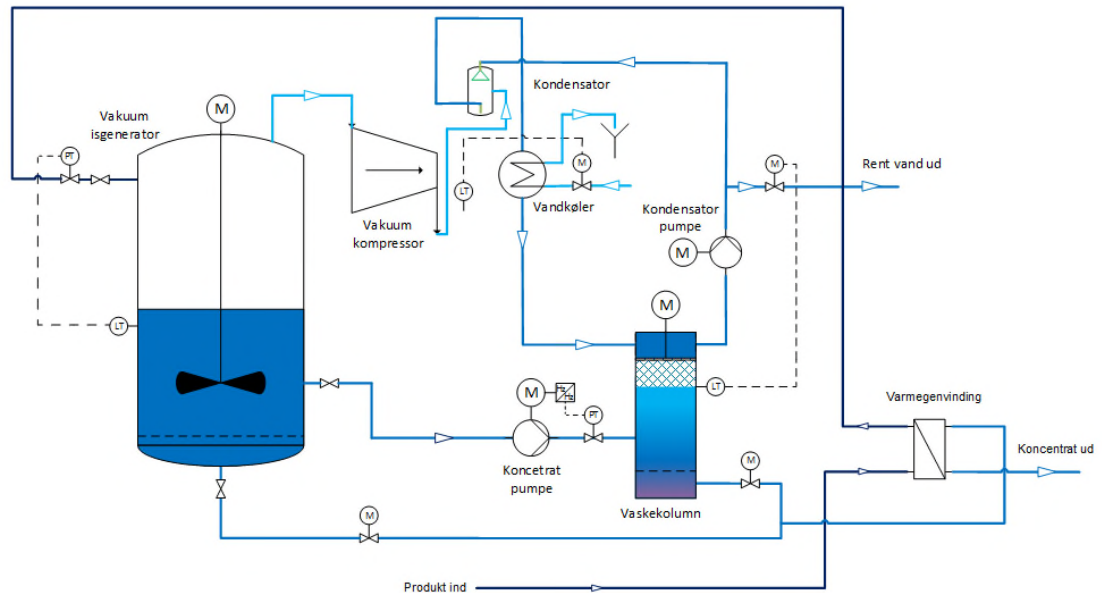
Energieffektivisering af vakuump frysekoncentreringen er mulig ved at opstille varmevekslerne på en hensigtsmæssig måde. Herved forbedres energiforbruget og virkningsgraden, og levetidsomkostninger sænkes. Nogle forslag til forbedring er nævnt i det følgende.

Et eksempel på, hvordan systemet kan være opstillet, er, at dampen kondenseres i en indirekte kondensator (se figur 19). Kondensatoren afkøles af vandet, som bruges til at smelte isen. Herved kommer der rent vand ud af systemet to forskellige steder, både fra kondensatoren og fra ismeltingen. Det betyder dog, at der kræves højere kondenseringstemperaturer på grund af temperaturdifference i kondensatoren.



**Figur 19: Vakuump frysekoncentreringsproces uden varmegenvinding og indirekte kondenser**

En mulighed (se figur 20) er at kondensere vanddampen fra kompressoren direkte ind i vandet fra ismeltingen. Her vil kondenseringen forgå uden temperaturdifference og ved samme temperatur som på vandet til ismeltingen. På denne måde samles de rene vandstrømme og tappes kun ét sted i systemet. Dette system giver en energibesparelse i forhold til det beskrevne system i figur 19. Figur 20 viser en varmegenvinding, som også kan bruges på anlægget vist i figur 19 og ligeledes på frysekoncentreringsanlæg med skrabevarmevekslere. Den varmegenvinding mulighed er meget fornuftig, hvis produkttemperaturen ind er høj, da direkte varmeveksling er meget billigere end at fjerne energien igennem køleudstyret.

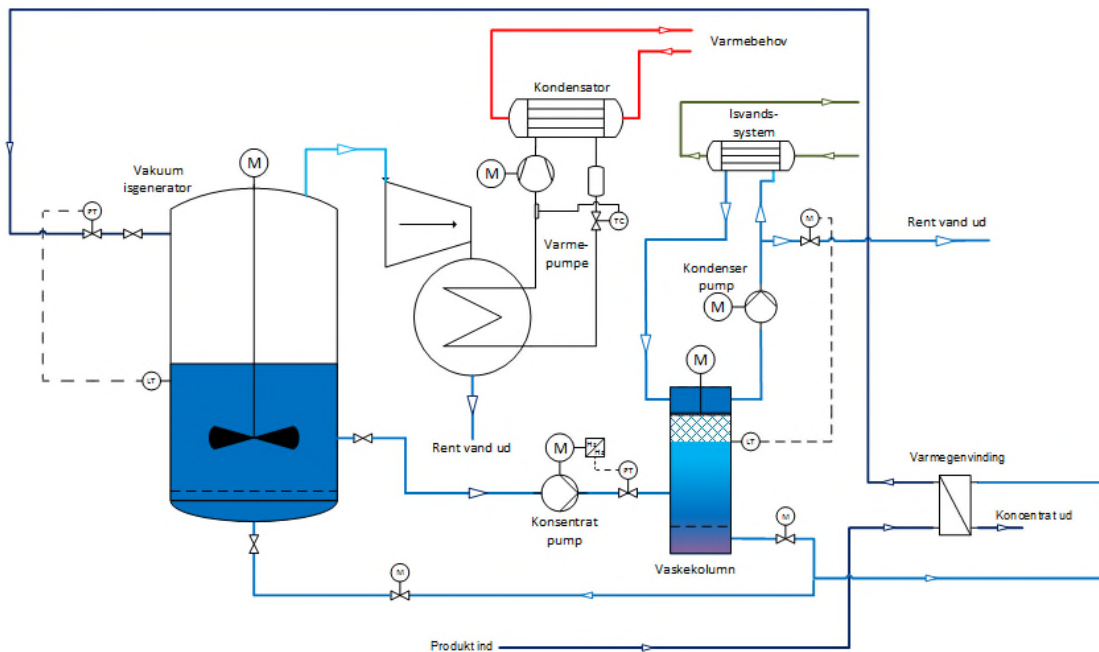


**Figur 20: Vakuumpumpekoncentreringsproces med varmegenvinding og direkte kondensering**

En anden mulighed (se figur 21) er at bruge indirekte kondensering som i figur 19 og bruge kondenseringsvarmen som varmekilde til en varmepumpe. Spildvarmen kan bruges som procesvarme internt i produktionsprocessen eller til at producere fjernvarme. På den måde spares der energi til opvarmning. Det er også en mulighed at bruge afsmeltning af isen til at afkøle isvand, som bruges i produktionen til køleformål. På den måde kan energien spares ved køleanlægget. Investeringssomkostningerne på denne slags frysekoncentreringsprocesser er højere end de ovenfor beskrevne systemer, og levetidsomkostninger kan reduceres betragteligt, da både varmeeffekten og køleeffekten er brugt og kan derfor spares andre steder.

Figur 21 viser også varmegenvinding med varmeveksler, som giver besparelse ved varme produkttemperaturer.

Muligheden, som er præsenteret her, med varmepumpe og isvandskøling kan også bruges på frysekoncentreringsanlæg med skrabevarmevekslere.



**Figur 19: Vakuumsisgenereringsproces med varmegenvinding, indirekte kondensering, varmepumpe og isvandskøling**

Processen i figur 21 er estimeret til at have den højeste virkningsgrad, fordi varmepumper næsten altid kører med relativt høj COP, men hvis der ikke er brug for varmen, giver det ingen mening at investere i sådan et system.

Virkningsgraden for hver proces er ikke analyseret i denne rapport, og i den økonomiske analyse er det et frysekoncentreringssystem med kondenser, som bliver brugt (se figur 19), både med og uden varmegenvinding.

## 4. Markedspotentiale

For at kunne vælge de produktstrømme, som ville give mening i den efterfølgende økonomiske analyse, er der kigget på forskellige markeder, hvor frysekoncentrering kunne anvendes. De undersøgte markeder er opstillet i bilag 1, og hovedkonklusionerne er samlet her.

Markedsanalysen er delt op i tre anvendelses kategorier; (i) spildevand, (ii) vandproduktion og (iii) fødevarerindustrien. Interessen for at installere frysekoncentreringssystemet afhænger af muligheden for at forbedre økonomien eller er grundet bedre miljøhensyn og i nogen tilfælde også mangel på vand, som så kunne genvindes ved hjælp af frysekoncentrering. Markedsanalysen fokuserer på forskellige industrier i Danmark, hvor det vurderes, at markedspotentialet er størst.

I følgende afsnit er konklusionerne fra bilag 1 samlet. De tre forskellige kategorier er:

- (i) **Spildevand:** Tommelfingerreglen er, at selskaber, som bruger meget vand, næsten har et tilsvarende spildevandsforbrug. Det kan f.eks. være vaskeprocesser. Undtagelser kan findes i levnedsmiddelindustrien, hvor nogle typer af bryggerier bruger mere vand i deres produkt end det spildevand, som efterfølgende forsvinder til kloakken. I (9) er 10 af de mest vandforbrugende virksomheder i Danmark analyseret. Resultaterne viste, at fødevarerindustrien bruger mest vand, og i (10) er det vist, at 50% af spildevandet fra industrien i Danmark kommer fra fødevarerindustrien. Derefter kommer pharmaindustrien.
- (ii) **Vandproduktion:** Kan betale sig, hvor grundvand er relativt dyrt eller hvor rent grundvand ikke findes.
- (iii) **Fødevarerindustrien:** Fødevarerkoncentrering handler om at øge delen af tørstoffet i produkt. Det betyder, at produktet indeholder mindre vand og mere af råvaren. Ved at fjerne vandet fra råvaren er det muligt at ændre produktets tekstur, styre alkoholindhold, øge værdien, minimere transportomkostningerne og mere.

### 4.1. Spildevand

Spildevand kommer næsten alle steder fra, f.eks. husholdninger, industrier, erhvervsvirksomheder og institutioner. Spildevandet indeholder store mængder vand, som umiddelbart ikke er brugbart til noget, fordi det indeholder stoffer eller uønskede materialer, som først skal fjernes. Hvis en produktionsvirksomhed genbruger vandet fra processtrømmen, kan der spares vand i indkøb, penge til afledning af spildevandet, og i nogle tilfælde kan der produceres et koncentreret produkt, som er muligt at bruge eller forarbejde yderligere og sælge.

I følgende tabel er der opstillet forskellige markeder, som genererer spildevand. Disse markeder er undersøgt i projektet, og de er opdelt i tre kategorier: vaske-, fødevare- og andre processer.

## Vaskeprocesser

### Afisning af flymaskiner:

Billund lufthavn bruger 151.000 l/år.  
Kastrup bruger 390.000 l/år.

- Afisning forgår på afisningsplatforme, hvor 80-90% af produktet samles i tanke, som køres til rensningsanlæg.
- Til afisning bruges glykol, som indeholder stoffer, der kan være skadelige i naturen.
- Økonomisk og miljømæssig forbedring ved at bruge frysekoncentrering til separation af vand og glykol, således at vandet og glykolen kan bruges igen.
- Vurderet som en mulighed for frysekoncentrering.
- Renheden på glykolen er vigtig for flysikkerheden, og derfor er der brug for at analysere, hvordan det kan løses med frysekoncentrering. Måske sammen med membranfiltrering af afsmeltet is.

### Bilvask:

Danske vaskehaller bruger hvert år ca.  
730 tons vaskekemi og 1,7 millioner tons vand.

- I Danmark har Circle K 278 vaskehaller.
- Bilvaskene er fordelt over hele landet, og det er derfor ikke muligt at installere et centraliseret system.
- Genvundet vand vil kunne genbruges som vaskevand.
- Vurderet, at der er et lille potentiale for frysekoncentrering på grund af, der findes billigere løsninger. Vaskene er fordelt over hele landet, og rensningsbehovet er lille på hvert sted.

### Erhvervsvaskerier:

I erhvervsvaskerier er mængden af spildevand ca.:  
1,4 millioner tons/år.

- 2-3 virksomheder har den største markedsandel.
- Erhvervsvaskerier er fordelt over hele landet, og det er derfor ikke muligt at installere centraliseret system.
- Genvundet vand kan genbruges som vaskevand.
- Fortyndet sæbe kan genbruges, men det vil kræve efterbehandling.
- Bedre miljø, hvis sæben ikke forsvinder ud i kloakken.
- Kunne være mulighed for frysekoncentrering for de store virksomheder.

### Farve- og lakfabrikker:

Rengøringen foregår vha. ca. 25 liter vand per rengøring.  
Der er 68 farve- og lakfabrikker i Danmark.

- Hvis der skiftes produktkvalitet, skal perlemøllen vaskes efter hvert parti, mens det kan undlades at rengøre den, hvis der fortsættes med samme kvalitet. Vandforbruget derfor ikke stort.
- Genvundet vand kan bruges til at recirkulere rens vandet.
- Vurderet potentiale for frysekoncentrering, men det skal undersøges nærmere.

### Industribejdsning:

Der findes 30 firmaer i Danmark.

- Når emner til industribejdsning spules rene i rent vand, vil vandet blive forurennet med tungmetallerne krom, nikkel, molybdæn samt syrerester.
- Her bearbejdes det sure spildevand i flere trin, således at 70% af vandet kan genbruges, 25% sendes til destruktion og de sidste 5% er tungmetallerne indespærret i slam, som også sendes til destruktion på behandlingsanlæg, som er godkendt af myndighederne i Danmark og Tyskland.
- Vurderet at der er potentiale for frysekoncentrering, hvis vandet indeholder frysepunktsnedsænkede materialer.

## Fødevarerprocesser

### Svineslagterier:

300 liter/ton råvarer.

- Danish Crown har to store slagterier i Danmark, hvor der i 2015/16 blev slagtet ca. 13,9 millioner svin.
- Her skal der bruges 60°C varmt vand til skoldning, men der bruges også vand en del andre steder i processen.
- Der udledes en del limvand fra fedtsmelteriet.
- Vurderet at der er et stort potentiale for frysekoncentrering. Kunne starte med limvandsproduktionen.

### Bryggeri:

Carlsberg Fredericia bruger 197.000 m<sup>3</sup>/år til CIP, og den totale mængde spildevand er 862.000 m<sup>3</sup>/år.

- I Danmark er der to mellemstore bryggerier samt otte små og 80 mikrobryggerier.
- Spildevand fra bryggerier er ikke så forurennet, men der er en tildens til, at bryggerierne gerne vil fremstå miljøbevidste.
- De større bryggerier bruger ca. 1-2 liter vand for hver brygget liter øl, mikrobryggerierne bruger 6-20 liter.
- Vurderet at der er potentiale for frysekoncentrering.

### Mejerier:

Thise Mejeri har et vandforbrug på 139.000 m<sup>3</sup>/år, hvoraf 147.000 m<sup>3</sup>/år går i kloakken.

- I en frysekoncentreringsproces kunne fordampere bruges som varmekilde til pasteurisering og isen til køling.
- Der er 90% vand i mælk og 100 millioner kilo indvejet mælk om året på Thise Mejeri.
- Vurderet at der er et stort potentiale for frysekoncentrering.

### Fiskemelsfabrikker:

1 ton fisk frembringer ca. 0,85 m<sup>3</sup> spildevand.  
TripleNine genererer omkring 340.000 m<sup>3</sup> spildevand om året.

- Fiskemelsfabrikker i Danmark har det hårdt for tiden, da der er kommet nye afgifter på energi og spildevand.
- Genbrug af spildevand kan hjælpe med at forbedre økonomien.
- Fiskemelsfabrikker har også en del limvand, som koncentrerer ved hjælp af inddampere, hvor frysekoncentrering kunne bruges i stedet for. Skal dog opvarmes igen før tørring.
- Vurderet at der er potentiale for frysekoncentrering.

## Andre processer

### Sygehuse:

Herlev Hospital 2013, 185.000 m<sup>3</sup>/år.  
Rigshospitalet 2006, 241.317 m<sup>3</sup>/år.

- I Danmark er der 54 sygehuse og 29 plejehjem af forskellige størrelser.
- Krav fra kommunerne om, at sygehuse investerer i udstyr til at rense deres spildevand for medicinrester.
- Besparelsesmuligheder for at genbruge spildevand og mulighed for at skåne miljøet.
- Vurderet at der er potentiale for frysekoncentrering, hvis spildevandet kan indfrys.

### Kraftvarmeværker:

Mellem 7.000-30.000 m<sup>3</sup> spildevand pr. år.

- Vandet bliver brugt til at køle og fjerne partikler fra røggassen.
- Kraftvarmeværker, som producerer mindre en 100 m<sup>3</sup> af vand fra vådskrubning, bortskaffes som farligt affald.
- Vand som bliver afledt til kloak indeholder forskellige miljø- og sundhedsskadelige stoffer, herunder ikke-let nedbrydelige kvælstofforbindelser, samt tungmetaller, PAH'er og klorid.
- Muligt at genbruge vand i køletårn, hvor risiko for forurening kan mindskes.
- Vurderet at der er et stort potentiale for frysekoncentrering, hvis spildevandet kan frysekoncentreres.

### Kommunale renseanlæg:

Forefindes i de fleste kommuner.

- Øge effektiviteten på kommunale renseanlæg.
- Bruge frysekoncentreringsfordamper som varmekilde for varmepumpe og produktion af fjernvarme.
- At producere fjernvarme kan give en bedre økonomi og mindske investeringens tilbagebetalingstid.
- Vurderet at der er et lille potentiale for frysekoncentrering, pga. lave priser på spildevandet. Kunne være fornuftigt i forbindelse med varmepumpe.

### Ballastvand fra skiber:

Ca. 70.000 fartøjer skal installere systemer til en anslået værdi af 200-300 milliarder kroner.

- Afgørende for at forebygge alvorlige økologiske eller sundhedsmæssige konsekvenser.
- Invasive arter spredes primært via ballastvand fra skibe.
- De økonomiske og økologiske omkostninger er enorme, og derfor kræver FN og USA fra 2013, at alle skibe, der benytter ballastvand, anvender et typegodkendt behandlingssystem.
- Der er et stort potentiale mht. forbedring af energi- og behandlingseffektivitet samt måling af behandlingseffekt.
- Vurderet at der er et stort potentiale for frysekoncentrering. Der findes andre konkurrerende løsninger.





## 4.2. Vandproduktion

Rent drikkevand er ikke en selvfølge alle steder. På steder, hvor der er mangel på vand, og der er havvand i nærheden, kan drikkevand laves ud af havvandet. Andre steder, hvor grundvandet er forurenet, er der mulighed for rensning af grundvandet til drikkevarekvalitet.

**Drikkevand fra havvand:** Drikkevand udvindes fra saltholdigt vand.

- Markedspotentiale afhænger af muligheden for et billigere alternativ.
- Grundvandsprisen er 3-10 kr./m<sup>3</sup>, mens afsaltet vandpris er ca. 5 kr./m<sup>3</sup>.
- Vurderet at der er et lille potentiale i Danmark på grund af lav pris på vand, og der er nok af grundvand. Større potentiale for frysekoncentrering andre steder, hvor vandmangel indfinder sig. Bliver et stort problem i fremtiden. Ikke brug for at afkøle vandet efter produktion.

**Forurenet grundvand:** Rent vand fjernes fra forurenet grundvand.

- På steder, hvor det bliver svære at finde rent grundvand, er det nødvendigt at finde en løsning til at rense grundvandet.
- Muligvis et problem, at det ikke indeholder frysensænkende stoffer.
- Vurderet at der er et lille potentiale for frysekoncentrering i Danmark.

## 4.3. Fødevarerindustrien

Den sidste industri, der er set på i denne rapport, er fødevarerindustrien. Her er frysekoncentrering især relevant til fødevarer, der på den ene eller anden måde skal koncentreres og viderefremstilles, eller lagres kolde.

Følgende tabel viser et uddrag fra de forskellige markeder, som er omhandlet i bilag 1.

**Ølkoncentrering:** Bliver ikke brugt så meget i Danmark.

- Mulighed for at styre alkoholindholdet i øl med frysekondensering.
- Det fjernede vand kan genbruges.
- Vurderet at der er et lille potentiale for frysekoncentrering i Danmark.

**Vinkoncentrering:** Bliver ikke brugt så meget i Danmark.

- Frysekoncentrering bruges til at øge alkoholprocenten i en række forskellige vintyper.
- Vurderet at der er et lille potentiale for frysekoncentrering i Danmark.

**Instant kaffe:** Producers ikke i Danmark.

- Alt vand fra kaffekonsentratet skal fjernes.
- Her kunne det være muligt at bruge frysekoncentrering for at opnå koncentrering inden inddampning eller frysetørring for at mindske produktionsomkostningerne.
- Vurderet at der er et lille potentiale for frysekoncentrering i Danmark.

**Juice/frugt/bærkoncentrering:** Særdeles godt, idet smag og ingredienser opretholdes ved frysekoncentrering

- For at transportere kunne vandet fra produktet fjernes, og koncentratet sendes. Vand tilsættes, når koncentratet når frem.
- Dette er velegnet til frysekoncentrering på grund af højt sukkerindhold og bevarelse af smagsstoffer.
- Kan bruges til at lave koncentrat eller som første skridt inden tørring til puré eller ekstrakt.
- Vurderet at der er et stort potentiale for frysekoncentrering af bærsaft i Danmark.

**Valle:** Skal opkoncentreres til 50% ts.  
Valleprotein industrien vokser med 12-14% om året.

- Er et biprodukt fra osteproduktionen.
- Bruges som dyrefoder.
- Muligt at udvinde protein, som f.eks. bruges til at give kager en fin struktur, gøre yoghurt cremet og give modermælkserstatning et højt næringsindhold.
- Muligt at udvinde mælkesukker (laktose), der bruges som ingredienser i bageindustrien.
- Inddampes i dag, hvilket giver problemer med protein kvaliteten og påbrændinger i inddamperen.
- Vurderet at der er et stort potentiale for frysekoncentrering.

**Svinegylle:** 0,87 ton vand fjernes fra hvert tons gylle.  
Svin giver 500 liter gylle om året.

- Kan gøres på gårdene eller ved biogasanlægget.
- Svineproduktion skal op på 400 dyreenheder (DE), før et stationært anlæg er lønsomt.
- Lille potentiale for frysekoncentrering og spørgsmål om pris i forhold til eksisterende metoder, der findes.

**Mælkekoncentrering:** Vandindhold i ostevand er forskelligt, afhængigt af type (ved cheddarost er ca. 37% vand, og hytteost er 80% vand).  
Til at producere mælkepulver koncentreres pasteuriseret mælk til 50% ts, og resten af vandet fjernes i tørretårn.

- Stigende mængder af mælk anvendes til enten mælkepulver/mælkebaserede ingredienser eller til ost.
- I stedet for at foretage koncentreringen på mejeriet kan denne del af processen flyttes ud i producentleddet.
- Vand kan genbruges i fodringen af dyrene og til rengøring.
- Transportudgifter og CO<sub>2</sub>-udledning minimeres.
- Vurderet at der er et rimeligt potentiale for frysekoncentrering.

**Kartoffelmelsproduktion:** Udvinde proteiner ud af frugtsaft, 8.400 ton per måned.

- Protamylase er et biprodukt fra kartoffelmelsproduktion, som er koncentratet fra frugt- vand i inddamper.
- Stivelsen indeholder 38% vand, når det er tørret med luft og skal tørres til 20% vandindhold.
- Vurderet at der er potentiale for frysekoncentrering.

#### 4.4. Konklusion

I gennemgangen af markederne ses det, at der er mange potentielle anvendelsesmuligheder, og at markedssegmentet er stort. For at introducere ny teknologi på et konservativt marked, hvor andre løsninger findes, er det altid svært, selv om teknologien viser betydelig besparelser. For at få fodfæste er bedst at starte med markeder, hvor de traditionelle løsninger ikke kan bruges eller har nogle udfordringer. Som analysen viser, findes der også mange forskellige produkter, hvor frysekoncentrering kan bruges, men det er usikkert, om metoden kan bruges. Det kræver yderligere undersøgelse for at finde ud af, om produktet har frysepunktssænkende materiale, og om det tager skade af behandlingen. Der mangler også at blive undersøgt, hvor meget der kan koncentreres i et trin, og flere praktiske overvejelser før det endelige anlæg kan designes til det specifikke produkt.

I den ovenstående markedsanalyse er produkterne delt op i tre forskellige sektorer: 1-spildevand, 2-vandproduktion og 3-fødevarer. Fødevarer er den sektor, hvor værdien af koncentreringen er højest, og det er derfor antaget, at viljen til investering er størst i denne sektor. Der er derfor i dette projekt valgt at fokusere på og lave økonomiske analyser for tre forskellige fødevarerproduktioner, hhv. juice/bær, limvand og valle produktion. Disse produktstrømme er af høj værdi og er følsomme overfor varme, som kan reducere kvaliteten. Her er den skånsomme frysekoncentrering ved lav temperatur særlig godt egnet.

## 5. Økonomisk analyses

For at vurdere økonomien af frysekonzentrering sammenlignet med de metoder som traditionelt bruges er der foretaget levetidsomkostningsanalyse (Life Cycle Cost Analyse - LCCA). Her er der foretaget en sammenligning af frysekonzentrering med inddampning og membranteknologier. Inddampning er den mest brugte metode, men membran teknologien er også kommet stærkt ind, hvor den kan anvendes på grund af mere energieffektiv drift og billigere anlæg. Undersøgelsen tager udgangspunkt i de tre valgte cases fra markedsanalysen, dvs. opkoncentrering af:

- Bær/juice
- Limvand
- Valle

Bær og juice er slået sammen, fordi den samme proces gælder for begge produkter.

Levetidsanalysen evaluerer den totale investering og tager hensyn til investerings- og driftsomkostninger over anlæggets levetid henført til nutidsværdi.

Investeringsomkostninger består af udgifterne til teknologien, implementering og ingeniørmæssige omkostninger. Priserne er hentet fra sælgerne og investorerne af de pågældende teknologier. Investeringsomkostninger er afhængig af kapaciteten på produktionsenheden. I nogle tilfælde er det nødvendigt at skalere investeringsomkostningerne for at opfylde kapacitetsbegrænsninger for produktionen. Skaleringspriser baseret på kapacitet kan indebære usikkerheder, men er brugt for enkelthedens skyld.

Produktionsomkostninger omfatter el- og brændstofforbrug samt vedligeholdelsesomkostningerne. Tommelfingerregler og data fra allerede installeret systemer anvendes til at evaluere brændstofs- og elforbrug. Vedligeholdelsesomkostninger er vurderet som en procentvis årlig andel af investeringsomkostningerne.

Værdier, som nedlukningstid på grund af vedligeholdelse, ignoreres for at forenkle beregningerne, da det kan variere baseret på funktionsfejl og involverer mange usikkerheder.

Nutidsværdi (NPV), enkel tilbagebetalingsperiode og mere kompleks tilbagebetalingsperiode (SPBP & PBP) kan evalueres ud fra resultaterne fra LCCA. Disse værdier kan variere baseret på, hvordan investeringerne finansieres. Nutidsværdien beregnes som følgende fra (11):

$$NPV = \sum_t \frac{C_t}{(1+r)^t} - C_0$$

Hvor  $t$  er nummeret af perioder,  $C_t$  er netto pengestrømmen henover perioden  $t$ ,  $C_0$  er initialinvesteringsomkostningerne, og  $r$  er renten.

Tilbagebetalingsperiode PBP er beregnet ud fra følgende formel fra (11):

$$PBP = \frac{C_0}{C_t}$$

## 5.1. Undersøgte anlægsløsninger

Dette afsnit beskriver de anlægsløsninger, som er brugt i den økonomiske LCCA analyse udført i projektet. Følgende anlægsløsninger er sammenlignet:

- **Frysekoncentrering**
- **Tretrins inddamper (TE)**
- **Membran** (kun hvis produktet ikke skal koncentreres højre end 30% ts.)

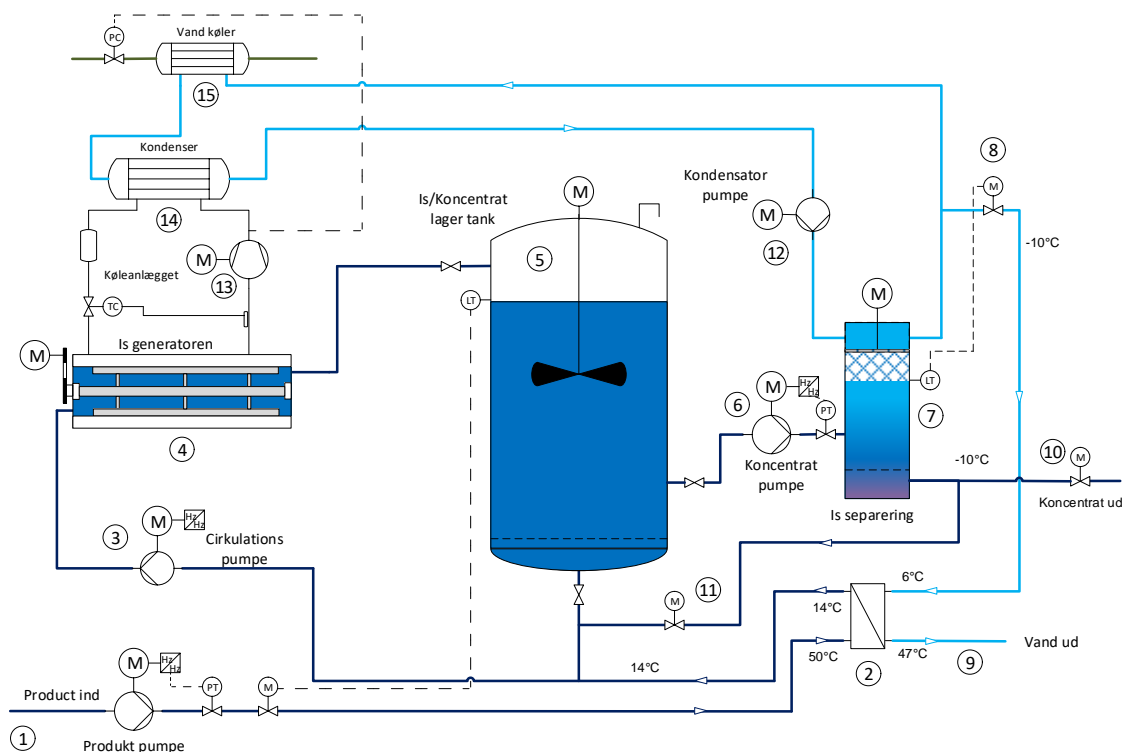
### 5.1.1. Frysekoncentrering

For frysekoncentrering er der undersøgt to typer af anlæg. Det ene med konventionelle skrabevarmevekslere til at fryse iskrystallerne i produktet og den anden, hvor der bruges en metode under udvikling, kaldet vakuum teknologi.

Disse løsninger til frysekoncentrering er sammenlignet ved hjælp af LCCA analyse med tretrins inddamper, betegnet som TE, og membran løsninger.

#### 5.1.1.1. Skrabevarmevekslere

For skrabevarmevekslere til isproduktionen findes der i dag allerede en del udstyr på markedet, som bruges en del til at nedkøle fisk og kød. Issepareringen, hvor isen er separeret fra koncentratet, er dog stadigvæk på udviklingsstadiet. Principskitse af udstyret kan ses i figur 22 og er nærmere beskrevet under afsnit 3.1.



Figur 20: Frysekoncentreringsanlæg med skrabevarmeveksler og varmegenvinding

Systemet, som vises i figur 22, er med varmegenvinding. Det vil sige, at det varme indkommende produkt er afkølet af det kolde smeltevand fra isseparatoren, før det ledes ud af processen. For produkter med høje temperaturer på produktet ind giver det en forbedret økonomi. I efterfølgende LCCA analyse er anlæg både med og uden varmegenvinding beregnet. Anlæg uden varmegenvinding betegnes i det efterfølgende med "Skrabe" og anlæg med varmegenvinding betegnes med "Skrabe – VG".

Fordelene ved disse anlæg er, at de er skånsomme overfor produkter, som ikke tåler høje temperaturer, f.eks. proteiner, alkoholer og let fordampende stoffer. Produkter, som skal afkøles inden lagerføring, er afkølet i forvejen og kan køres direkte ind på lager til opbevaring. De behøver derved ikke nedkøling efter koncentreringen som ved inddamperteknologier, som er med til at øge den samlede energieffektivitet. Den effekt er dog ikke taget med i denne undersøgelse.

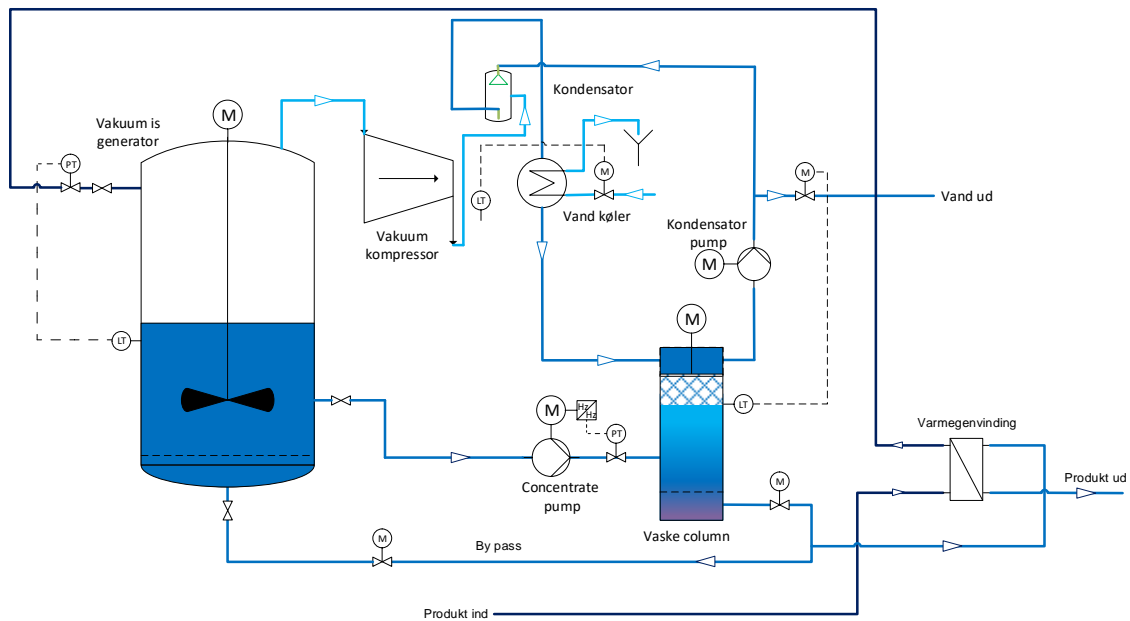
Ulempen ved anlæggene er, at de i mange tilfælde ikke kan koncentrere så langt op, som inddampere kan i et trin. For varme produkter, som skal viderebehandles i opvarmet tilstand, f.eks. efterfølgende tørreproces til pulver, skal frysekoncentrering først nedkøle produktstrømmen og indfryse for derefter at opvarme produkterne inden videre tørring. Denne afkøling og opvarmning koster ekstra energi i forhold til den direkte inddampningsproces og skal undersøges i hvert enkelt tilfælde. Denne metode begrænses til, at blandingen af is og produkt skal kunne pumpes igennem isgeneratorerne, som begrænser, hvor meget der kan koncentreres i et trin. Den maksimale iskoncentration for at sikre stabil drift på de på markedet tilgængelige isgeneratorer er 40%. Sammenhængen imellem fjernet is og opkoncentrationen af tørstof er:

$$\frac{\%_{is}}{100} = 1 - \frac{TS_{ind}}{TS_{ud}}$$

Det betyder, at for de 40% isproduktion, som kan laves i isgeneratoren og fjernes som vand ud af produktet, kan indholdet af tørstof øges til det, som svarer til 60%. Ved højere opkoncentreringer skal isen fjernes og koncentratet igennem isgeneratoren igen.

### 5.1.1.2. Vakuum

Vakuumstyr til isproduktionen er stadigvæk under udvikling. Udstyret bruger vakuumenteknologi, hvor isen dannes ved et undertryk uden brug af varmevekslere. Denne løsning er vist i figur 23 med varmegenvinding. Løsningen er i efterfølgende LCCA analyse betegnet som "Vakuum", hvis den er uden varmegenvinding, og "Vakuum – VG", hvis den bruger varmegenvinding.



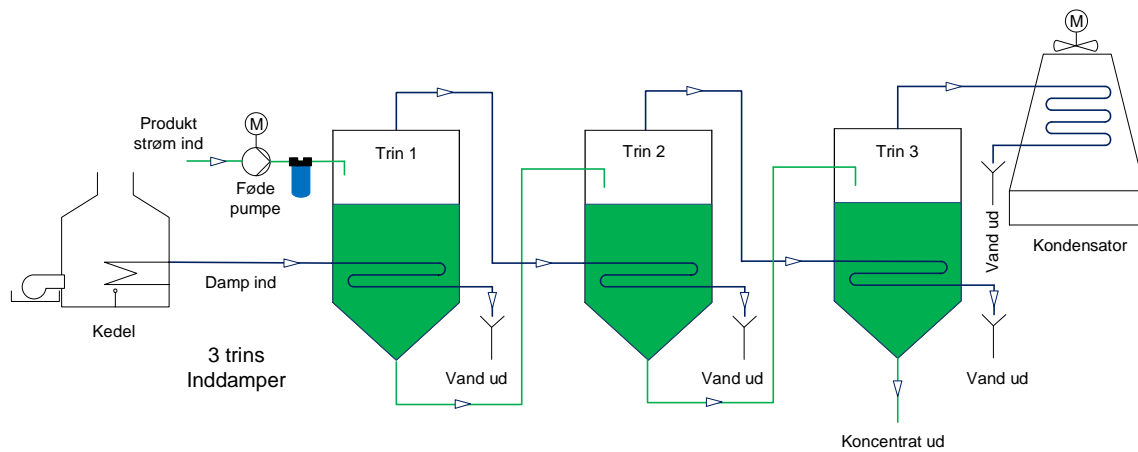
**Figur 21: Vakuumis frysekoncentreringsanlæg**

Fordelen ved denne løsning frem for frysekoncentrering med skrabevarmevekslere er, at der ikke sidder varmevekslere mellem produktet, som skal indfryses, og kølemidlet, som derved giver mere energieffektiv drift. Maksimum iskoncentration på de anlæg, som er under test, har vist sig at være 15% på grund af isseparation inde i vakuumbeholderen, hvilket vanskeliggør fjernelsen af isen ud af udstyret.

### 5.1.2. Tretrins inddamper (TE)

Inddampning er en meget anvendt metode til koncentrering af produktstrømme, og der bruges ofte éttrins op til syvtrins anlæg. Det afhænger af starttrykket på den damp, der bruges til at koge produktet med. Dette tryk er så i efterfølgende trin sænket, så kogningen kan foregå på forskellige temperaturer i det efterfølgende trin. Det blev valgt at undersøge en tretrins inddamper i det efterfølgende, da den antages for at præsentere det udstyr, som har den bedst økonomi af dem, som normalt bruges. Der bruges ofte éttrins inddampere, som har en betydeligere dårligere økonomi i forhold til inddamperen med tre trin.



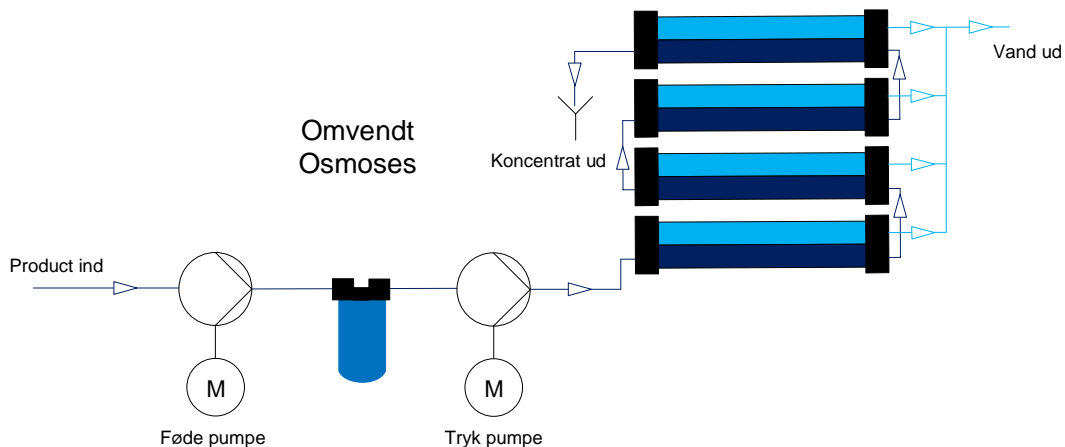


**Figur 22: Tretrins "forward" fødet inddamper**

Maksimum koncentration af tørstof på de anlæg, som findes i handelen, har vist sig at være 40-60% TS på grund af pumpbarheden. Det er dog andre faktorer, der spiller ind. Disse afhænger af de produktstrømme, som skal koncentreres, f.eks. om produktet brænder på, om varmetransmissionen bliver for dårlig ved højere koncentrationer, og om kvaliteten på produktet bliver for dårlig.

### 5.1.3. Membran

I de tilfælde, hvor det er muligt at bruge membranteknologier, er disse sammenlignet, og et omvendt osmose RO anlæg, som vist i figur 25, er brugt til sammenligningen.



**Figur 23: Omvendt osmose proces**

Disse anlæg er dog begrænset i graden af koncentration og er meget afhængige af produktet, som skal koncentreres. Hvis der er meget tørstof i produktet, så kan det sætte sig i filtrene, hvilket nedsætter deres udskilning og øger deres energiforbrug. Det kræver hyppig rensning og filterskift, som er dyr og nedsætter produktiviteten. Maksimum koncentration af tørstof på de anlæg, som findes i handelen, har vist sig at være 30%.

## 5.2. Anvendte investerings- og driftsomkostninger

I dette afsnit gøres der rede for de brugte investerings- og driftsomkostninger for de anlægs løsninger, som er nævnt under afsnit 5.1 for koncentrering af følgende produktstrømme:

- Bær/juice
- Limvand
- Valle

### 5.2.1. Generelt for alle processer

For at sammenligne de forskellige løsninger med hinanden er forudsætningerne ens for dem alle. Forudsætningerne er følgende:

- Produktion tid
  - Timer 17,5 h/dage
  - Dage 320 dage/år
  - Udstyrets levetid 15 år
- Økonomi
  - Rentesats 4 %
  - Energi- og vedligeholdstigning per år 3%
  - Øvrig investering (% af investeringsomk.) 20 %
  - Vandkøb og særbidrag 28 DKK/m<sup>3</sup> vand
- Energipriser
  - El 0,73 DKK/kWh
  - Naturgas 0,43 DKK/kWh

### 5.2.2. Skrabevarmeveksling

Investeringsomkostningerne er baseret på priser oplyst af en af projektpartnerne (Dynamic Energy Design), som laver udstyr, der bygger på skrabevarmevekslere til frysekoncentreringsformål. Priserne er normeret til kW-køl, hvilket betyder, at køleeffekten, som den isproducerende enheden har, kan derved bruges til at skalere udstyret til forskellige kapaciteter.

- Investeringsomkostninger
  - Ismaskine 18.750 DKK/kW-køl
  - Isseparator 5.625 DKK/kW-køl
  - Islager (tanke) 3.750 DKK/kW-køl
  - **Total** **28.125 DKK/kW-køl**
- Faste driftsomkostninger
  - Vedligeholdelse 20 DKK/MWh

I modellen, som blev opstillet for at beregne driftsomkostningerne, er følgende driftsparametre brugt:

- Driftsparameter
  - Skrabe temp. forskel generator 18°C
  - Kondenseringstemp. kølemaskine 15°C
  - Afkøling på vand i kondenser 5°C
  - Forkøleunit COP 6

Skrabe temperaturforskel er forskellen imellem produktets frysepunkt og sugetemperaturen for kølemaskinen, f.eks. hvis frysepunktet er 0°C regnes der med en sugetemperatur på -18°C for kølemaskinen.

### 5.2.3. Vakuum

Priserne på udstyr til vakuum indfrysningsteknikken er lavet ud fra værdier fra et forsøgsanlæg bygget ved Teknologisk Institut, som siden er korrigeret for at tilpasse anlæg i virkeligheden. Disse tal er derfor noget usikre. For isseparator og islagertank er der brugt de samme priser som for skrabevarmeveksler. Udstyret til isseparatoring er det samme, uanset om isen er lavet med skrabevarmevekslere eller vakuumteknologien.

- Investeringsomkostninger
  - Ismaskine 5.000 DKK/kW-køl
  - Isseparator 5.262 DKK/kW-køl
  - Islager 3.750 DKK/kW-køl
  - **Total** **14.375 DKK/kW-køl**
- Faste driftsomkostninger
  - Vedligeholdelse 20 DKK/MWh

I modellen, som blev opstillet for at beregne driftsomkostningerne, er følgende driftsparametre brugt:

- Driftsparameter
  - Kondenseringstemperatur kølemaskine 5°C
  - Kølekompresorens virkningsgrad 75%
  - Forkøleunit COP 6

Fordi vakuumteknologien bruger direkte varmeveksling uden varmevekslere, bliver kølemaskinens sugetemperatur den samme som produktets frysepunkt. Der er regnet med brugen af indirekte varmeveksler til at kondensere vanddampen i analysen men det ville forbedre energioekonomien yderligere at bruge direkte varmeveksling.

### 5.2.4. Tretrins inddamper

De priser, der specifikt er brugt til inddamper beregningerne, kommer fra beregninger fra producenter af inddamperudstyr i henhold til bærproduktstrømmen. Disse informationer er brugt til at beregne nøgletal baseret på udskilt vandmængde i processen. De beregnede investerings- og driftsdata er følgende:

- Investeringsomkostning
  - Pris per kg udskyllet vand 2667 DKK/vand fjernet
- Driftsomkostninger
  - Vedligeholdelse per MWh brugt energi 10 DKK/MWh

Vedligeholdelsesomkostninger for inddamperen er antaget at være det halve af udstyret til frysekoncentrering på grund af færre bevægelige dele og enklere udstyr.

### 5.2.5. Membran

Oplysninger om membranprocessen bygger på udtalelser fra en producent af membransystemer og tager udgangspunkt i anlæg til limvandsopkoncentrering. Anlægget kører med høj råvare indløbstemperatur, som ikke er generelt for membran separationsprocesser, hvilket har indflydelse på holdbarheden for filtrene. Den af de valgte produktstrømme, hvor der er sammenlignet med frysekoncentrering med membraner, var for limvand og valle.

- Investeringsomkostning
  - Pris per kg udskyllet vand 882 DKK/vand fjernet
- Driftsomkostninger
  - Vedligeholdelse per MWh brugt energi 260 DKK/MWh
  - El normal drift 15 kW/m<sup>3</sup>
  - El ved CIP 9 kW/m<sup>3</sup>
  - CIP frekvens 2 CIP/dag
  - CIP tid 1,5 t/dag
  - CIP kemikalier 1750 DKK/CIP
  - Vandforbrug ved CIP 10,7 m<sup>3</sup>/t
  - Filteromkostning per liter fjernet vand 6 DKK/ m<sup>3</sup>

### 5.3. Bær/juicekoncentrering

En af de analyserede produktstrømme er koncentrering af bærsaft, som ligner meget koncentrering af juice. I den anledning har projektgruppen fået driftsdata fra et firma, som specialiserer sig indenfor koncentrering af bær og hyldeblomst.

Saften fra de pressede bær er skilt fra og derefter koncentreret ved brug af en tretrins inddamper. Koncentratet kan bruges til produktion af saft, is, syltetøj m.m. Frysepunktet i frugtsaft afhænger af sukkerindholdet i råvaren, som er højt. Ved indfrysningen sænkes frysepunktet, eftersom isen dannes på grund af øget sukkerindehold i det resterende flydende koncentrat.

Efter koncentrering er koncentratet nedkølet og kørt på lager for at blive indfrosset. Her kunne der spares en del energi ved frysekoncentrering, da produktet kommer på frysepunktet fra processen. Denne fordel er dog ikke taget med i analysen.

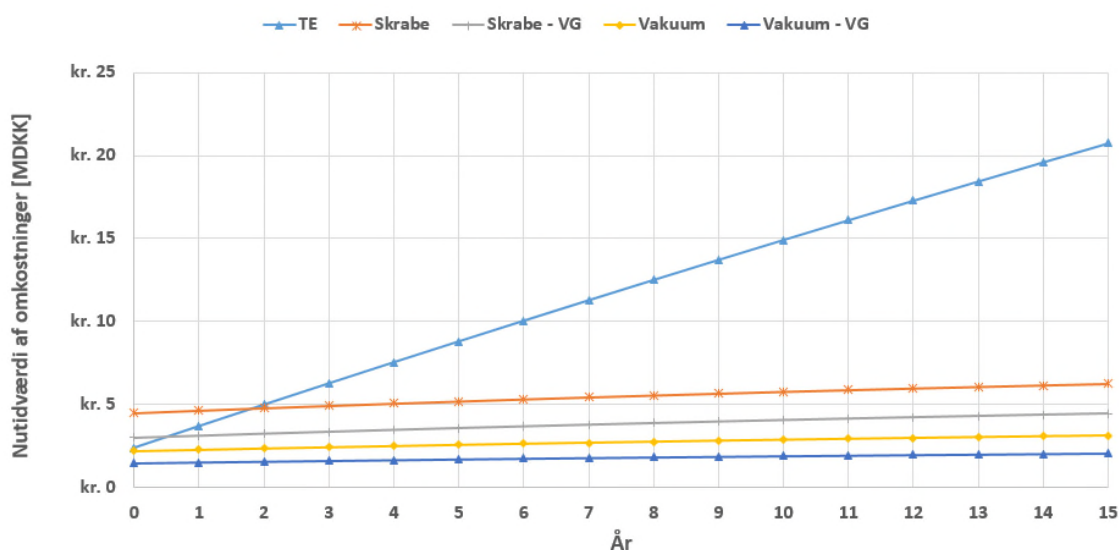
Ved inddampning damper også noget af aromaerne ud af koncentratet, som så genvindes i et anlæg og tilføres koncentratet igen. Det må antages, at dette genvindingsanlæg har noget tab, som fører til, at nogle af smagsstofferne går tabt. Ved frysekoncentrering er der ikke brug for denne genvinding, hvilket gør den totale anlægsløsning billigere. Herudover opbevares smagsstofferne fuldt i koncentratet. I analysen er der dog ikke taget hensyn til prisen for genanvindingsanlægget i vurderingen af inddamperløsningen.

Det er valgt at tage udgangspunkt i et produkt med følgende egenskaber:

- Produkt ind til koncentrering 8% TS
- Koncentrat ud af proces 65% TS
- Produktstrøm ind 850 kg/t
- Koncentratstrøm ud 105 kg/t
- Råvare indløbstemperatur 50°C
- Frysepunkt -10°C

For at sammenligne anlæggene er nutidsværdien af de omkostninger, som løber på i anlæggets driftstid, vist i grafen i figur 26. Her er tretrins inddamper (TE) sammenlignet med frysekoncentrering. Der er vist fire kurver for frysekoncentrering, som henviser til forskellige anlægsløsninger. To af disse er for anlæg med skrabevarmevekslere med og uden varmegenvinding og de andre to er for vakuumanlæg med og uden varmegenvinding.

Af diagrammet kan det ses, at i indkøb er tretrins inddampersystemet (TE) billigere end skrabevarmevekslersystemet både med og uden varmegenvinding. Tilbagebetalingstiden for den merinvestering ved køb af skrabevarmevekslersystemet er hhv. 0.5 og 1.8 år for med varmegenvinding og uden. Produktet kommer varmt ind til koncentrering, og det er derfor meget fornuftigt at benytte varmegenvinding. Som det ses af grafen, så bliver prisen for anlægget med den samme kapacitet lavere for løsningen med varmegenvinding, idet det er billigere at fjerne varmen med varmeveksler i stedet for køleudstyr. Det vil derfor i dette tilfælde ikke give mening at købe en løsning uden varmegenvinding, og tilbagebetalingstiden for skrabe varmevekslersystemet bliver derfor 0.5 år.

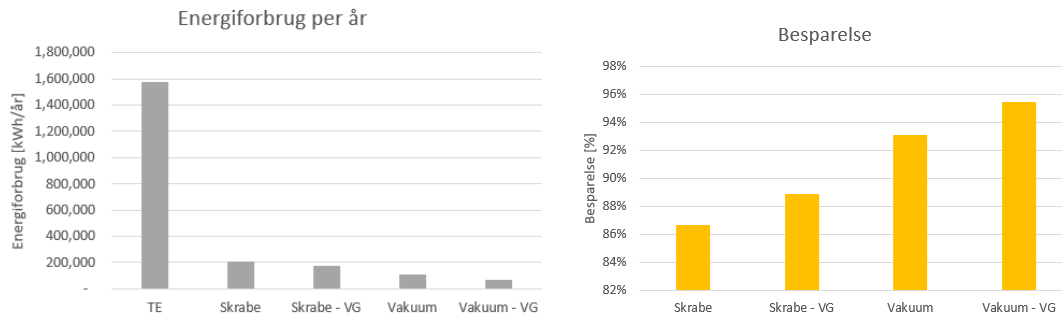


Figur 36: LCCA analyse for koncentrering af bærsaft

Vakuumsystemet antages at være billigere end TE i indkøb og har også en del lavere driftsomkostninger. Det skal dog bemærkes, at priserne for udstyret bygger på et meget løst grundlag, idet den er under udvikling.

Grafen kan også bruges til at finde ud af den pris, som frysekoncentreringsudstyret kunne koste i tilfælde af en antaget tilbagebetalingstid. Hvis man antager en tilbagebetalingstid på fem år og ved forskydning af kurverne for frysekoncentrering indtil de skærer TE ved fem år, viser det, at anlægget kunne koste omkring 7 millioner kroner.

En stejlere stigningen på kurven for TE sammenlignet med de andre løsninger skyldes primært højere omkostninger til energi. TE er antaget at bruge naturgas til fremstilling af damp til brug til inddampning, hvor frysekoncentreringen bruger el.



Figur 24: Energiforbrug og besparelse

Figur 27 viser det årlige energiforbrug til venstre og besparelsen i forhold til inddampning til højre. Grafen viser en betydelig besparelse. For skrabevarmevekslersystemet med varmegenvinding spares 89% og ved vakuumsystem med varmegenvinding ligger besparelsen på 95%. Det er en del over det, som man umiddelbart kunne forvente på grund af forskellen mellem fordampnings- og indfrysningsenergiene. For at inddampe et kilo vand kræves omkring 2100 KJ og for at indfryse et kilo vand til is kræves 330 KJ, som giver en besparelse på 85%. Årsagen til en yderligere besparelse er køleudstyret, som kun skal bruge en brøkdel af køleenergien til el. Denne brøkdel er defineret ved COP for køleudstyret.

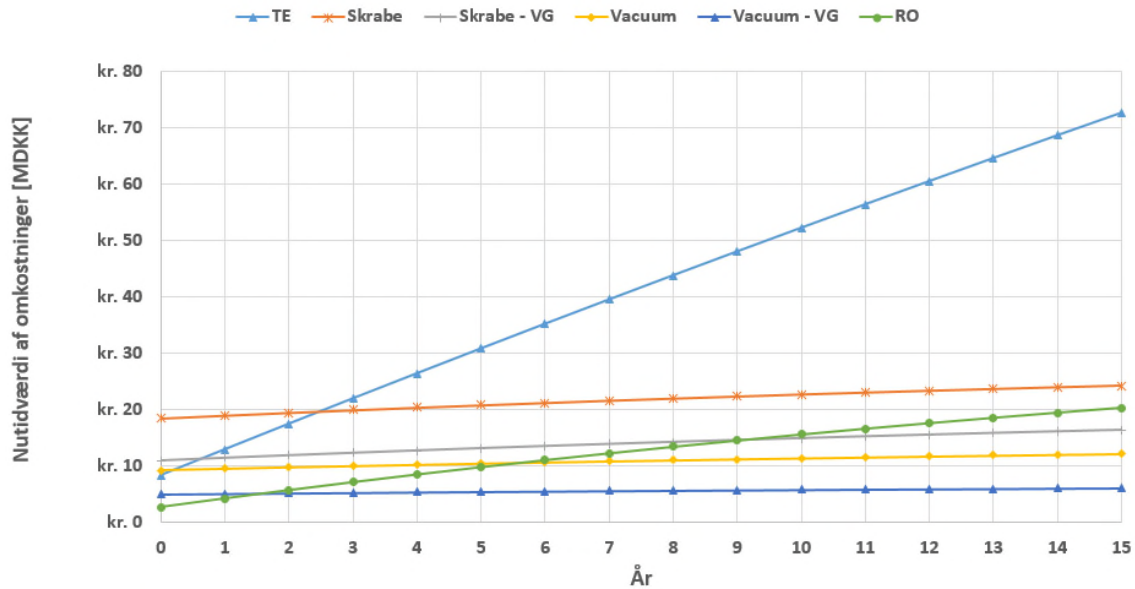
## 5.4. Limvand

Limvand er et restprodukt i forskellige biprodukter fra fødevarerproduktion og stammer fra den proces, hvor fedtprodukter/oilier, tørstof og limvand er separeret fra hinanden. Det stammer blandt andet fra rester af eksempelvis svinekød, som er kogt i fedtsmelteri for at smelte fedtet, og derefter er det resterende tørstof, fedt og limvand adskilt i en centrifuger. I forbindelse med fiskemelsproduktion kommer limvandet eksempelvis fra centrifugerne, som udskiller olien af kogesuppen, efter at dekanterudskillere har fjernet tørstoffet. Limvandet er, som navnet antyder, meget klistret og vanskeligt at håndtere. Det indeholder protein, som skal koncentreres ved at fjerne en del af vandet. Vandet kan derefter udledes i kloak som rent vand eller genbruges.

LCCA analysen i projektet er lavet for limvand fra svinekødsproduktion. Limvandet indeholder typisk 7-10% proteiner, som koncentreres og derefter kan bruges til at lave blandt andet dyrefoder og som materiale til biogasanlæg.

Data for limvandsproduktionen er følgende:

- Limvand ind til koncentrering 3% TS
- Limvand ud af koncentrering 23% TS
- Limvandsmængde 52,5 ton/dag
- Fjernet vand 45,7 ton/dag
- Antager frysepunkt -2°C
- Limvandstemperatur ind 80°C



Figur 28: LCCA analyse for koncentrering af limvand

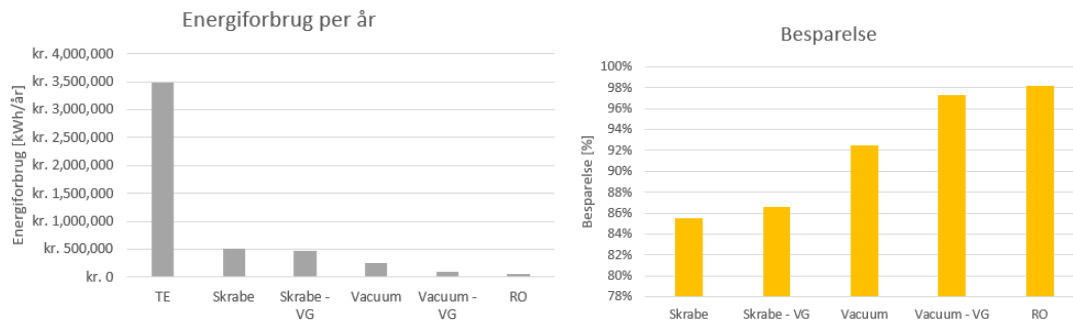
For at sammenligne anlæggene er der, som ved koncentrering af bær, kigget på nutidsværdien af de omkostninger, som løber på i anlæggets levetid. Disse er vist i grafen i figur 28. TE er her sammenlignet med frysekoncentrering og omvendt osmoses (RO). På grund af lav koncentrering, fra 3% til 23% tørstof, så kan membraner også bruges, og de er derfor taget med i sammenligningen.

I forhold til bærekoncentrationen er der her større afstand imellem med og uden varmegenvinding, hvilket skyldes høje temperaturer på limvandet ind. Frysekoncentreringsanlæg med varmegenvinding er også billigere i indkøb, og det giver derfor ikke mening at bruge anlæg uden varmegenvinding.

På grafen kan det ses, at meromkostningen ved skrabevarmevekslersystemet med varmegenvinding i forhold til TE er tjent hjem på ca. syv måneder. RO anlægget er billigere i indkøb, men bruger mere strøm, og i forhold til skrabevarmevekslersystemet med varmegenvinding er tilbagebetalingstiden omkring ni år.

For frysekoncentrering med vakuumsystemet er tilbagebetalingstiden i forhold til TE ca. to måneder og i forhold til RO 1.5 år.

Figur 29 viser det årlige energiforbrug til venstre og besparelsen i forhold til inddampning til højre. Grafen viser en betydelig besparelse. For skrabevarmevekslersystem med varmegenvinding spares der 87% og ved vakuumsystem med varmegenvinding er besparelsen 97%.



Figur 25: Energiforbrug og besparelse

## 5.5. Valle

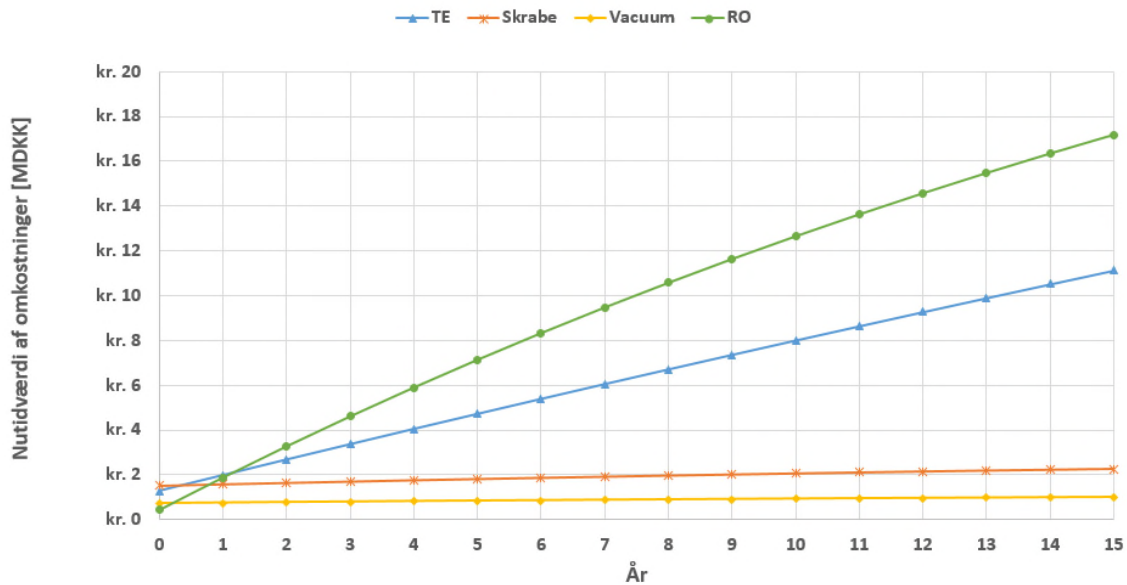
Valle er et biprodukt fra osteproduktionen. I dag bruges vollen blandt andet til dyrefoder, og der udvindes også proteiner fra vollen, som forædles til forskellige ingredienser, der eksempelvis kan give kager en fin struktur, gøre yoghurt cremet og give modermælkserstatning et højt næringsindhold. Vollen indeholder mælkesukker (laktose), som tørres og sælges som ingredienser til blandt andet bageindustrien.

I denne analyse er produktet allerede koncentreret til 30% tørstof (TS) i en membranproces. Frysepunktet i vollen afhænger af råvarens sukkerindhold. Procesanlæggets vigtigste parameter er:

- Valle ind til koncentrering 30% ts
- Valle ud fra koncentrering 60% ts
- Vallemængde 14 ton/dag
- Fjernet vand 7 ton/dag
- Antaget frysepunkt -2°C
- Valle temperatur ind 5°C

Som før er sammenligningen lavet ved at sammenligne nutidsværdien af omkostningerne ved forskellige metoder til koncentrering. Frysekoncentreringsmetoderne med varmegenvinding er ikke taget med her, fordi temperaturen på vollen ind er lav, så varmegenvinding giver ikke nogen fordel. Første skridt i koncentreringen er lavet med RO, og det er her antaget, at et andet RO anlæg viderefører koncentreringen fra første trin.



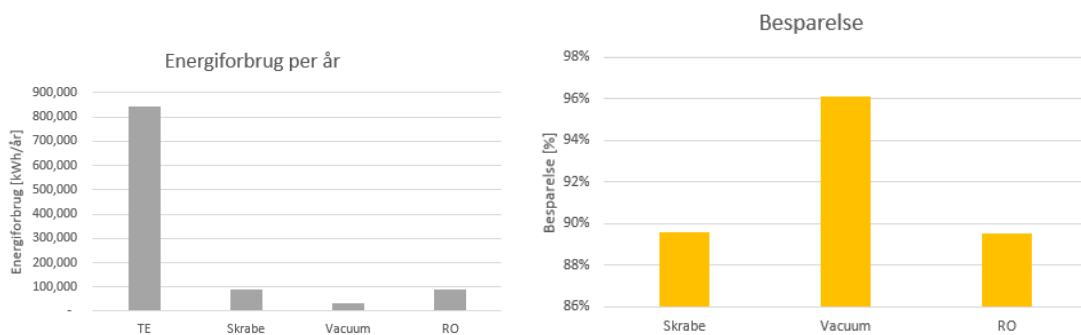


Figur 30: LCCA analyse for opkoncentring af valle

Som det kan ses af figur 30, så koster RO anlægget mindst i indkøb, men har de højeste driftsomkostninger. Det er på grund af mange filterskift, som har vist sig at være nødvendige ud fra udførte test, når koncentrationen kommer højere op. Skrabevarmevekslersystemet er lidt dyrere end TE, men de ekstra omkostninger er betalt efter omkring tre måneder.

Grafen viser tydeligt, hvor stor indflydelse driftsomkostninger har på økonomien i den valgte løsning. Eksempelvis RO, som er billigst i indkøb, viser sig alligevel at være et dårligt valg.

Energibesparelsen i forhold til TE er vist i figur 31. Her kan det ses, at besparelsen er 89.5% for skrabevarmevekslersystemet og 96% for vakuumløsningen. RO viser sig at spare lige så meget som skrabevarmevekslersystemet. Det er her anderledes end for limvand, hvilket skyldes det forholdsvis høje energiforbrug ved rensning af filtrene.



Figur 26: Energiforbrug og besparelse

## 6. Konklusion

For at koncentrere produktstrømme bruges mest en energikrævende inddampning. Denne metode er industrien vant til at bruge og har meget erfaring med i forbindelse med forskellige produktstrømme. Industrien er meget konservative, og der skal meget til for at ændre de produktionsmetoder, som er blevet brugt indtil nu.

Der findes en del metoder til at lave iskrystaller i en produktstrøm. Nogle af dem er kommercialiserede (skrabeismaskiner), men de er mest brugt til andre formål end frysekoncentrering.

En alternative fremstillingsmetode, som fryser isen ind under vakuum og uden varmevekslere, er under udvikling. Ved vakuumteknologien flyttes der store volumener på grund af lav tæthed på vanddampen, som medfører et stort udstyr. Denne metode er derfor forholdsvis dyr for små produktmængder, hvor skrabevarmevekslersystemer er bedre egnede.

Der findes meget få kommercielle produkter til isseparering. Det meste af det beskrevne udstyr er på forsøgsstadiet. Issepareringen er en vigtig del af frysekoncentreringen, og det er vigtigt at mindske produkttabet ud med isen og derved renheden af det vand, der udskilles.

Markeder for frysekoncentrering er mange og kan opdeles i tre kategorier. Spildevand, hvor formålet er at koncentrere affaldsstofferne, og udskylning af vand, som kan bruges igen eller ledes til kloak uden ekstra afgifter. Vandproduktion, hvor formålet er at fremstille vand ud af eksempelvis havvand eller spildestrømme for at genvinde vand på steder, hvor vand er en mangelvare. Fødevarerproduktion, hvor produkter udvindes ved at fjerne vandet og derved koncentrere det resterende produkt.

Industrielle virksomheder er meget konservative, og det er svært at få dem til at ændre deres produktionsmetoder. For at implementere teknologien er det derfor vigtigt at starte med produkter, som udover energibesparelsen, også får betydelige andre fordele ved brug af frysekoncentrering i forhold til inddampning eller membranteknologierne. Af de mange undersøgte markeder er der valgt tre for den økonomiske analyse.

Bærkoncentrering er et område, hvor det er vigtigt med skånsom koncentrering for at bibeholde smagsstofferne og produktets struktur. På området er der mange producenter, som laver højværdi specialprodukter, som bygger på økologi og bæredygtighed. Energiefektiv frysekoncentrering kunne her være en del af deres image.

Limvand er et biprodukt fra mange fødevarerproduktioner. Det indeholder meget protein og kan bruges til eksempelvis dyrefoder. Det er et produkt, som er meget vanskeligt at behandle, hvor proteinerne brænder fast på inddamperoverfladen og tilstopper filtrene i membransystemerne. Her kunne frysekoncentrering bruges som skånsom metode overfor proteinerne.

Valle er et proteinrigt biprodukt fra osteproduktion hos mejerierne. Her kunne den skånsomme frysekoncentrering bruges på samme måde som for limvand.

Der er lavet et økonomisk eksempel med bærkoncentrering, hvor frysekoncentrering ved hjælp af skrabevarmevekslersystem og vakuumsystem til isgenerering er sammenlignet

med en tretrins inddamper. På grund af den høje temperatur på produktet er frysekoncentrering med intern varmegenvinding meget fornuftig. Tilbagebetalingstiden for merinvesteringen ved køb af skrabevarmevekslersystemet i forhold til en tretrins inddamper er 0.5 år. Vakuumsystemet er billigere i indkøb og har som skrabevarmevekslersystemet lavere driftsomkostninger. Energibesparelsen for skrabevarmevekslersystemet med varmegenvinding i forhold til en tretrins inddamper er 89% og ved vakuumsystemet med varmegenvinding ligger den på 95%.

For limvand blev der udover inddampning også sammenlignet med membraner. I tilfælde, hvor temperaturen på produktet ind til koncentrering er høj, er det, ligesom ved bærekoncentrering, fornuftigt af bruge intern varmegenvinding ved frysekoncentrering. Den meromkostning, der er ved skrabevarmevekslersystemet med varmegenvinding i forhold til tretrins inddampning, er sparet på ca. syv måneder i lavere driftsomkostninger. Omvendt osmoseanlægget er billigere i indkøb, men bruger mere strøm og i forhold til skrabevarmevekslersystemet med varmegenvinding er tilbagebetalingstiden her omkring ni år. For frysekoncentrering med vakuumsystemet er tilbagebetalingstiden i forhold til tretrins inddampning ca. to måneder og i forhold til omvendt osmose 1,5 år. Energibesparelsen for skrabevarmevekslersystemet med varmegenvinding er 87%, og ved vakuumsystem med varmegenvinding er den 97% i forhold til tretrins inddampning.

For valle var frysekoncentrering sammenlignet med en tretrins inddamper og membran-teknologier. Omvendt osmoseanlægget koster mindst i indkøb, men har de højeste driftsomkostninger. Dette skyldes mange filterskift, som har vist sig at være nødvendige. Skrabevarmevekslersystemet er lidt dyrere end en tretrins inddamper, og ekstra omkostningerne er betalt efter ca. tre måneder. Analysen viser tydeligt, hvor stor indflydelse driftsomkostninger har på valget af den rigtige løsning. Omvendt osmose, som er billigst i indkøb, viser sig i den sidste ende at være et dårligt valg. Energibesparelsen i forhold til en tretrins inddamper viser sig at være 89.5% for skrabevarmevekslersystemet og 96% for vakuumløsningen. Omvendt osmose viser sig at spare lige så meget som skrabevarmevekslersystemet. Dette er forskelligt fra limvand, hvilket skyldes det forholdsvis høje energiforbrug ved rensning af filtrene.

I gennem projektet er det vist, at frysekoncentrering har et stort potentiale som metode til koncentrering. For at realisere dette potentiale er der brug for videre undersøgelser af vakuumsystemet for større produktstrømme. Endvidere er der brug for at finde ud af produkttabet, som skyldes indfrosset produkt i iskrystallen ved forskellige indfrysningstemperaturer.

Issepareringen er også et område, som skal udforskes for at analysere, hvilken metode der passer bedst til de forskellige produkter for at minimere produkttabet.

## 7. Referencer

1. Fellows, P.J. *Food processing technology*. Cambridge: Woodhead Publishing, 1997.
2. www.EngineeringToolBox.com. [http://www.engineeringtoolbox.com/calcium-chloride-water-d\\_1186.html](http://www.engineeringtoolbox.com/calcium-chloride-water-d_1186.html).
3. Kristofersson, J. *Personlige erfaringer*.
4. A. Adeniyi, J.P. Maree, R.K. Mbaya, A.P. Popoola, T Mtombeni, C.M. Zvinowanda. *HybridICE filter: ice separation in freeze desalination of mine waste waters*. Pretoria, South-Africa : Water Sci Technol, 2014.
5. *SlurryICE - Thermal Energy Storage - Design Guide*.
6. *Engineering for pure water Part 2: Freezing*. PTL, Brian. 90, s.l.: Mechanical Engineering, 1968.
7. Viglundsson, Thorsteinn Ingi. *Production and use of dewatered ice-slurry*. 2016/006004 A1 Island, 14 Januar 01 2016. Proces teknologi.
8. Research, Foundation for water. *Desalination for Water Supply*. Marlow: Foundation for water Research, 2015.
9. Steffen Damgaard Nielsen, Uffe Lineberg Gangelhof, Grathe Jensen, Martin Elmegaard Mortensen. *Kortlægning af virksomhedernes incitament for at håndtere spildevandsrensninger decentralt*. Glostrup: Grontmij, 2014.
10. Erhvervspotentiale, Forsyningssektorens. *Rapport udarbejdet af Copenhagen*. København: Copenhagen Economics for Axcelfuture , 2015.
11. Adrian Bejan, George Tsatsaronis, Michael Moran. *Thermal design & optimization*. s.l.: Wiley, 1996.
12. Intekkigence, Acmite market. *Global Membrane Technology Market*. s.l.: Acmite market intekkigence, 2015.
13. SlurryICE. *Slurry-ice based cooling systems application guide*. s.l.: EPS.
14. Adeniyi, Amos. *Evaluation of operating parameters and process analysis for the hybrideice filter in freeze desalination of mine waters*. s.l.: Tshwane University of Technology, 2014.