



Elektrificering af Fødevareindustrien

Teknologiske muligheder
og udfordringer



Februar 2021

Rapport
2021

Af

Maria Mondejar Montagud, Brian Elmegaard og Jonas Kjær Jensen (DTU Mekanik)

Maria E. Mondejar Montagud afgang ved døden 14. februar 2021. Efter de øvrige forfatteres opfattelse har Maria bidraget til rapportens tilblivelse i et væsentligt omfang, hvilket begrundes at hun indgår som forfatter, uanset at hun ikke har haft mulighed for at se den endelige udgave af rapporten.

Copyright: Hel eller delvis gengivelse af denne publikation er tilladt med kildeangivelse

Forsidefoto: Photo by Charlota Blunarova on Unsplash, <https://unsplash.com/@charlotablunrova>

Udgivet af: DTU, Institut for Mekanisk Teknologi,
Nils Koppels Allé, Bygning 403,
2800 Kgs. Lyngby
www.mek.dtu.dk

Indhold

	Resumé	4
1	Baggrund: Elektrificering af fødevareindustrien	5
2	Processvarme	9
3	Tørringsprocesser	13
4	Fordampningsprocesser	19
5	Bagning og kogning	22
6	Steriliserings- og pasteuriseringsprocesser	26
7	Destillation og separationsprocesser	30
8	Konklusion	36
9	Referencer	38

Resumé

Denne rapport giver et overblik over de teknologiske muligheder for elektrificering og industrielle processer i fødevareindustrien. Den danske fødevareindustri forbruger en stor del af det samlede primærenergiforbrug i Danmark, hvoraf størstedelen er afhængig af fossile brændsler.

Elektrificering af energiintensive processer vil bidrage til at reducere afhængigheden af fossile brændsler og fremme dekarboniseringen af den danske industri.

Selvom der findes et bredt udvalg af elektrificeringsteknologier, er kun få implementeringsmodne og frit tilgængelige på markedet. Dog findes der mange nye teknologier, der kan blive tilgængelige på kort sigt. Mange af disse teknologier byder på relevante funktioner både i forhold til energibesparelse og til at sikre kvaliteten af slutproduktet.

Denne rapport præsenterer både de etablerede såvel som de nye teknologier sammen med deres fordele og deres aktuelle udfordringer vedrørende udvikling eller kommercialisering.

Rapporten giver også anbefalinger til de mest egnede teknologier til elektrificering af tørrings-, fordampnings-, steriliserings-, pasteuriserings-, kogning- og bagningsprocesser.



1 Baggrund: Elektrificering af fødevareindustrien

Elektrificering af industrielle processer handler om skiftet fra fossile primære energikilder til elektricitet. Elektrificering har i de senere år fået stor interesse som en metode til at dekarbonisere industrien i sammenspil med alternative metoder som f.eks. brugen af vedvarende brændsler og kulstofopsamlende teknologier. Årsagen til denne interesse er, at elektriske systemer i mange tilfælde kan være betydeligt mere effektive, end systemer der drives af fossile brændsler [01], men vigtigst af alt, at elektriciteten kan produceres af vedvarende energikilder.

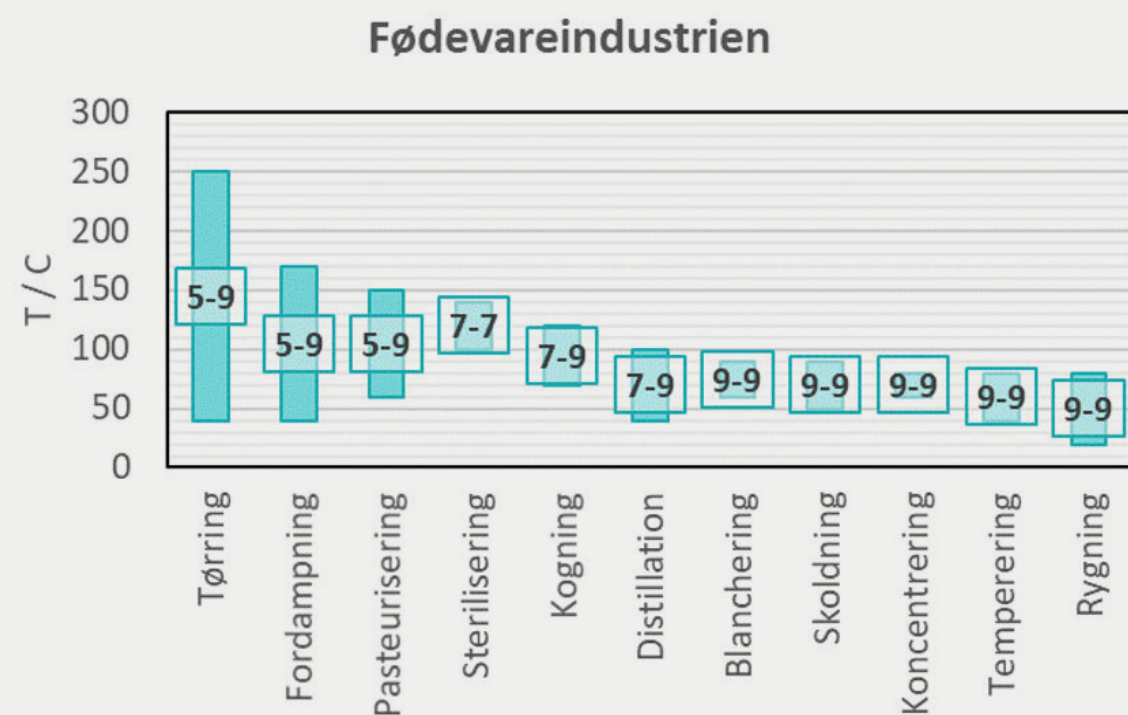
Den industrielle sektor er i høj grad afhængig af fossile brændsler. Eksempelvis var 55 % af industriens forbrug af primærenergi i EU i 2015 dækket af fossile brændsler [02]. Desuden er industrien udpeget som én af de mest udfordrende sektorer at dekarbonisere på grund af manglen på omkostningseffektive elektrificeringsteknologier [01]. Eksempelvis er der i dag ingen nævneværdig effektivitetsgevinst ved elektrificering af høj-temperaturs industrielle processer. Højtemperaturs elektriske ovne eller varmepumper til industrielle anvendelser er endnu ikke kommercielt tilgængelige.

Ikke desto mindre bør man fokusere på de potentielle fordele ved industriel elektrificering. Det anslås, at industrien har et af de største potentialer for elektrificering i mellem ca. 34 % til 52 % [01]. I Danmark alene anslås det, at elektricitet vil kunne erstatte 88 % af naturgasforbruget i industrien [03]. Det skal yderligere bemærkes, at mange elektriske opvarmningsteknologier (f.eks. varmepumper og elvarmelegemer) er mere effektive end brændselsfyrede teknologier, hvilket i det lange løb kan resultere i en væsentlig reduktion af energiforbruget i processerne. I det tilfælde at den anvendte elektricitet er produceret fra vedvarende energikilder, vil de årlige CO₂-udledninger blive reduceret proportionalt med graden af elektrificering og bidrage til at reducere miljøpåvirkningen fra industrien både lokalt og globalt.

Sammensætningen af den danske elektricitet er allerede baseret på en betydelig andel elektricitet fra vedvarende energikilder, og dermed er systemet ét af de mest dekarboniserede elsystemer i verden. I 2030 er planen i Danmark, at mindst 50 % af al elektricitet skal produceres fra vedvarende energikilder og være fuldt CO₂-neutralt inden 2050. Tallene sætter elektrificeringen af dansk industri i en gunstig situation og antyder at dansk industri har potentiale til at blive en af de vigtigste drivkræfter for dekarboniseringen af industrien nationalt.

En analyse af dansk industris energiforbrug afslører, at ca. 70 % af forbruget går til fremstillingsindustrien, som i vid udstrækning er domineret af fødevareindustrien [04]. Industrielle processer i disse sektorer kræver hovedsageligt varme ved lave temperaturer (<100 °C) [02], og derfor er der store muligheder for at elektrificere.

Figur 1 viser temperaturniveauerne i varmebehovet ved forskellige processer i fødevareindustrien. Der vises gennemsnitsværdier for Technology Readiness Level (TRL) for mulige elektrificeringsteknologier, som en metode til at kvantificere, hvor moden teknologien er. Figuren viser, at tørrings- og fordampningsprocesser kræver højere temperaturer og vil således have større udfordringer med elektrificering (som det kan ses af minimums-TRL værdien). Imidlertid kan disse højtemperatur processer også udgøre det største potentiale for CO₂-reduktion og energibesparelser. Pasteuriserings- og steriliseringsprocesser, der er af afgørende betydning for fødevarerens sikkerhed, kræver også høje temperaturer, dog findes her en række elektrificeringsteknologier med tilstrækkelig modenhed. Resten af processerne, herunder kogning, baging og andre lignende underprocesser, kan være lettere at elektrificere og derved realisere en reduktion af CO₂-udledningerne.



Figur 1. Varmerbehov ved forskellige processer i fødevareindustrien og deres temperaturniveauer. Tal i bjælkerne angiver den gennemsnitlige Technology Readiness Level (TRL) for de alternative elektrificeringsteknologier (tilpasset ref. [5])

1.1 Øjeblikkelige miljømæssige fordele

IRENA har anslået, at en gennemgribende elektrificering hos slutforbrugere kan reducere emissionerne fra industrien med 16 % [01]. Mens reduktionen af CO₂-udledninger er den vigtigste drivkraft for dekarbonisering efter Paris-aftalen i 2015, kan elektrificering af industrielle processer også medføre yderligere fordele, som en reduktion af lokal luftforurening og lavere vandbehov. Det er derfor vigtigt at påpege, at fordelene ved elektrificering går ud over reduktionen af CO₂-udledninger, som muligvis ikke vil blive bemærket på kort sigt. Elektrificering har også en øjeblikkelig positiv indvirkning på lokalmiljøet omkring industrierne.

1.2 Økonomiske fordele rækker vidt

De økonomiske aspekter ved elektrificering af industrien kan være en af de største barrierer for at elektrificere. Det er en kendsgerning, at det er lettere og billigere at elektrificere industrielle processer i nybyggede anlæg, mens eftermontering af elektrificeringsteknologier i eksisterende processer ofte ikke er rentable [01].

Ikke desto mindre er det vigtigt at bemærke, at ligesom de nævnte miljøfordele kan elektrificering også medføre yderligere sociale og økonomiske fordele. For eksempel kan nogle elektrificeringsteknologier realisere en bedre energieffektivitet (f.eks. mere varme effekt pr. enhed elektrisk effekt), hvilket kræver mindre energiforbrug til det samme slutprodukt. Elektriske teknologier kan også tilbyde mere fleksibilitet og kontrol af processer og endda øget produktivitet. I takt med at flere elektriske teknologier bliver tilgængelige og modnet takket være teknologiske fremskridt, bliver de også mere økonomisk rentable, som også vil kunne medføre ændringer i energipriserne.

Da mange af teknologierne til elektrificering er meget nye, er det ikke let tilgængeligt at finde og udregne implementeringsomkostningerne. Selv for de mere modne teknologier kan omkostningerne variere afhængig af kapaciteten eller den specifikke proces. Dog har et par rapporter undersøgt økonomien i alternative elektrificeringsteknologier. National Renewable Energy Laboratory i USA foretog en omfattende analyse af elektrificeringsmulighederne for industrien [06] og estimerede deres tilbagebetalingstid baseret på forventede kapitalomkostninger og brændstofomkostninger, dvs. driftsomkostninger. Det skal nævnes, at elektrificeringsmulighederne kun dækkede elpatroner, varmepumper (til rumopvarmning) og elektriske varmeapparater. Analysen påviste tre hovedkonklusioner:

1. tilbagebetalingstider kan variere for den samme teknologi, alt efter hvilken branche teknologien anvendes i;
2. selv for den samme teknologi og anvendelse kan variationen af tilbagebetalingsperioden være meget høj;
3. den laveste tilbagebetalingsperiode for de udvalgte teknologier går fra 1 år for elektriske varmeapparater til 5 år for rumopvarmningsvarmepumper.

En lignende rapport for den hollandske procesindustri [07] indeholdt skøn over energieffektiviteten af forskellige elektrificeringsteknologier, og gav således et overblik over de potentielle besparelser i driftsomkostninger. I dette interval tegner mekanisk dampkomprimering og højtemperaturvarmepumper for den højeste forøgelse, da de i gennemsnit forventes at give henholdsvis 10 og 4 enheder varme pr. enhed elektricitet. Elpatroner af forskellige typer giver 1 enhed varme per enhed elektricitet. Det kan altså konkluderes, at når det kommer til de mere modne teknologier, kan de nemmest implementerbare løsninger (f.eks. elektriske varmeapparater) give en mulighed for elektrificering på kort sigt med minimale procesændringer og lavere kapitalinvesteringer. På lang sigt kan dette dog resultere i højere driftsomkostninger end traditionelle teknologier.

Derimod vil nogle teknologier, der kræver et større re-design, implementering af komplekst udstyr (dampkomprimeringer, varmepumper) og en højere kapitalinvestering, medføre betydelige besparelser i driftsomkostninger.

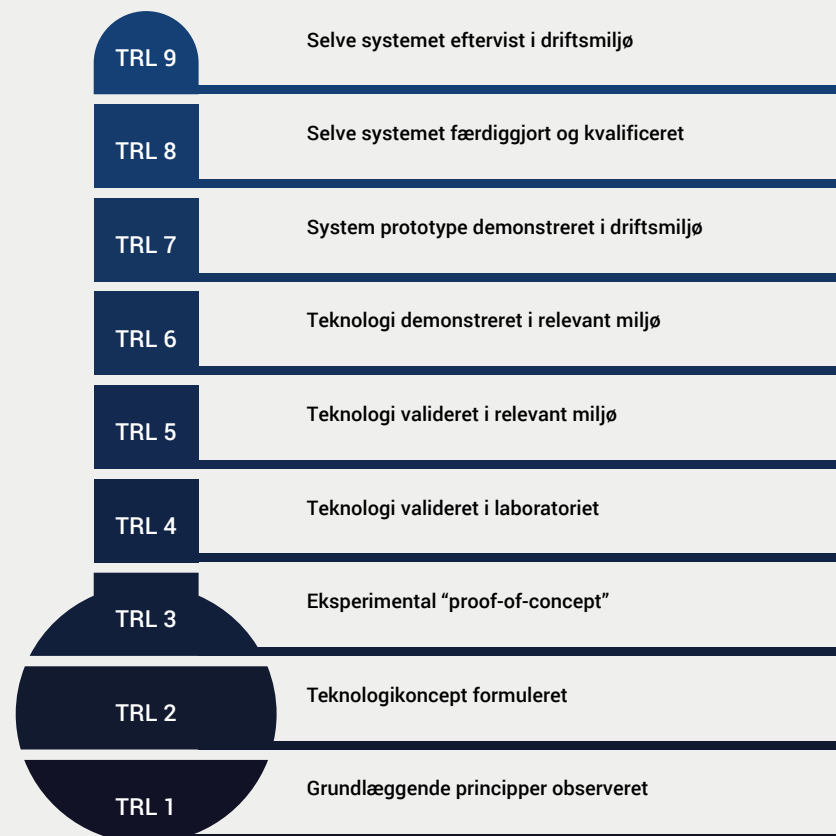
Det er således svært at vurdere de nye teknologiers kapital- og driftsomkostninger. Mange af dem udviser dog relevante fordele, som ikke let kan kvantificeres med hensyn til kapital- og driftsomkostninger, men som bør tages med i den endelige beslutning (f.eks. bedre kontrol, bedre produktet kvalitet).

1.3 Forskellige tekniske og kommercielle potentialer for teknologierne

I denne rapport klassificerer vi niveauet for udvikling og teknologimodenhed for hver af de beskrevne teknologier som en funktion af deres Technology Readiness Level (TRL) og deres kommercielle tilgængelighed. Figur 2 viser forklaringen af hver TRL-værdi, der spænder fra værdi 1, hvor de grundlæggende principper for en specifik teknologi til en applikation er fundet, til værdi 9, hvor teknologien er fuldt kommercielt tilgængelig til en specifik applikation.

I den forstand er teknologier med TRL 8-9 kommercielt tilgængelige, og er blevet installeret mindst én gang, teknologier med TRL 6-7 kommercialiseres af virksomheder, men har stadig brug for en første installation i fuld skala, og teknologier med TRL 4-5 er blevet påvist i pilotskala / laboratorieforhold. Det er vigtigt at påpege, at selvom en teknologi kan være fuldt udviklet til en bestemt applikation (f.eks. Induktion til opvarmning), kan den stadig ikke være fuldstændig tilgængelig til en anden specifik applikation (f.eks. Induktion til tørring).

Teknologiernes kommercielle tilgængelighed er vurderet på baggrund af antallet af virksomheder, der tilbyder teknologien på både lokalt-, europæisk- og verdensplan. Denne tilgang viser, at selvom en teknologi er være fuldt udviklet, kan den i nogle tilfælde godt være svært tilgængelig.



Figur 2 Korrespondance mellem Technology Readiness Level (TRL) og udviklingsniveau for en teknologi (Kilde: <https://www.inno4sd.net>)

2 Processvarme

2.1 Status

I øjeblikket produceres procesvarme i industrien primært ved brugen af fossile brændstoffer, og kun en lille procentdel genereres ved brug af alternative brændstoffer (biomasse) eller elektricitet. Mere end halvdelen af den procesvarme industrien efterspørger er ved lave temperaturer (mindre end 80 °C), mens resten deles omtrent lige mellem medium temperatur (80 - 100 °C) og høje temperaturer (100 - 150 °C) [05].

De primære elektrificeringsteknologier til procesvarme sigter mod opvarmning eller fordampning af procesvæsken (f.eks. vand eller luft). På trods af det betydelige behov for lavtemperatur varme, er en væsentlig mængde af den genererede varme fra industrien frigjort som overskudsvarme ved lave temperaturer. Derfor bør en vigtig del af elektrificeringen af procesvarme være optimerede strategier for intergrationen af overskudsvarme.

2.2 Elektrificeringsteknologier

Procesvarme er et generelt udtryk, der refererer til den varme, der bruges til at udføre industrielle processer. For at differentiere det fra andre mere specifikke processer, som er blevet diskuteret i de foregående afsnit, henviser udtrykket procesvarme i denne rapport til den varme, der anvendes til at generere procesdamp eller varmt vand, som derefter bliver brugt af forskellige industrielle processer og til rumopvarmning.

2.2.1 Elkedler



Elkedler bruger elektricitet til at opvarme en modstand, der er nedsænket i procesvarmefluidet (dypkoger eller luftstrømsvarmer), eller en overflade som er i kontakt med fluidet (overfladevarmer). Teknologien er velkendt og tilbyder en nøjagtig kontrol af fluidtemperaturen. Selvom elektriske varmeapparater allerede er til stede i fødevareindustrien, er deres anvendelse til store kapaciteter eller høje temperaturer muligvis ikke vidt udbredt. Årsagerne kan evt. findes i, at disse teknologier ofte har større driftsomkostninger sammenlignet med traditionelle gaskedler. Ikke desto mindre er det allerede bevist i flere installationer, f.eks. til fjernvarmeproduktion, at de kan anvendes i særligt større kapaciteter. Selvom installationen kan udføres let og hurtigt, kan den største ulempe være at de ikke økonomisk rentable.

Der findes en række nationale teknologileverandører (f.eks. Newtronic ApS (DK), Parat Halvoersen AS (NO), SAN Electro Heat A/S, Jevi A/S). Generelt er den kommercielle tilgængelighed høj, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 8-9.

2.2.2 Varmepumper (lav (LT), mellem (MT), høj (HT) og ultra høj (UHT) temperatur)



Varmepumper er en termodynamisk kredsløbsproces, der bruger elektricitet til at producere varme, køling eller til at opgradere varme. Varmepumper er en

velkendt teknologi med en betydelig energimæssig gevinst, da en varmepumpe typisk konverterer 1 enhed el om til 2 - 6 enheder varme. Dette gør varmepumpers driftsomkostninger væsentligt lavere end traditionelle teknologier. Det forventes, at varmepumper kræver mindre vedligeholdelse end fossile brændstofs-systemer, og at de kan levere køling som et ekstra produkt. Tilmed har de en høj levetid. Dog er deres kapitalomkostninger større sammenlignet med andre teknologier, og deres installation til eftermontering i processer kan være mere kompleks sammenlignet med elektriske kedler. Varmepumper kan anvendes i processer, der spænder fra produktion af rumopvarmning, produktion af varmt vand eller luft og til produktion af processdamp. Afhængigt af temperaturen hvorved varmen leveres, kan varmepumper klassificeres som lavtemperaturvarmepumper (LT, ≤ 80 °C), mellemtemperaturvarmepumper (MT 80 °C til 100 °C) og høj eller ultra høj temperaturvarmepumper (HT, UHT 100 °C til 150 °C). Mens LT varmepumper er velkendte og i vid udstrækning anvendes til rumopvarmning i hjemmet, er MT varmepumper mindre almindelige, og HT og UHT varmepumper er stadig i udviklingsfasen [05].

Der findes en række teknologileverandører af varmepumper (GEA (DK), Mayekawa (JP), Johnson controls (US), Star Refrigeration (UK), Friothers (SE), Viessmann (UK)), Viking Heating Engines AS (NO), Ochsner (AT), Hybrid Energy (NO), Combitherm (DE), Dürr thermea (DE)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed for LT og MT varmepumper høj og modenheden forventes at ligge på en TRL på 8-9. For HT og UHT forventes at være en TRL på 6-7.

2.2.3 Elektrodedler



Elektrodedler bruger strømmen af elektricitet gennem en vandstrøm mellem to elektroder til at skabe damp. Denne teknologi har et meget kompakt design, kræver ikke meget

vedligeholdelse, og den kan reagere relativt hurtig på lastningsændringer. Sammenlignet med traditionelle gaskedelteknologier har denne teknologi lavere installationsomkostninger. Teknologien anvendes allerede i sundhedssektoren, i kraftvarmeverker til fjernvarme, men kan også anvendes i fødevareindustrien (f.eks. kogende vand til procesvarme).

Der findes en række lokale teknologileverandører (Parat Halvorsen AS (NO), Elpanneteknik (SE)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed høj, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 8-9.

2.2.4 Mekanisk damprekompresion



Mekanisk damprekompresion udnytter spildvarme fra lavtryksdamp ved at rekomprimere den igen i en radial blæser eller kompressor, hvilket hæver dampens tryk og temperatur

til et niveau, der gør den anvendelig igen. Denne teknologi muliggør betydelige energibesparelser sammenlignet med den rå produktion af damp [09], og den er en effektiv måde at producere procesdamp på. Denne fordel er imidlertid på bekostning af en mere kompleks og dyr installation, og det øger kapitalinvestering [22].

Der findes en række teknologileverandører lokalt og i Europa (GEA (DK), GIG Karasek (AT), SiccaDania (DK), Anhydro/SPX Flow (GB), Haarslev (DK), Epcon (NO)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed høj, og det forventes at teknologien har en modenhed svarende til en TRL på 8-9.

2.2.5 Induktive kedler

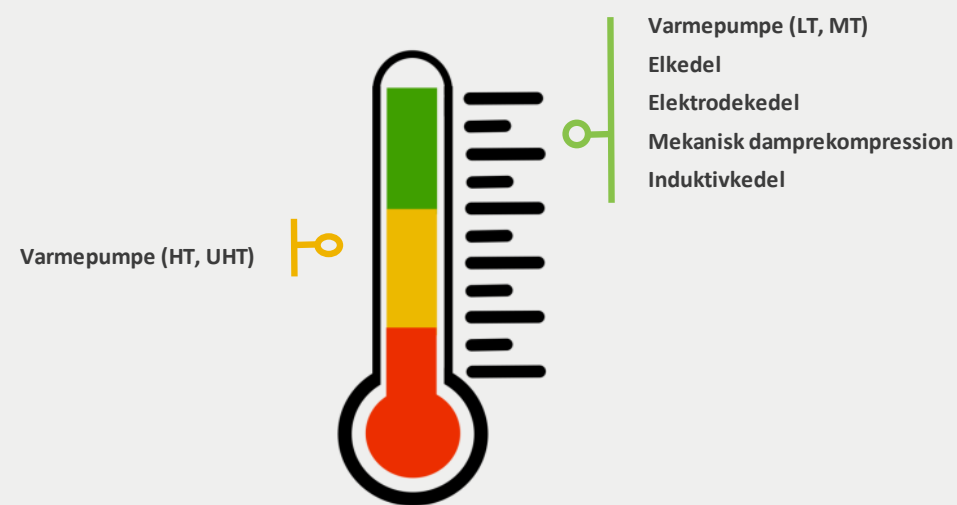


Induktive kedler kan bruges til at erstatte varmevekslere i kedler. Denne teknologi tilbyder meget hurtig opvarmning og kan ifølge leverandørerne reducere driftsomkostningerne med i gennemsnit

30 %. Teknologien kræver ikke højt kvalificeret personale til installation og vedligeholdelse. Den har en god beskyttelse mod aflejringer og færre hot spots, hvilket resulterer i lang levetid. Teknologien har anvendes til procesvarme, som booster ved opstart, som standalone (decentraliseret) varmeproduktion eller endda kombineret med andre teknologier (hybrid). Den største barriere for installationen er dens højere investeringsomkostninger.

Der findes en række teknologileverandører i Europa (MagComp AB (SE), Pereko (PO)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed høj, og det forventes, at teknologien har en modenhed svarende til en TRL på 8-9.





TEKNOLOGI MODENHED - PROCESVARME

Figur 3 Modenhedsniveau for elektrificeringsteknologier til procesvarme

2.3 Diskussion

Figur 3 viser modenhedsniveauerne for elektrificeringsteknologierne til procesvarme. En række modne elektrificeringsteknologier til procesvarme er kommercielt tilgængelige til produktion af damp og varmt vand. Mekanisk damprekompresion og varmepumper giver de bedste resultater ved at minimere driftsomkostningerne og giver energibesparelser, men de kan kræve højere investeringsomkostninger og en mere kompleks installation. Varmepumper er dog muligvis ikke fuldt kommercielt udviklet endnu, hvis der kræves meget høje temperaturer. Elektriske kedler, elektrokedler og induktive kedler er lettere at installere. Af dem kan induktive kedler tilbyde en hurtigere drift og mere betydelige energi- og tidsbesparelser på bekostning af øgede installationsomkostninger.

3 Tørringsprocesser

3.1 Status

Tørringsprocesser er én af de centrale processer i fødevareindustrien. Hovedformålet er at fjerne fugt fra produkterne for at forøge produkternes levetid, konservere dem eller faciliteter efterfølgende processer [08]. For Danmark anslås det, at 20 - 25 % af industriens energiforbrug anvendes i tørringsprocesser [09]. Det høje energiforbrug viser, at det er relevant at forøge effektiviteten af disse processer og sikre, at processerne i højere grad kører på vedvarende energikilder.

Konventionelle tørringsprocesser i fødevareindustrien benytter i mere end 85 % af tilfældene tørring ved hjælp af konvektion med enten varm luft eller overophedet damp. Den tilførte varme opnås typisk ved forbrænding af enten gas eller kul [09]. Afhængig af startproduktets egenskaber og kravene til det endelige produkt, anvender fødevareindustrien indtil videre en række teknologier såsom spraytørring, fluidbed-tørring og båndtørring [10].

Elektrificeringen af disse processer vil ikke alene erstatte forbrændingen af fossile brændsler, men vil også i nogle tilfælde sikre en bedre energiudnyttelse og bedre kontrol over slutproduktets kvalitet.

I det følgende afsnit beskrives og diskuteres en række mulige teknologier til elektrificering af industrielle tørringsprocesser med fokus på teknologiernes modenhed, tilgængelighed og deres potentielle fordele i fødevareproduktionen.

3.2 Elektrificeringsteknologier

Der er udviklet et bredt antal teknologier for industrielle tørringsprocesser baseret på el, som allerede nu er kommercielt tilgængelige. De igangværende forskningsaktiviteter er også løbende med til at introducere nye teknologier. Den række af relevante elektrificeringsteknologier, der er identificeret som egnede til fødevareproduktion, er beskrevet herunder.

3.2.1 Vakuum- og frysetørring / lyofilisering



Vakuum- og frysetørring / lyofilisering er en dehydreringsproces, som foregår ved lavtemperatur. Processen består af en indefrysning af produktet, reduktion af trykket og at isen fjernes ved

sublimation.

Denne teknologi forbedrer stabiliteten og kvaliteten af slutproduktet, reducerer det specifikke energiforbrug, der er nødvendigt for at fjerne vandet, og som kan benyttes til at udvikle nye produkter, hvor delikate aromaer og farver konserveres.

Den anvendes blandt andet i den farmaceutiske og kosmetiske industri, men også inden for fødevareindustrien (f.eks. tørrede jordbær og tørret frugtpulver). Denne teknologi kræver øget håndterings- og forarbejdnings tid, og udstyret bliver dyre og mere komplekst, hvilket kræver større investeringer. Desuden kræver processens karakter, at processen kører i batchdrift.

Vakuum- og frysetørring er en velkendt teknologi med en række kommercielle leverandører (Labogene ApS (DK), Food Processing Technology PIGO (IT), Mirai (AT), Millrock Technology (US), Vekamaf (NL)). Generelt kan det siges, at den kommercielle tilgængelighed er middel, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 8-9.

3.2.2 Varmepumpeassisteret lufttørrer



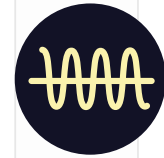
En varmepumpeassisteret lufttørrer anvender varmepumpeprincippet til at flytte varme fra den fugtige afkastluft til den tørre indblæsningsluft. Processen genvinder den latente

varme fra fordampningsprocessen, hvilket resulterer i en reduktion af netto energiforbruget på op mod 65 %. Den anvender den fugtige afkastluft som varmekilde i fordamperen, hvor luften køles og fugten kondenseres ud, hvilket resulterer i en kold tør luft. Efterfølgende afsættes varmen fra kondensatoren til denne kolde tørre luftstrøm, inden den benyttes som indblæsningsluft til tørringsprocessen. Med denne teknologi er det også muligt at implementere hybrid konfigurationer til at minimere tørringsomkostningerne, som funktion af energipriserne.

Ifølge leverandørerne anvendes teknologien i industrier såsom tørring af spildevandsslam fra forskellige industrier og tørring af maling og belægninger og indenfor fødevareindustrien (f.eks. ekstruderede produkter, tørret frugt, tørret kød, tørrede krydderier og kælledyrsfoderindustrien). Selvom en række installerede pilotanlæg anvender denne teknologi (f.eks. Wienerberger, en global leverandør og byggematerialer og AGRANA's fødevaretørringsprocesser) og asiatiske leverandører har installeret en række anlæg, så lader det til, at den kommercielle tilgængelighed i Europa er lav.

En række leverandører kan findes i både Europa og Asien (Vekamaf (NL), Watterson's OKADA (MY)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed lav, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 6-7.

3.2.3 Radiofrekvens (RF) tørring



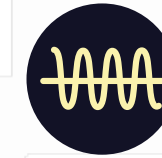
Radiobølger med en høj frekvens på 20 kHz til 300 MHz kan benyttes til at opvarme materialer, og derfor kan de også benyttes i tørringsprocesser. Det virker som en lovende teknologi, da

den udviser en række fordele sammenlignet med konventionelle tørringsprincipper, såsom reduktion af varmetab ved konvektion, reduktion af tørringstiden og selektiv opvarmning, hvor det kan kontrolleres, at der ikke forekommer overtørring og overopvarmning. Ifølge information fra teknologileverandørerne kan denne teknologi reducere de generelle tørringsomkostninger med 20 - 50 % med en tilbagebetalingstid på 2 til 3 år. Udfordringerne der følger med denne teknologi omfatter kravet til specialiseret faglært arbejdskraft, ordentlig afskærmning af radiobølgegeneratorer og mulige begrænsninger på frekvensbåndet i Danmark.

De identificerede teknologileverandører af RF tørrer er Kallesøe (DK, kun modning), Kerone (IN), Thermex-Thermatron (US), Radio Frequency Co (US), Sairem (FR).

Generelt er den kommercielle tilgængelighed middel, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 6-7.

3.2.4 Mikrobølgetørring



Ud fra et princip i lighed med radiofrekvenstørring kan mikrobølger også anvendes til tørring. Mikrobølger tørrer materialet indefra og ud, da det meste af fugten er fordampet,

før det forlader materialet, hvilket frembringer en pumpeeffekt, der tvinger væsken i materialet ud mod overfladen. Selvom anvendelsen af mikrobølger generelt er udbredt i industrien, så er den kommercielle modenhed af at bruge teknologien i tørringsprocessen kun i de indledende faser. Denne teknologi er i stand til at fjerne en signifikant større mængde vand end konventionel tørring, hvilket kan reducere tørretiden, især når processen skaleres op. Den kan derfor vise sig at være den mest økonomiske løsning, når der kræves et meget tørt slutprodukt.

Der findes både nationale og internationale teknologileverandører (f.eks. Netek IR systems (DK), Nasan (CN)), men de findes ikke i overflod. Generelt er den kommercielle tilgængelighed medium, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 6-7.

3.2.5 Infrarød tørring



Infrarød tørring anvender energien i infrarød stråling (300 GHz til 430 THz) til at opvarme materialet, der skal varmes direkte. Dermed sker der en intern opvarmning af materialet

og molekylære oscillationer, der driver fugten ud i den kølige luftstrøm. IR tørring betyder, at man kan reducere tørretiden med op til 60 %, og dermed kan energiforbruget reduceres med op mod 70 %. IR tørring har en række fordele som reduceret tørretid og energiforbrug, ens opvarmning af overfladen og dermed en høj kvalitet af slutproduktet. Det nødvendige udstyr er også alsidigt, simpelt og kompakt [12].

Infrarød tørring kan benyttes som enkeltstående tørreknologi, men benyttes oftest i kombination med andre tørreknologier som vakuum eller gas-tørring [12].

Selvom denne teknologi er udbredt i industrien til f.eks. at tørre tekstiler, papir, film, maling eller belægninger, er anvendelsen til tykke porøse materialer som fødevarer ikke fuldt udviklet endnu. Der er dog en del forskningsstudier om tørring af blandt andet løg, kartofler, gulerødder, vindruer og lignende [12].

Der er en række europæiske teknologileverandører af infrarød tørrer (f.eks. Netek IR systems (DK), Kerone Engineering Solutions LTD (IT), Space-Ray (DE)). Sidstnævnte har ikke teknologi klar til tørring men kun til rumopvarmning.

Generelt er den kommercielle tilgængelighed lav, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 8-9 for tynde produkter, mens anvendelsen til fødevarerproduktion generelt har en TRL på 6-7.

3.2.6 Induktiv tørring



I induktiv-tørring tilføres varmen ved hjælp af induktion for at accelerere fordampning af de volatile forbindelser i et produkt, som placeres i en elektrisk ledende beholder. Denne teknologi

er i stand til at skabe meget hurtig opvarmning af metalbeholdere (f.eks. 100 °C per sekund), den er mere sikker at benytte end brændsler, og den kan reducere energiforbruget med mere end 20 % grundet den kortere tørringstid, og endelig har teknologien IT potentialet til at øge produktiviteten. Induktiv-tørring har været anvendt til tørring, hærkning og limning i både bil- og olie- og gasindustrien [14]. Der er endnu ikke kommercielle løsninger tilgængelige i fødevareindustrien, men potentialet er blevet undersøgt [15].

En række leverandører tilbyder industrielle induktionsprodukter men kun få tilbyder denne teknologi til tørring (GH Group (ES), Nordson (NO)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed middel, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 6-7.

3.2.7 Vakuamtørring

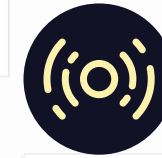


I vakuamtørring fjernes den fugt, der er tilstede i produktet, typisk et vådt fast stof, ved at skabe vakuum omkring produktet. Ved at undgå at tilføje varme, øger denne teknologi

stabiliteten af slutproduktet, hvorved den bevarer delikate aromaer og farver. Teknologien anvendes i den farmaceutiske og kosmetiske industri, men også i fødevareindustrien til en række produkter (f.eks. frugt og grøntsager). Dog må der forventes en forøget tørretid, og at der skal benyttes mere komplekst udstyr, hvilket kræver en øget investering. Teknologien tillader også batchprocesser.

Der findes en række europæiske teknologileverandører (Bachiler Barcelona (ES), Meier Prozesstechnik GmbH (DE), Amixon (SE), Vekamaf (NL)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed middel, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 6-7.

3.2.8 Pulserende elektrisk felt



Denne teknologi anvender en pulserende elektrisk strøm kombineret med varmebehandling som en ny ikke-termisk metode til fødevarekonservering med en øget fugt-fjernelsesgrad.

Denne teknologi eliminerer eller reducerer behovet for at blanchere produktet som forberedelse til yderligere bearbejdning [16]. I kartoffelindustrien er denne teknologi en industristandard, da den reducerer forvarmning og blanchering (f.eks. i Wernsing i Danmark). Den anvendes i en række fødevareindustrier som f.eks. i produktionen af kartoffelchips eller tørrede pølser. Udviklingen af teknologien til anvendelse til tørring er stadig på pilotstadiet.

Der findes en række teknologileverandører i Europa (ScandiNova Systems (SE), ELEA (DE)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed lav, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 6-7.

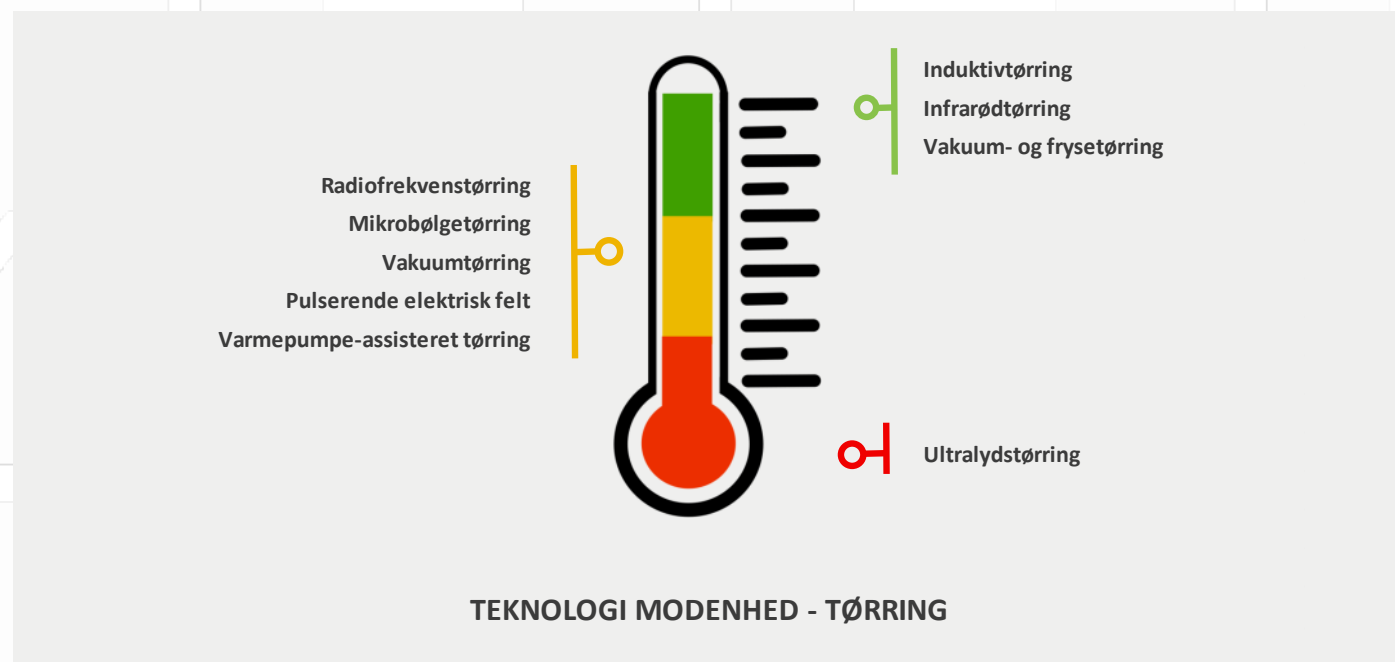
3.2.9 Ultralydstørring



Ultralydstørring benytter trykbølger såsom sonisk eller højintensiv ultralyd til at producere en forøgelse af massetransportkinetikken, og dermed accelererer teknologien i

tørringsprocessen. Denne teknologi forventes at blive op til fem gange mere energieffektiv end de fleste konventionelle tørringsprocesser. Den vil kunne halvere tørretiden og dermed resultere i øget produktivitet. General Electric har fornyligt investeret i et studie af teknologien, og den er med succes implementeret i en rengøringsproces. Teknologien er anvendt i industrien til processer som papirfremstilling, tekstil-tørring, pulver-tørring og har muligvis også et potentiale i fødevareindustrien (f.eks. tørring af frugt og grøntsager som champignoner, rosenkål og blomkål) [17]. Det er stadig på pilotstadiet at anvende teknologien i fødevareindustrien.

Der findes nogle teknologileverandører (Ultrasonic Technology Solutions, LLC (US), Pusonics (ES)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed lav, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 4-5.



Figur 3 Modenhedsniveau for elektrificeringsteknologier til tørring

3.3 Diskussion

Selvom der findes et bredt udvalg af teknologier til udskiftning eller forbedring af nuværende industrielle tørringsprocesser, så er mange af dem i et tidligt stadie af kommercieliseringsen; nogle kun i pilot- og demonstrationsstadiet. Potentialet for deres udvikling i de kommende år synes meget stort, da adskillige undersøgelser har påvist deres fordele i forhold til at reducere energiforbruget, men der er altså færre mulige teknologier tilgængelige til elektrificering af tørreprocesser på nuværende tidspunkt.

Udover at producere damp ved brug af elektricitet, som bliver omtalt i afsnittet for procesvarme, så er de mest modne teknologier til tørring af fødevarer vakuum- og frysetørring og varmpumpe-assisterede lufttørre. De høje omkostninger ved vakuum- og frysetørring gør dog, at teknologien kun er relevant, hvis der planlægges et nyt produkt med mere værdi, som kan berettiggte investeringen. I dette tilfælde vil slutproduktets kvalitet være væsentligt højere sammenlignet med konventionelle termiske tørringsprocesser.

Varmepumpeassisterede lufttørre, der er klar til installation, er muligvis ikke kommercielt udbredte i Europa, men markedet for varmpumper har et anseligt antal leverandører, hvilket kan fremskynde udbredelsen og udviklingen af denne teknologi.

Elektromagnetiske teknologier (infrarød, radiofrekvens og mikrobølge) er velkendte teknologier, der blot har brug for yderligere udvikling til at kunne anvendes til tørring. Disse teknologiers potentiale i de kommende år ser lovende ud. Særligt i betragtning af deres forventede besparelser i tørringstid og energiforbrug, såvel som deres muligheder for hybridløsninger med eksisterende tørreprocesser.

4 Fordampningsprocesser

Fordampningsprocesser består i, at et opløsningsmiddel (oftest vand) fjernes fra en opløsning eller opslæmning ved at fordampe opløsningsmidlet med det formål at opkoncentrere opløsningen. Fordampning forekommer også ved andre processer som destillation eller tørring. Dog vil fordampning, i modsætning til destillation, ikke forsøge at adskille komponenterne i dampen, og i modsætning til tørring er produktet i en fordampningsproces altid en væske [10].

4.1 Status

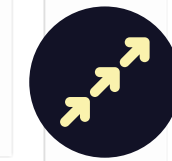
Under fordampning gennemgår produktet ændringer i både fysisk struktur og udseende, og det endelige produkt kan være i både en væskelignende substans eller en opslæmning afhængigt af fugtighedsindholdet. Den mest optimale metode til tørring afhænger af startproduktets udgangspunkt og kravene til slutproduktet.

Fordampningsprocesser i fødevareindustrien kan udføres ved udkogning af vand ved hjælp af nedsænkede elektriske varmeelementer, men det mest almindelige udstyr er flertrins-rørkedelfordampere eller pladefordampere [18], hvor procesvarmen normalt genereres med fossile brændsler. Alternativer til elektrificering i dette afsnit er specifikke for denne proces, og derudover kan elektricitet bruges til at generere den procesvarme, der skal anvendes til fordampningsprocessen.

4.2 Elektrificeringsteknologier

Der findes kun et par muligheder, når det gælder specifikke teknologier til elektrificering af fordampningsprocesser. Fælles for dem er, at de giver en væsentlig forbedring af fordampningsprocessens energieffektivitet, dog på bekostning af en mere kompleks og dermed dyrere installation.

4.2.1 Flertrinsfordampere



Fordampere med flere trin består af en sekvens af beholdere, der hver holdes ved et lavere tryk end det foregående, hvorved opløsningsmidlerne fordampes ved faldende temperatur. I denne

konfiguration kan dampen, der generes i en beholder, bruges som varmekilde i næste beholder og så fremdeles. Således er det kun den første beholder (dvs. den med det højeste tryk), der kræver en ekstern varmekilde. Denne teknologi reducerer dermed mængden af ekstern varme eller damp, der er nødvendig for at drive fordampningsprocessen betydeligt, hvilket resulterer i forbedret energieffektivitet og reducerede driftsomkostninger. Grundet systemets konfiguration har den mulighed for at integrere forskellige varmekilder og kan derved fremme genindvindingen af overskudsvarme.

Ifølge teknologileverandørerne er teknologien især velegnet til at koncentrere sortlud med høj viskositet og giver renere og genanvendelige kondensater ved brug af den mindst mulige mængde energi. Teknologien anvendes i både papirindustrien og den kemiske industri, men også i fødevareindustrien (f.eks. til saftkoncentration, sukkerroeforarbejdning, stivelsesproduktion og fordampning af mælk og valle). Det kræver dog en kompleks og dyr installation, hvilket resulterer i en stor investering, som yderligere øges med antallet af fordampningstrin.

Dette er en velkendt teknologi, og der findes en række teknologileverandører (f.eks. Andritz Oy (FI)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed medium, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 9.

4.2.2 Mekanisk damprekompresion



Mekanisk damprekompresion er en energigenindvindingsproces, der kan bruges til at genanvende overskudsvarme fra damp til at forbedre processens energieffektivitet.

Temperaturen af den damp, der kommer ud fra en proces, som kan forøges ved at komprimere dampen med en radialblæser eller kompressor. Dermed kan dampen anvendes i processen igen. På denne måde går energien i dampen ikke tabt; og kun den energi, der kræves for at forøge tryk og temperatur skal tilføjes. Sammenlignet med den rene generation af damp, giver denne teknologi mulighed for betydelige energibesparelser [10].

Denne teknologi har anvendelser i industrien til eksempelvis afsaltning af vand eller behandling af industrielt spildevand [22] og anvendes også indenfor fødevareindustrien (f.eks. produktion af kartoffelmel, fiskemel, kartoffelsaft, mælk, valle, pektin, brænderier osv.). Dog kræver den komplekse og dyre installation en forøgelse af investeringen [22].

Der findes en række nationale og internationale teknologileverandører (f.eks. GEA (DK), GIG Karasek (AT), SiccaDania (DK), Anhydro/SPX Flow (GB), Haarslev (DK), Epcon (NO)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed høj, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 9.

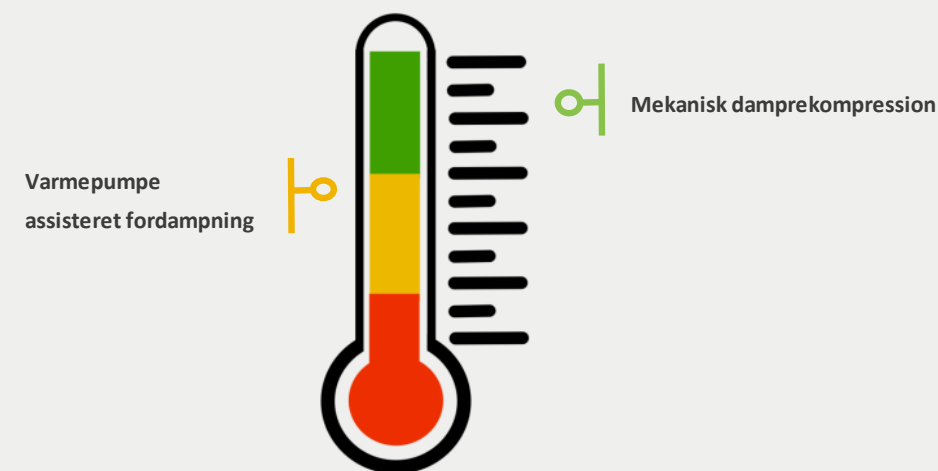
4.2.3 Varmepumpeassisteret fordampning



Varmepumpeassisteret fordampning er en proces, der består af at integrere en varmepumpe, så den leverer en del af den varme, der kræves af fordampningsprocessen.

Varmepumpens kølemiddel absorberer varme, mens det fordamper ved lav temperatur. Kølemiddeldampen komprimeres herefter til et tryk, der er tilstrækkeligt højt til, at dampen kondenser i kondenseren, hvorved varmepumpen afgiver den nødvendig varme til fordampningsprocessen. Denne teknologi har mulighed for at øge energieffektiviteten i fordampningsprocessen og derved reducere driftsomkostninger. Teknologien kan bruges til at genvinde varme, der ellers ville blive spildt. Den anvendes bl.a. inden for industrier som den kemiske-, farmaceutiske-, biokemiske- og raffinaderiindustrien men også inden for fødevareindustrien (f.eks. flydende fødevarer). Der må forventes høje investeringer (omend sandsynligvis billigere end fler-trinsfordampere), og nu er der ingen tilgængelige referencer eller studier om implementeringen. Ikke desto mindre kan det betragtes som en god løsning til eftermontering grundet den lette installation, enkle konstruktion og simple betjening [19].

Denne type løsning bør undersøges med teknologileverandører af mellem- til højtemperatur varmepumpeteknologier (fx Vicking Heating Engines AS (NO), Ochsner (DE), Hybrid Energy (NO), Combitherm (DE), Dürr thermea (DE)), da der ikke er fundet nogle reference på den type installation. Generelt er den kommercielle tilgængelighed medium, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 7-9.



TEKNOLOGI MODENHED - FORDAMPNING

Figur 4 Modenhedsniveau for elektrificeringsteknologier til fordampningsprocesser

4.3 Diskussion

Dette afsnit dækker tre teknologier som alternativer til elektrificering til fordampningsprocesser. Det vil også være muligt, at anvende damp, der genereres af elektrisk drevet teknologier. Elektrificeringsmulighederne til dampgenerering vil blive diskuteret i afsnittet om procesvarme.

Mekanisk damprekompresion og flertrinsfordampning er begge teknologier, der kan medføre en væsentlig energibesparelse og dermed også en væsentlig reduktion af driftsomkostningerne. De kræver dog en høj investering, hvilket gør dem mere egnede til fordampningsprocesser med stor kapacitet. Integrering af varmepumper i eksisterende fordampere kan muligvis reducere deres energiforbrug og kræver en lavere investering, men referencer til industrielle installationer bør verificeres med teknologileverandører af industrielle varmepumper.

5 Bagning og kogning

5.1 Status

I øjeblikket er størstedelen af bage- og tilberedningsprocesser afhængige af brugen af fossile brændstoffer til direkte opvarmning i ovne eller til produktion af procesvarme. De resterende processer anvender allerede elektricitet ved brug af enten mikrobølgeteknologi eller elektriske varmelementer.

5.2 Elektrificeringsteknologier

Bagning og kogning er termiske processer, der udføres under høje temperaturer (60 °C til 140 °C), hvor igennem fødevarer udvikler de ønskede egenskaber inklusive fysiske, kemiske, biokemiske og reologiske ændringer. Ved bagning, henviser vi her til tilberedningsprocessen, hvor der forventes specifikke overfladeegenskaber på slutproduktet (f.eks. stegning, grill), mens kogning generelt henviser til en samlet behandling af produktet. En række andre forskellige processer kan overvejes under denne kategori, herunder ristning og blanchering, da elektrificeringsmulighederne kan være de samme som til bagning og kogning.

Bagning og kognings termiske processer udføres under høje temperaturer (60 °C til 140 °C), hvor igennem produktet udvikler de ønskede egenskaber, herunder flere fysiske, kemiske, biokemiske og reologiske ændringer. En række andre processer kan overvejes under denne kategori, herunder ristning og blanchering, da elektrificeringsmulighederne kan være sammenfaldende med bagning og kogning.

5.2.1 Indirekte modstandsvarme – elektriske ovne og varmelementer



Direkte modstandsvarme og elektriske ovne består af brugen af elektriske varmelementer (modstandsvarme), der opvarmer en overflade i det rum, hvori produktet tilberedes. Denne teknologi er langt den mest udbredte i industrien på nuværende tidspunkt. Den er lettere at installere end konventionelle gasovne, og den kræver generelt en lavere investering. Teknologien giver også en mere jævn temperatur takket være en forbedret digital temperaturstyring.

Den brede vifte af kommercielle produkter gør, at teknologien kan anvendes til næsten enhver laststørrelse, produktionsmængde og materiale. Desuden er de mere effektive end konventionelle gasfyrede ovne med hensyn til konverteringen af energi til varme. De kan bruges i fødevarerindustrien til næsten alle former for fødevarer (f.eks. boller, brød, kager og færdigretter). Dog må der, afhængigt af elpriserne, forventes forøgede driftsomkostninger, og disse ovne kan også være langsommere at starte op end konventionelle ovne.

Der findes en bred vifte af teknologileverandører i Norden (Electroheat AB (SE), Almani (DK), Svebaldalen (SE)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed høj, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 8-9.

5.2.2 Induktionsovne



Induktionsovne benytter induktion til at opvarme overfladerne, hvor igennem hvilke ikke-metalliske produkter modtager varmen (f.eks. ovne, ruller, rørledninger). Denne teknologi tilbyder en hurtig opvarmning af metallet (100 °C pr. sekund.), øget sikkerhed da brændbare stoffer elimineres og reducerer opvarmningstiderne, hvorved der også er et potentiale for energibesparelser. Teknologien har længe været anvendt inden for metalforarbejdning, medicinske anvendelser (f.eks. sterilisering af kirurgiske instrumenter), biomassepyrolyse såvel som i husholdningsapparater [20]. Den kan også anvendes til industriel fødevarerforarbejdning (f.eks. kogning, blanchering, ristning). Der mangler dog stadig oplysninger om virkningen af induktionsopvarmningen på den sensoriske og ernæringsmæssige kvalitet af forskellige fødevarermaterialer. Der mangler også videnskabelige data og oplysninger om design og ydelse af induktionsopvarmning i forskellige fødevarerprocesser, hvilket hindrer dens kommercielle udbredelse [20].

Der findes en række erfarne teknologileverandører til industrielle anlæg (MagComp AB (SE), GH Group (ES), Nordson (NO), Netek IR systems (DK)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed høj, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 8-9.

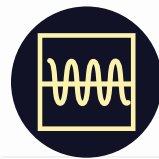
5.2.3 Impingementovn



Impingementovne (også kaldet tvungen konvektionsluft- Impingementovne) anvender små dyser, korte rør, perforerede plader eller smalle spalter til at blæse luft med høj hastighed vinkelret på den fødevarer der bages. Luftstrålen fjerner det relativt kølige, fugtige viskose og tætte grænselag ved produktets overflade, således at varmen når produktet mere effektivt. På den måde reduceres energiforbruget, bagetiden og temperaturen. Dette princip er særligt effektivt med tynde fødevarer. Ifølge leverandørerne er det muligt at implementere hybridløsninger med f.eks. gasfyrede ovne eller mikrobølgeovne. Teknologien anvendes i fødevarerindustrien til en række produkter (f.eks. småkager, kager, kiks, granola, crunch & müsli, tærter, pizza, fladbrød). Ved anvendelse af denne teknologi er det dog først nødvendigt at justere tilberedningsparametrene. Derudover kan teknologien ikke anvendes med 'hævende' bageprodukter, og det kan være nødvendigt med ekstra vedligehold.

Der findes en række nationale teknologileverandører (Senius Food Equipment ApS (DK), Flexmatic (DK)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed høj, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 8-9.

5.2.4 Mikrobølgeopvarmning



Ved opvarmning af mad med mikrobølgestråling trænger strålerne, og derved varmen, ind i maden og kan bruges til forskellige processer, såsom kogning, blanchering eller temperering af mad (ikke stegning).

Denne teknologi tillader, at tilberedningen sker gennem hele fødevarens volumen, hvilket minimerer aflejring på fødevarer. Teknologien har tilmed en høj opvarmningseffektivitet (80 % eller højere kan opnås), og har derfor betydeligt kortere tilberedningstid. Teknologien kan benyttes til varmfølsomme, højviskøse og flerfase-fluider, den kræver mindre vedligeholdelse, kan kombineres med andre teknologier som hybridløsninger, og er velegnet til både batch eller kontinuerlig tilberedning [21].

Teknologien anvendes i fødevareindustrien til en række tilberedningsprocesser (f.eks. temperering af frossen kød og fjerkræprodukter; forkogning og tilberedning af forskellige fødevarer; bagning af brød, kiks og konfekturer; optøning af frosne produkter og blanchering af grøntsager). Indtil videre har udbredelsen af denne teknologi dog været langsom grundet den manglende erfaring med at designe industrielt udstyr, der lever op til fødevareindustriens krav. Der mangler også løsninger til opskalering, og en udfordring er også, at der er relativt høje installationsomkostninger. Derudover bør fødevareremballage i metaller ofte undgås [21].

Der findes teknologileverandører til store kapaciteter, men de er ikke udbredte (Industrial Microwave Systems Ltd (UK)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed medium, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 7-9.

5.2.5 Infrarød opvarmning

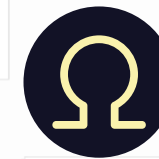


Ved at bestråle fødevareroverflader med infrarød stråling, induceres forskellige ændringer i dets bestanddele på molekylært og atomart niveau. Denne teknologi kan erstatte traditionel bagning / ristning eller kan bruges i kombination med konventionelle opvarmningsteknikker. Teknologien giver en reduktion af tilberedningstiden, og omkostningerne til energi kan reduceres med mellem 50-60 % i forhold til en konventionel ovn [22].

Teknologien anvendes inden for fødevareindustrien til bagning (f.eks. brød og småkager) og ristning (f.eks. nødder, frø og kaffebønner). Det skal dog bemærkes, at anvendes teknologien alene, kan den skabe meget tykke brødskorper, yderligere begrænses anvendelse til overfladevarme, hvis teknologien benyttes alene. Ligeledes har nogle brugere rapporteret øget energiforbrug i forhold til konvektionsovne (f.eks. småkager). Selvom teknologien benyttes til rumopvarmning i vid udstrækning også i industrien, er det i dag fortsat en udfordring at finde succesfulde kommercielle anvendelser af IR-opvarmning i fødevareindustrien med vedvarende forbedringer af omkostninger, produktivitet og kvalitet [22].

Der findes en række teknologileverandører (Jevi A/S (DK), Heraeus (DE), Aabo ideal (DK)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed medium, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 7-9.

5.2.6 Ohmsk opvarmning / direkte modtandsvarme



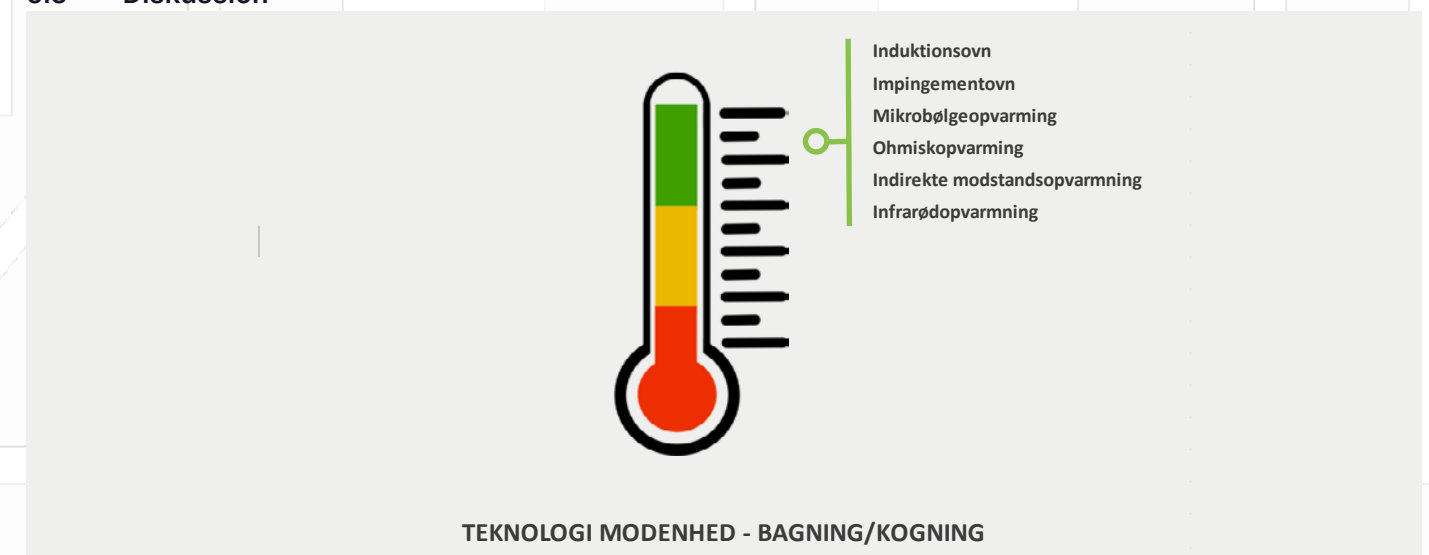
Ohmsk opvarmning er en elektroopvarmningsteknik, der er baseret på Joule-effekten, herved sendes vekselstrøm gennem en fødevare med en elektrisk modstand ved at forbinde to elektroder til fødevarer. I denne teknologi undgås høje vægtemperaturer, hvilket forhindrer aflejring, det bevarer fødevarens farve og næringsværdi og forkorter behandlingstiden, hvilket resulterer i højere produktivitet.

Teknologien anvendes i fødevareindustrien til opvarmning af væskelignende fødevarer (f.eks. frugt og grøntsager, mælk, isblanding, æg, valle, supper, gryderetter, frugter i sirup, varmfølsomme væsker). Kommercialiseringen af teknologien til ohmsk opvarmning afhænger af udviklingen af tilstrækkelige sikkerheds- og kvalitetssikringsprotokoller, og er yderligere begrænset af fødevarers elektriske konduktivitet.

Der findes et begrænset antal men dog erfarne teknologileverandører (Emmepiemme S.r.l. (IT)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed medium, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 7-9.

Alle de nævnte alternativer med elektrificering til bagning og kogning, incl. ristning og forvarmning, er modnede til industriel anvendelse, og de fleste har en god kommercielle tilgængelighed. Selvom standard indirekte elektriske varmelementer og ovne er en velkendt teknologi og kan anvendes til en lang række processer og produkter, kan de kræve længere tilberedningstider sammenlignet med andre muligheder. F.eks. giver induktionsopvarmning meget hurtigere temperaturstigning, og kan derved give væsentlige energibesparelser og reducerede tilberedningstider. Brugen af impingementsovne giver også en reduktion af den tid og energi, der kræves til tilberedningen, dog er anvendelsen begrænset til en bestemt type produkter (tynde bageprodukter). Infrarød-varmeapparater kan også give energi- og tidsbesparelser, og de kan anvendes til et bredere udvalg af produkter, især hvis de kombineres i hybridløsninger. Mikrobølgeopvarmning kan være interessant, når hot spots og aflejring skal undgås, men deres kommercielle tilgængelighed kan være begrænset. Tilsvarende kan ohmsk opvarmning være en god mulighed for følsomme, flydende produkter. Generelt kan det siges, at elektrificeringen af bagnings- og kogningsprocesser kun handler om investering, som ikke bør være høj, og om kalibrering og optimering af procesparametre.

5.3 Diskussion



Figur 5 Modenhedsniveau for elektrificeringsteknologier til bagning og kogning

6 Steriliserings- og pasteuriseringsprocesser

6.1 Status

Steriliserings- og pasteuriseringsprocesser i fødevareindustrien udføres for det meste ved hjælp af damp, som ofte genereres ved brug af fossile brændsler. Selvom andre steriliseringsmetoder, såsom UV- og højtrykssterilisering, allerede anvendes i andre industrier, f.eks. den farmaceutiske, er der stadig behov for yderligere udvikling for at implementere den i fødevareindustrien. Det kan være på vej i de kommende år grundet teknologiernes lovende potentiale.

6.2 Elektrificeringsteknologier

Pasteurisering er en proces, der bruger en relativt mild varmebehandling til at dræbe patogener og inaktivere bakterier og enzymer for derved at gøre mad sikker til indtagelse. Sterilisering er en mere gennemgribende varmebehandling. Traditionelt er den designet til at opnå kommerciel sterilitet af produkterne, hvilket giver produktet langstrækt hyldestabilitet. Det skal dog bemærkes, at den påkrævede grad af varmebehandling afhænger af produktets pH-værdi, da denne har en indflydelse på virkningen af pH-værdien på resistensen af mikrobielle sporer.

6.2.1 Højtrykssterilisering/-pasteurisering



Højtryks-sterilisering/pasteurisering er en kombineret proces, hvor både tryk og temperatur bidrager til sterilisering ved inaktivering af sporer og enzymer. Højtryksbehandling starter ved forhøjede temperaturer, f.eks. 60 - 90 °C og benytter adiabatisk kompression til at opnå en hurtig opvarmning til højere temperaturer. Kvaliteten af højtrykssteriliserede fødevarer (f.eks. tekstur, smag og bevarelse af næringsstoffer) er sædvanligvis bedre end konventionelt varmesteriliserede produkter. I betragtning af vigtigheden af temperaturregulering kan gøre højtrykssterilisering til en rentabel investering, og det kan yderligere medføre en reduktion af det samlede energiforbrug på op mod 20 % [23,24].

Denne teknologi anvendes allerede med succes i kommerciel skala til pasteurisering af en lang række fødevarer, f.eks. frugtsaft, guacamole, østers og skinke. Dog er en validering stadig nødvendig for kommerciel anvendelse af højtrykssterilisering til ikke sure eller neutrale fødevarer. Højtrykssterilisering er stadig i pilotstadiet [24].

Der findes et begrænset antal men dog erfarne teknologileverandører (Hiperbaric (ES)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed medium, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 8-9.

6.2.2 Mikrobølgesterilisering/-pasteurisering



Mikrobølgesterilisering/-pasteurisering bruger mikrobølgestråling til at inaktivere bakterier, patogener eller vira. Anvendelsen af mikrobølgeopvarmning til pasteurisering af mælk kan minimere aflejring, og den er undersøgt grundigt og har været i kommerciel anvendelse længe [25].

Der er udført omfattende akademiske og industrielle studier på sterilisering. De primære fordel er, at strålingen trænger igennem hele fødevarens volumen ensartet og hurtigt, hvilket markant reducerer bearbejdningsstiden, den anvendte energi og tab af næringsstoffer, farve og smag. Teknologien har en høj opvarmningseffektivitet på 80 %, og den kan eftermonteres med andre teknologier som regenerative varmevekslere og infrarød-opvarmning, hvilket kan minimere aflejring. Mens mikrobølger har evnen til fuldstændigt at inaktivere mikroorganismer og effektivt ødelægge enzymaktivitet, har de mindre effekt på antioxidantaktivitet, tekstur og farve sammenlignet med konventionelle teknologier [25, 26].

Teknologien kan anvendes til en lang række produkter inden for fødevareindustrien (f.eks. sterilisering af diverse fødevarer, fastfood, færdigmåltider og kornprodukter). Dog har kommercialisering af processen hidtil kun haft begrænset succes. Desuden skaber manglende tilgængelighed af faktiske temperaturprofiler usikkerhed med hensyn til sterilisering, og det er blevet rapporteret, at mikrobølge-assisterede-processer ikke altid resulterer i bevarelse af fødevarens kvalitet.

Der findes et begrænset antal teknologileverandører til større kapaciteter (Industrial Microwave Systems Ltd (UK)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed medium, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 7-9.

6.2.3 UV-sterilisering/-pasteurisering



Kortbølget ultraviolet lys (UV-C) kan bruges som en desinfektionsmetode, da det påvirker det genetiske materiale fra bakterier, virus, skimmelsvamp og andre mikroorganismer. På den måde forhindrer UV-C bestråling deres reproduktion.

Denne teknologi tilbyder reduktion af patogener i varmfølsomme produkter såsom juice eller mælk [27].

Teknologien anvendes i en række industrier, f.eks. til sterilisering af emballagematerialer som beholdere, indpakning eller flaskehætter, men kan også anvendes inden for fødevareindustrien (f.eks. industrielt procesvand, drikkevarer og gartnerier). UV-C bestråling kan hovedsageligt anvendes til desinfektion af forskellige processer og produkter, såsom luft til forarbejdnings af kød eller grøntsager; vand, der bliver brugt i senere faser af processen; overflader på friske råvarer som kyllingekød, fisk og æg, og flydende fødevarer som mælk, frugtsaft eller most.

Selvom pasteurisering ved hjælp af UV-lys generelt er på et anvendeligt stadie, kræver sterilisering muligvis yderligere udvikling og optimering af teknologien. Der findes en række nationale teknologileverandører (Water ApS(DK), Naturlig Desinfektion ApS (DK), ULTRAAQUA UV Disinfection Systems(DK), JIMCO A/S (DK), Silhorko (DK)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed høj, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 8-9 for pasteurisering og 6-7 for sterilisering.

6.2.4 Induktiv sterilisering



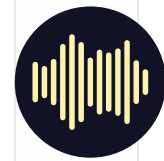
Induktiv sterilisering består i anvendelsen af induktion til at forøge temperaturen på metalliske fødevarebeholdere f.eks. dåser, så de steriliseres. Denne teknologi er enkel,

sikker og pålidelig og tilbyder god temperatur og effektstyring og derved en ensartet ydelse.

Teknologien har udbredt anvendelse i industrier som metalforarbejdning og medicinske udstyr (f.eks. sterilisering af kirurgiske instrumenter), og den kan også bruges inden for fødevareindustrien (f.eks. dåser til fødevarer). Teknologien er imidlertid begrænset til sterilisering af metalliske beholdere.

Der findes teknologileverandører med erfaring indenfor metalforarbejdning og behandling (Nordson (NO)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed medium, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 8-9.

6.2.5 Radiobølgepasteurisering



Radiobølger kan bruges til at opvarme fødevarer med det formål at pasteurisere eller sterilisere dem. Fordelene ved denne teknologi er, at den reducerer varmetabet i varmeledning til omgivelserne, hvilket sparer driftsomkostninger og tid. Teknologien kræver også lav vedligeholdelse. Den har begrænsede negative bivirkninger som nedsat fødevarer- eller sensorisk- kvalitet, og den forventes at være billigere end mikrobølger [28]. Dog kan brugen af de optimale frekvenser være begrænset grundet frekvensbåndene i de enkelte lande.

Indtil videre er der ingen rapporter om kommerciel anvendelse af industriel radiobølgesterilisering, og opskalering er stadig en stor udfordring, men forskningsstudier viser et lovende potentiale [29].

Der findes en række teknologileverandører af radiobølgegeneratore (Kallesøe (DK), Kerone (IN), Thermex-Thermatron (US)), men anvendelsen til pasteurisering bør diskuteres. Generelt er den kommercielle tilgængelighed lav, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 4-5.

Der findes en række teknologileverandører af radiobølgegeneratore (Kallesøe (DK), Kerone (IN), Thermex-Thermatron (US)), men anvendelsen til pasteurisering bør diskuteres. Generelt er den kommercielle tilgængelighed lav, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 4-5.

6.2.6 Kold plasma



Kold plasma (også kaldet lavtemperaturplasma) er en ny, ikke-termisk teknologi, der har udvist et stort potentiale for dekontaminering af fødevarer. Denne teknologi behandler fødevarer ved kold plasmaudladning, hvilket fører til reduktion af antallet af mikroorganismer, og kan endda bruges til nedbrydning af pesticider eller mycotoksiner [30].

Teknologien forventes at kunne anvendes inden for fødevareindustrien, og lovende resultater er opnået under laboratoriebetingelser, men det er ukendt, hvilke mellemprodukter der dannes under nedbrydning af mykotoksiner og andre kemiske forbindelser. Der er stadig behov for opskalering af hele processen til industriel skala.

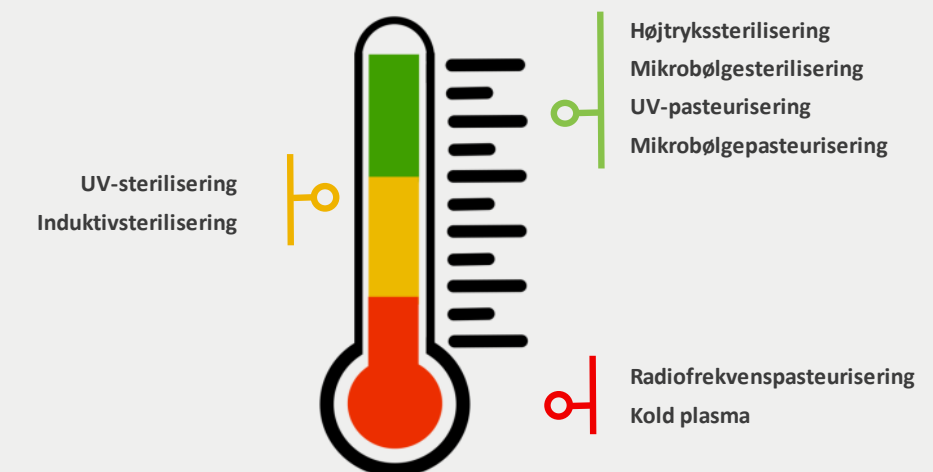
Generelt er teknologien ikke kommercielt tilgængelig, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 3-4.

Generelt er teknologien ikke kommercielt tilgængelig, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 3-4.

6.3 Diskussion

Steriliserings- og pasteuriseringsprocesser har et forøget krav til udskiftning, da de typisk kræver højere temperaturer. Et antal teknologier baseret på elektromagnetiske bølger er allerede tilgængelige (f.eks. mikrobølge og UV) eller under udvikling (f.eks. radiobølge), men deres anvendelse kan være begrænset til specifikke anvendelser (f.eks. UV til flydende produkter eller pakker). Mikrobølger kan anvendes sikkert til sterilisering / pasteurisering, men den største begrænsning kan komme fra den kommercielle tilgængelighed af mikrobølgegeneratore i relevante kapaciteter. Højtrykspasteurisering er kommercielt tilgængelig og kan medføre betydelige fordele for varmefølsomme produkter.

Generelt er anvendeligheden af disse teknologier til pasteurisering udviklet, men deres anvendelse til sterilisering kræver yderligere udvikling på grund af de øgede sikkerhedskrav.



TEKNOLOGI MODENHED - STERILISERING/PASTEURISERING

Figur 6 Modenhed af elektrificeringsteknologier til sterilization and pasteurization

7 Destillation og separationsprocesser

7.1 Status

Destillation er en af de primære separationsmetoder i procesindustrien, og generelt er separationsprocesser af særlig interesse, når det kommer til bæredygtig udvikling i industrien på grund af det høje forbrug af energi og vand [31]. Det anslås, at destillationsprocesser er ansvarlige for 3 % af verdens energiforbrug og 10 % af det industrielle energiforbrug [32]. Dette skyldes, at mens adskillelse af faste stoffer kan ske ved vibration- eller pneumatiske- separatorer, der bruger mindre energi, forventes det, at separationsprocesser, hvor væsker er involveret, vil kræve mere energi (f.eks. til at drive varmeinducerende faseskift, tvinge blandinger gennem filtre eller generere centrifugalkræfter).

Destillationsprocesser i fødevareindustrien er almindeligvis målrettet produkter som alkoholholdige drikkevarer, koncentration af æteriske olier og smagsstoffer eller deodorisering af fedt og olier.

7.2 Elektrificeringsteknologier

Separationsprocesser er en fælles betegnelse for de processer, der sigter mod at adskille forskellige komponenter i en blanding. Her refererer vi til separationsprocesser som dem, hvor flydende eller faste komponenter adskilles fra en blanding, mens destillation kan ses som en særlig separationsproces, hvor de komponenter i en flydende blanding adskilles ved hjælp af afkogning og udkondensering.

7.2.1 Mekanisk damprekompresion



Mekanisk damprekompresion er en energigenvindingsproces, der kan bruges til at genbruge overskudsvarme og derved forbedre processens effektivitet ved at komprimere destillationskolonnens udtagsdamp og bruge de kondenserende dampe til at opvarme destillationskolonnen. Denne teknologi har evnen til at flytte store mængder varme mellem kolonnens kondensator og genopvarmningskolonnen med et lille elektricitetsforbrug. Processen har en pålidelig drift, kræver minimal vedligeholdelse, er velegnet til både nybyg og eftermontering, og er ifølge leverandører [33] den mest effektive destillationsproces tilgængelig på markedet.

Processen kan anvendes i industrier som trætørring, papirtørring og den petrokemiske industri, men også indenfor fødevareindustrien (fx mælk, valle, sukker, alkohol, drikkevarer). Dog hindrer den komplekse og dyre installation og høje kapitalinvesteringer teknologiens anvendelse. Processen er også mere effektiv, når der kun er en lille forskel mellem top- og bundtemperaturer i kolonnen.

Der findes en række teknologileverandører af mekanisk dampkompression både lokalt and internationalt (GEA (DK), GIG Karasek (AT), SiccaDania (DK), Haarslev (DK), Epcon (NO), Piller (DE), Howden (US), Sulzer (CH)), dog skal deres erfaring med integration i destillationskolonner verificeres. Generelt er den kommercielle tilgængelighed høj, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 7-9.

7.2.2 Mekanisk vakuumdampkompression



Mekanisk vakuumdampkompression er en destillationsproces, hvor fordampning af hav- eller brakvand opnås ved anvendelse af varme leveret af damp komprimeret ved hjælp af en centrifugalkompressor. Saltvand fordampes ved subatmosfærisk tryk på den ene side af varmeveksleroverfladen, og på den modsatte side kondenseres det til ferskvand, der opsamles som et produkt fra processen. Denne teknologi har generelt et meget lavt specifikt energiforbrug.

Teknologien anvendes i industrien som vandrensning nedstrøms fra olieindustri, raffinaderier, petrokemiske anlæg og industrier, som cement eller kemiske anlæg, men den anvendes også indenfor fødevareindustrien (f.eks. af saltning af vand før yderligere brug). Dog forhindrer dens komplekse og dyre installation og høje kapitalinvestering teknologiens anvendelse.

Der findes få teknologileverandører af mekanisk vakuumdampkompression i Europa (AlfaLaval (SE), Aquaswiss (CH)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed lav, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 8-9.

7.2.3 Membrandistillation



Membrandistillation er en proces, hvor drivkraften for separationsprocessen er dampens partialtryksgradient over membranen (membranen er ikke selektiv set fra separationsprocessens, det er ligevægten mellem væske og damp, der styrer separationsprocessen). Denne teknologi tilbyder et billigt, energibesparende destillat af høj kvalitet (100 % af ioner, makromolekyler, kolloider, celler og andre ikke-flygtige komponenter kan adskilles). Teknologien har lave driftstemperaturer og kan køres med spildvarme.

Teknologien kan anvendes i industrier som spildevandsbehandling, koncentration af organiske og biologiske opløsninger og bioraffinaderier [34], men også indenfor fødevareindustrien (f.eks. koncentration af juice). Membranselektiviteten er imidlertid for lav, membranernes progressive fugtighed er en udfordring, og dette vanskeliggør anvendelsen i industriel skala, og teknologien er stadig langt fra at opfylde forventningerne [34].

Industrielle teknologileverandører kan findes til laboratorieopstillinger (Memsys (DE), Sterlitech (US)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed lav, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 6-7.

7.2.4 Elektrodialyse



Elektrodialyse er en type membranseparationsproces baseret på ionbytningsmembraner (IE), hvorigennem ioniske forbindelser overføres mellem to opløsninger med anvendelse af en forskel i potentiale. Denne teknologi giver lavere termisk skade på produktet, reducerer energiforbrug i forhold til traditionelle teknologier og har lavere investeringsomkostninger [35].

Den kan anvendes i industrien som vandafsaltning, men der findes også en række anvendelser inden for fødevareindustrien, hvor det er en velkendt teknologi til demineralisering af fødevareropløsninger. Det kan også bruges til reduktion af syreindholdet i frugtsaft, reduktion af salt i sojasovs, demineralisering af valle og syregeving. Imidlertid er størstedelen af de nye implementeringer af denne teknologi endnu ikke på industriel skala, og det kan øge risikoen for aflejringer, der skal løses [35].

Industrielle teknologileverandører kan findes internationalt (Novasep (CN), PCCell (DE), C-Techn Innovation (UK)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed middel, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 7-9.

7.2.5 Varmepumpe-assisteret destillation



Varmepumpe-assisteret destillation består i at integrere en mekanisk varmepumpe i en destillationskolonne, så dampen, der forlader den øverste bakke, komprimeres til et højere tryk og derefter bruges til at opvarme bundvæsken eller væsken, der forlader den nederste bakke. Alternativt kan væsken fra den nederste bakke ekspanderes og bruges til at afkøle udtagsdampen. Denne teknologi giver en betydelig reduktion af den nødvendige energi til destillation takket være varmepumpekonceptet, som er relativt let at introducere (egnet til både eftermontering og nybygning) og har en enkel struktur og drift [19].

Denne teknologi kan anvendes i industrier som den kemiske-, farmaceutiske- og biokemiske-industri, men den kan også anvendes inden for fødevareindustrien (fx koncentrering af alkohol) [19]. Det kræver dog høje kapitalinvesteringer, og teknologiens udvikling er ny opstartet, så en række potentielle udfordringer er stadig uafklarede [19].

På nuværende tidspunkt er implementeringen af denne teknologi i det meget tidlige stadie. I fremtiden bør en løsning af denne type arrangeres med industrielle teknologileverandører af varmepumper til mellemhøje temperaturniveauer (fx Viking Heating Engines AS (NO), Ochsner (DE), Hybrid Energy (NO), Combitherm (DE), Dürr thermea (DE)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed lav, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 0-2.

7.2.6 Centrifugalseparation

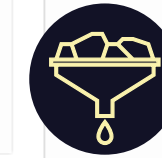


Centrifugalseparation består af en anordning, der adskiller partikler fra suspensioner (inklusive makromolekyler fra opløsninger) i henhold til deres størrelse, form og densitet ved hjælp af kunstigt inducerede tyngdekraftsfelter. Denne teknologi tilbyder en kompakt installation, kan implementeres i in-line-drift og gå forud for en termisk destillation, hvilket reducerer den nødvendige varme til destillationen. Teknologien er velegnet til mange forskellige typer blandinger og slam.

Den kan anvendes til adskillelse af fine mineraler og forarbejdning af mineralolie, men den kan også anvendes inden for fødevareindustrien (f.eks. adskillelse af fløde fra mælk, reducerer antallet af bakterier i rå mælk, afklaring af olier, proteinudvinding) Det er dog kun egnet, når blandingens komponenter har forskellige densiteter og har yderligere et højt energiforbrug, betydelig støjgenerering og kræver speciel vedligeholdelse [31].

Industrielle teknologileverandører kan findes lokalt (Aage Christensen (DK), GEA (DK), Tetrapak (SE), Centrimax (DE), Rousselet Robotel (FR)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed høj, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 9.

7.2.7 Filtrering (Mikrofiltrering (MF) / Ultrafiltrering (UF) / Nanofiltrering (NF) / Omvendt Osmose (OO))



Filtrering består af anvendelse af membraner, der overvejende fungerer krydsstrøms, hvor væskestrømmen er parallel med membranoverfladen. Dette skaber to strømme, permeatet og retentatet eller koncentratet. Teknologiens ydeevne afhænger af membranselektiviteten (f.eks. porestørrelse) og af permeatstrømmen (f.eks. afhængig af tryk, fødestrøm). Forskellige typer membraner har forskellige porestørrelser (f.eks. mikrofiltrering (MF), ultrafiltrering (UF), nanofiltrering (NF)) og har yderligere forskellige egenskaber (f.eks. ioner, der trænger tilbage med omvendt osmose (RO)). Filtreringsteknologi tilbyder ensartet separationskvalitet, lavt trykfald, temperaturbestandighed og lang membranlevetid.

Teknologien kan anvendes i industrier som behandling af spildevand, produktion af aluminium, zink og nikkel [36] men også inden for fødevareindustrien. Anvendelsen afhænger af typen af membran. For eksempel afklaring af juice (UF), opkoncentrering af juice til sirup (RO), fjernelse af bakterier og sporer fra mælk (MF), adskillelse af kaseinrige og valleproteinrige fraktioner af mælk (MF), afsyring og demineralisering af ostevalle (NF), koncentrering af æggehvite og helæg (RO / UF) eller separering af phospholipid i spiselige olier. Dog er membranernes primære udfordring aflejringer på membranen, hvilket medfører en reduktion i fluxhastighed og produktivitet over tid. Dette kan delvist løses ved tilbagestrømning eller kemiske rengøringsprocesser, men dette øger også driftsomkostninger og genvinder ikke membranen effektivitet fuldstændigt [37].

Industrielle teknologileverandører kan findes lokalt og internationalt (SiccaDania (DK), SD Filtration (DK), Ahlstrom-Munksjö (SE), Lenntech (US), Delta Pure (US)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed høj, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 7-9, afhængigt af membranteknologien.

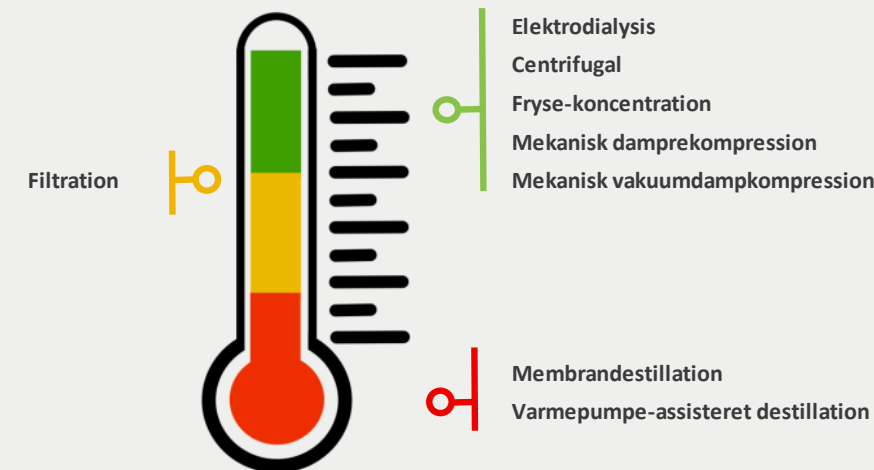
7.2.8 Frysekoncentrering



Frysekoncentrering består i fjernelse af vand ved at krystallisere det til faste iskrystaller med et kølesystem og derefter adskille krystallerne ved hjælp af filtre eller centrifuger. Denne teknologi tilbyder et endelige produkt af høj kvalitet, da der ikke er nogen termisk beskadigelse og minimalt tab af flygtige stoffer [38].

Det er blevet anvendt til afsaltning, men det har også anvendelser indenfor fødevareindustrien (f.eks. koncentrering af frugtsaft, kaffe- og teekstrakter og aromaekstrakter). Imidlertid kan høje køleomkostninger og kapitalomkostninger for udstyr til håndtering af frosne faste stoffer og høje driftsomkostninger hindre deres anvendelse. Koncentrationsgraden er ofte højere end ved membranprocesser, men den er lavere end ved fordampningsprocesser [39].

Industrielle teknologileverandører kan findes (GEA (DK), Cool separations (NL)). Generelt er den kommercielle tilgængelighed middel, og teknologiens modenhed forventes at have en TRL på 7-9.



TEKNOLOGI MODENHED - DESTILLATION/SEPARATION

Figur 8 Modenhed af elektrificeringsteknologier til separation / destillation

7.3 Diskussion

Figur 8 viser modenhedsniveauerne for elektrificeringsteknologierne til separation og destillation. Selvom destillation er et specielt tilfælde af en separationsproces, er de teknologier, der er relevante for destillation væsentligt forskellige fra dem, der anvendes i separation af faste stoffer og væske. Når det kommer til destillation, ligner de tilgængelige teknologier dem ved fordampningsprocesser, da der benyttes høje temperaturer til at fordampe blandingskomponenterne. Både mekanisk dampkompression og mekanisk vakuumdampkompression er modne teknologier, der giver betydelige energibesparelser. Dog kan deres installationsomkostninger være den største barriere for deres implementering. Varmepumper kan også opnå relevante energibesparelser, men et integreret design til destillationskolonner er stadig i de tidlige stadier. Derudover fremstår membrandestillation som en lovende teknologi, der er i stand til at adskille komponenter i flydende blandinger uden at bruge høje temperaturer og tilmed med høj ydeevne, men teknologien synes stadig at være langt fra anvendelse i industriel skala.

Når det kommer til adskillelse af faste stoffer og væsker, er de tilgængelige teknologier generelt modne teknologier. Centrifugalseparation og frysekoncentration er effektive teknologier til at adskille komponenter uden brug af høje temperaturer, men de kan dog medføre højere investerings- og driftsomkostninger end traditionelle teknologier. Elektrodialyse er også en velkendt teknologi, men kan være begrænset til de anvendelser, hvor udveksling af ioner er målet. Endelig findes en række membranfiltreringsteknologier, der kan grupperes efter membranernes porestørrelse.

Selvom membraner anvendes i industrien i dag, kan dem med mindre porestørrelser og deres anvendelse i visse fødevareprocesser stadig kræve yderligere udvikling.

8 Konklusion

Denne rapport præsenterer en gennemgang af de elektrificeringsteknologier, der kan erstatte energiintensive og fossile teknologier i forskellige processer i fødevareindustrien. Industrielle processer med et højt energiforbrug i den danske fødevareindustri benyttes som udgangspunkt for at diskutere de forskellige teknologier, der kan omdanne energiforsyningen i eksisterende industrier til elektricitet.

Teknologierne diskuteres med hensyn til deres fordele og udfordringer samt deres anvendelsesområder, og deres modenhed vurderes fra de tidlige udviklingsstadier til deres fulde gennemførelse i industrielle anlæg. Med udgangspunkt i denne undersøgelse kan der drages følgende konklusioner:

- Der findes en lang række elektrificeringsmuligheder til industrielle processer, og mange af dem er tilgængelige på markedet. Generelt kræver alle teknologier en betydelig investeringsomkostning, hvilket kan være den første barriere for deres implementering. Dog vil mange af teknologierne reducere driftsomkostningerne betydeligt sammenlignet med traditionelle teknologier, og tilbagebetalingstiderne kan dermed reduceres.
- Som en generel regel kan nemt implementerbare teknologier (dvs. teknologier som er enkle at installere) formentlig tilbyde en hurtig elektrificeringsløsning, potentielt med lavere investeringsomkostninger. Dog kan disse have højere driftsomkostninger, især hvis elprisen stiger i fremtiden. Dette er tilfældet for elektriske varmeapparater, elektrokedler og ohmske varmeapparater.
- Andre velkendte teknologier som er modne og tilbyder betydelige energibesparelser, er muligvis ikke attraktive i udgangspunktet grundet deres komplekse installation og høje investeringsomkostninger. Dette ville være tilfældet for teknologier, der integrerer mekanisk dampkomprimering eller varmepumper. Ikke desto mindre er det bevist, at disse teknologier vil reducere driftsomkostningerne betydeligt og vigtigst af alt øge energieffektiviteten i de processer, de anvendes i.
- Andre typer teknologier giver mulighed for hybridløsninger, som kan hjælpe med at introducere elektrificering i industrielle processer, mens de stadig fungerer i kombination med de eksisterende teknologier. Løsninger baseret på elektromagnetisk opvarmning (f.eks. IR, mikrobølgeovn) og induktion kan give en nem implementering af elektrificering til lavere omkostninger som hybridløsninger. Desuden forventes det, at mange af disse løsninger vil medføre betydelige tids- og energibesparelser.
- En række teknologier som impulstørring eller radiofrekvenspasteurisering er i de tidlige udviklingsstadier. Resultaterne fra laboratorie- og pilotskalaanlæg giver dog lovende resultater. Det forventes, at disse teknologiers modenhed vil stige i de kommende år, og potentielt vil de bidrage til markedet for elektrificeringsteknologier til industrien.



8.1 Elektrificeringsmuligheder på kort sigt

Hybridelektrificeringsløsninger, der består af at kombinere en elektrificeringsteknologi i en eksisterende installation uden at fjerne den fuldt ud, kan medføre to fordele for elektrificering på kort sigt. For det første, da elektrificeringsteknologien kun sigter mod at udføre én del af processen, vil den nødvendige kapitalinvestering være lavere, og yderligere vil installationen formentlig kræve mindre ændringer af den eksisterende proces. Derved kan man opnå energibesparelser uden behov for et fuldstændigt redesign af processen. For det andet kan hybridsystemer, hvori andelen af hver teknologi kan kontrolleres, give klienten muligheden for at bruge elektrificeringsalternativet, når der forventes perioder med lavere elpriser.

8.2 Elektrificeringsmuligheder på lang sigt

Elektrificering af processer på lang sigt skal evalueres nøje for specifikke industrielle processer, da det her kan være mere værd at investere i dyrere teknologier som mekanisk dampkompression eller varmepumper end at anvende teknologier, der er lette at installere som elektriske varmeapparater.

9 Referencer

- [01] Renewable I, Agency E. ELECTRIFICATION Driving the transformation n.d.
- [02] Bühler F, Holm FM, Elmegaard B. Potentials for the electrification of industrial processes in Denmark. ECOS 2019 - Proc 32nd Int Conf Effic Cost, Optim Simul Environ Impact Energy Syst 2019:2137–52.
- [03] The future use of the gas infrastructure [In Danish: Den frem- tidige anvendelse af gasinfrastrukturen]. Energistyrelsen; 2014.
- [04] Bühler F, Zühlsdorf B, Nguyen T Van, Elmegaard B. A comparative assessment of electrification strategies for industrial sites: Case of milk powder production. Appl Energy 2019;250:1383–401. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.071>.
- [05] Arpagaus C, Bless F, Uhlmann M, Schiffmann J, Bertsch S. High temperature heat pumps : Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. Energy 2018;152:985–1010. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.166>.
- [06] Jadun P, McMillan C, Stenberg D, Muratori M, Vimmerstedt L, Mai T. Electrification Futures Study : End-Use Electric Technology Cost and. Natl Renew Energy Lab 2017:109.
- [07] den Ouden B, Lintmeijer N, van Aken J, Afman M, Croezen H, van Lieshout M, et al. Electrification in the Dutch process industry. http://www.lsp.eu/Media/Electrification-in-the-Dutch-Process-Industry-Final-Report-DEF_LRPdf_2017.80.
- [08] Kivevele T, Huan Z. A review on opportunities for the development of heat pump drying systems in South Africa. S Afr J Sci 2014;110. <https://doi.org/10.1590/sajs.2014/20130236>.
- [09] Mujumdar A, Osman P. Handbook of Industrial Drying. Industry 2006:1–1312.
- [10] Minton PE. Handbook of evaporation technology. 1986.
- [11] Minea V. Industrial drying heat pumps. 2017.
- [12] Efremov G. 10 Infrared Drying 2014;5:317–55.
- [13] Motevali A, Minaei S, Khoshtagaza MH. Evaluation of energy consumption in different drying methods. Energy Convers Manag 2011;52:1192–9. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.09.014>.
- [14] GH Induction - Drying n.d. www.ghinduction.com/process/drying.
- [15] Bowornprasittikun M, Thanamai T, Nutwong S, Sangswang A, Naetiladdanon S. Induction food dehydrator with temperature control. 2019 Int. Electr. Eng. Congr., 2019.
- [16] Chauhan OP, Sayanfar S, Toepfl S. Effect of pulsed electric field on texture and drying time of apple slices. J Food Sci Technol 2018;55:2251–8. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3142-x>.
- [17] Herceg Z. Application of Ultrasonics. Conv. Adv. Food Process. Technol., n.d.
- [18] Directive IE. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Food , Drink and Milk Industries. 2019.
- [19] Jana AK. Advances in heat pump assisted distillation column: A review. Energy Convers Manag 2014;77:287–97. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.055>.
- [20] El-mashad HM, Pan Z. Application of Induction Heating in Food Processing and Cooking 2017:82–90. <https://doi.org/10.1007/s12393-016-9156-0>.
- [21] Raaholt BW, Holtz E, Isaksson S, Ahrné L. Application of Microwave Technology in Food Preservation and Processing. Conv. Adv. Food Process. Technol., n.d.
- [22] Das I, Das SK. Infrared in preservation and processing. Conv. Adv. Food Process. Technol., 2002.
- [23] Matser AM, Krebbers B, Van Den Berg RW, Bartels P V. Advantages of high pressure sterilisation on quality of food products. Trends Food Sci Technol 2004;15:79–85. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.08.005>.
- [24] Status C. High Pressure Processing : Current Status. Conv. Adv. Food Process. Technol., 2015.
- [25] Ahmed J, Ramaswamy H. Microwave Pasteurization and Sterilization of Foods 2007:691–711. <https://doi.org/10.1201/9781420017373.ch28>.
- [26] Guo Q, Sun DW, Cheng JH, Han Z. Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry. Trends Food Sci Technol 2017;67:236–47. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.07.007>.
- [27] Choudhary R, Bandla S. Ultraviolet Pasteurization for Food Industry Ultraviolet Light in Food 2012;2:12–5. <https://doi.org/10.5923/j.food.20120201.03>.
- [28] Altemimi A, Aziz SN, Al-Hilphy ARS, Lakhssassi N, Watson DG, Ibrahim SA. Critical review of radio-frequency (RF) heating applications in food processing. Food Qual Saf 2019;3:81–91. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyz002>.
- [29] Orsat V. Radio -frequency thermal treatments for agri -food products. ProQuest Diss Theses 1999:270.
- [30] Pankaj SK. Effects of Cold Plasma on Food Quality : A Review 2018. <https://doi.org/10.3390/foods7010004>.
- [31] Pouliot Y, Conway V, Leclerc P. Separation and Concentration Technologies in Food Processing. Food Process. Princ. Appl., 2014, p. 33–60.
- [32] Kazemi A, Hosseini M, Mehrabani-Zeinabad A, Faizi V. Evaluation of different vapor recompression distillation configurations based on energy requirements and associated costs. Appl Therm Eng 2016;94:305–13. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.042>.
- [33] Hänggi D, Meszaros I, Chemtech S. Vapor Recompression: Distillation without Steam. Sulzer Tech Rev n.d.;1–99:3834.
- [34] Souhaimi MK, Matsuura T. Membrane Distillation. Membr Distill 2011. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-17487-1>.
- [35] Wang Y, Jiang C, Bazinet L, Xu T. Electrodialysis-based separation technologies in the food industry. Elsevier Inc.; 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815056-6.00010-3>.
- [36] Skelton R. Membrane filtration applications in the food industry. Filtr Sep 2000;37:28–30. [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(00\)88494-3](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(00)88494-3).
- [37] Lee Y. Membrane & other separation technologies and their application to food technology. Int. Conf. Expo Sep. Tech., vol. 6, 2015, p. 39. <https://doi.org/10.1201/9781420036459.ch3>.
- [38] Petzold G, Aguilera JM. Centrifugal freeze concentration. Innov Food Sci Emerg Technol 2013;20:253–8. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.05.010>.
- [39] Englezos P. The Freeze Concentration Process and its Applications. Dev Chem Eng Miner Process 1994;2:3–15. <https://doi.org/10.1002/apj.5500020102>.

