

Utnyttelse av spillvarme i Lista Renewable Energy Park

Oppdragsgiver:

Lista Renewable Energy Park

Forfattere:

Vetle Kjær Risinggård og Ellen Nordgård-Hansen



Rapporttittel	Utnyttelse av spillvarme i Lista Renewable Energy Park
Prosjektnummer	103166
Institusjon	NORCE Norwegian Research Centre AS
Oppdragsgiver	Lista Renewable Energy Park
Gradering	Åpen
Rapportnr	4-2020, NORCE Teknologi
Antall sider	19
Publiseringsmnd.	september 2020
CC-lisens	CC BY 4.0
Geografisk område	Agder, Norway
Bildekreditering	Lista Renewable Energy Park

Sammendrag

I denne rapporten er det sett på utradisjonelle bruksområder for spillvarme fra en battericellefabrikk med temperatur fra 35–40 °C og opp mot 80 °C. Mellomlagring av spillvarme for utjevning av variasjoner i produksjon eller forbruk kan gjøres i industriell skala og bør vurderes. Direkte bruk av varmen til oppvarming eller tørking kan også gjøres med gode virkningsgrader. Spesielt nevnes tørking av tømmer for trekullproduksjon som en relevant anvendelse. Videre er kjøling og renseprosesser spennende områder. Vannrensing kan være aktuelt for landbasert oppdrett eller akvaponi. Absorpsjonskjøling kan blant annet være aktuelt for bruk i et datasenter. Det anbefales også en grundig gjennomgang av mulighetene for å redusere mengden spillvarme ved best mulig varmeintegrasjon internt i battericellefabrikken.

Revisjoner

Rev./ Rev.	Dato/ Date	Forfatter/ Author	Kontrollert av/ Checked by	Godkjent av/ Approved by	Årsak til revisjon/ Reason for rev.
0.1	4.8.2020	ENOR			Første versjon
0.4	24.8.2020	VERI	ENOR		Utkast sendt til kunde
0.5	28.8.2020	VERI			Oppdatert utkast
1.0	18.9.2020	VERI	ENOR		Endelig rapport

Ansvarsavgrensing

NORCE er ikke i noen henseende ansvarlig for den aktuelle bruk av dokumenter, programvare eller andre verktøy eller prosjektresultater og påtar seg derved intet ansvar eller garanti for den helhetlige funksjonalitet ved bruk av informasjonen om dette ikke er spesifikt angitt i tilbudsdokumentet og den etterfølgende kontrakt.

Innhold

1.	Innledning	4
1.1.	Initiativer på Agder	4
2.	Rammebetingelser	4
3.	Lagring av varme	5
3.1.	Geotermisk lagring.....	5
3.2.	Faseendringsmaterialer	5
4.	Bruk som varme	6
5.	Oppgradering av spillvarme	6
5.1.	Kjemiske varmepumper	7
6.	Bruk som kjøling.....	7
7.	Bruk til tørking.....	9
8.	Bruk til renseprosesser	9
8.1.	Membrandestillasjon	10
8.2.	Destillasjon med flertrinnsinndampere	10
8.3.	Adsorpsjon	11
9.	Elektrisitetsproduksjon	11
9.1.	Organisk Rankine-syklus	12
9.2.	Zeotrop Rankine-syklus.....	12
9.3.	Kalina-syklus.....	13
9.4.	Superkritisk Rankine-syklus	14
9.5.	Stirling-motorer og termoelektriske generatorer	14
10.	Konklusjon.....	14
11.	Referanser	15

1. Innledning

Oppdragsgiver ønsker å legge til rette for etablering av industri, herunder prosessindustri, battericellefabrikk og datasenter på Lista. Den planlagte industrien vil forbruke en effekt i størrelsesorden 200 MW. Mye av denne effekten vil ende opp som varmtvann og representerer en betydelig energiressurs. Entalpien vil være relativt lav, siden typiske temperaturer ligger i området 35–40 °C, selv om noe av vannet vil ha temperaturer opp mot 80 °C. Målet med dette prosjektet er å identifisere muligheter for en effektiv bruk av denne spillvarmen.

Gjenbruk av spillvarme fra industribedrifter er ikke et nytt konsept. Det som er nytt i dette prosjektet er at den planlagte industrien representerer en veldig stor kilde til spillvarme med veldig lav entalpi. Dette skaper særegne utfordringer for effektiv utnyttelse.

Prosjektet skal kartlegge aktuelle teknologier og virksomheter for utnyttelse av spillvarmen fra en ny battericellefabrikk. En viktig del av prosjektet er å kartlegge den teknologiske modenheten til de foreslåtte løsningene. I dette ligger det også å kartlegge forskningsbehovet for å realisere løsningene.

1.1. Initiativer på Agder

Eydeklyngen bidrar i to relevante prosjekter knyttet til spillvarme og energieffektivitet:

- Med data fra partnerbedriftene og litteraturen arbeider Eydeklyngen med et *Veikart for spillvarme*. Veikartet er en oppdatering av en tidligere undersøkelse gjort for Eydeklyngen i 2010 (se referanse 1), og vil etter planen bli offentliggjort rundt årsskiftet 2020/2021. Veikartet kan være en god kilde til informasjon om utnyttelse av spillvarme i lokale bedrifter. Eyde ser både på situasjonen for spillvarme hos medlemsbedrifter på Agder i dag og på muligheter for bruk av spillvarmen, både internt hos bedriftene og i samspill med andre bedrifter eller nærmiljøet.
- Eydeklyngen er en del av EU-prosjektet INCUBIS^{2,3} der målet er å «hjelp med å øke energieffektiviteten til europeisk industri innen 2050 og på denne måten bidra til reduserte CO₂-utslipp.» Prosjektet har et særlig fokus på spillvarme. Eyde og Agder vil som én av fem inkubatorer i Europa arbeide med lokale energisymbioseprosjekter, det vil si prosjekter som involverer kjøp og salg av overskuddsenergi. Via inkubatorene skal lokale aktører få tilgang til verktøy, ekspertise og opplæring for å finne gode løsninger, for å skaffe midler og for å gjennomføre slike prosjekter.

2. Rammebetingelser

Oppdragsgiver opplyser at effektforbruket til industrien vil være i størrelsesorden 200 MW og at gjennomsnittstemperaturen på varmtvannet vil være omlag 35–40 °C. Med en referansetemperatur på 0 °C (se referanser 4 og 5) tilsvarer dette en varmtvannsproduksjon i størrelsesorden 1 m³/s. Oppdragsgiver opplyser også at noe av vannet kan nå temperaturer opp mot 80 °C.

Siden det er krevende å finne god utnyttelse av store mengder spillvarme ved lav temperatur, anbefales en grundig gjennomgang av mulighetene for å redusere denne energimengden ved best mulig varmeintegrasjon internt i battericellefabrikken og eventuelt mellom ulike prosesser som allerede er planlagt på industriområdet.

Utslipp av varmtvann kan være gjenstand for offentlig regulering. Vannforskriften⁶ gir rammer for fastsettelse av miljømål som skal sikre beskyttelse og bærekraftig bruk av vannressurser. Et sentralt begrep er *økologisk tilstand*, og her inngår temperaturen til vannet. Menneskeskapte forstyrrelser av vanntemperaturen kan altså både juridisk og reelt sett gi en forringelse av den økologiske tilstanden til vannet, noe som vil være i strid med miljømålet i forskriften om at vanntilstanden skal beskyttes mot forringelse.

Kystvannet utenfor Lista ligger i Agder vannregion som administreres av Agder fylkeskommune. Eventuelle bestemmelser for utslipp av varmtvann fra Lista Renewable Energy Park vil trolig ligne tilsvarende bestemmelser for utslipp fra Alcoa Lista.

3. Lagring av varme

Bruk av spillvarme fra den foreslåtte battericellefabrikken i industrielle prosesser stiller krav til forutsigbarhet fra både produsent og forbruker. Det kan derfor være aktuelt å mellomlagre spillvarmen for å unngå at svingninger i produksjon eller forbruk påvirker forbrukere eller produsenten.

Svingninger på døgnbasis kan avhjelpest med en enkel akkumulatortank. Svingninger på ukes- eller årsbasis kan løses med faseendringsmaterialer eller geotermisk lagring.

3.1. Geotermisk lagring

Geotermiske reservoarer i akvifer eller borehull egner seg til lagring av spillvarme for utjevning av årsvariasjoner i produksjon eller forbruk.⁷ Virkningsgraden til et slikt anlegg vil variere med bruksmønster og grunnforhold, men en virkningsgrad på 70% er mulig å oppnå. Geotermisk lagring av varme er en moden teknologi med flere kommersielle tilbydere av utstyr og boretjenester. Dersom en betydelig andel av effekten fra en battericellefabrikk – for eksempel 10 MW – skal lagres som grunnvarme vil anlegget få en størrelse på opp mot 100 GWh/år. Dette er betydelig større enn vanlige anlegg for lagring av varme til oppvarming⁸ og kan stille spesielle krav til anlegget.

Lavlandet på Lista består av israndsavsetninger (løsmasser) med en dybde på 3–30 m i nordlig del og 40–70 m i sørlig del mot sjøen.⁹ Det er imidlertid ikke uvanlig at borehull for lagring av varme i grunnen strekker seg ned mot 250 m, hvilket vil si at en brønnpark kan strekke seg godt ned i grunnfjellet.

3.2. Faseendringsmaterialer

Faseendringsmaterialer kan øke den termiske massen til en bygning, et solkraftverk eller et annet termisk system.^{10,11} Et faseendringsmateriale smelter ved en temperatur nær ønsket temperatur for systemet. Når systemet tilføres energi smelter faseendringsmaterialet og tar opp en forhåndsdefinert energimengde som latent varme

mens systemet holdes ved en konstant temperatur. Når systemet senere tilfører energi til omgivelsene fryser faseendringmateriale og gir fra seg den samme energien mens systemet holdes ved en konstant temperatur.

Faseendringmaterialer benyttes i dag i solkraftverk i 100-MW-klassen til å utjevne døgnvariasjoner i produksjonen.¹¹ Slike kraftverk baserer seg gjerne på saltsmelter med et smeltepunkt på 300–800 °C og kan oppnå eksergivirkningsgrader på opp mot 95%.¹¹ Tilsvarende funksjonalitet ved bruk av spillvarme krever andre faseendringmaterialer. Det er utviklet salter med smeltepunkt ned mot i underkant av 150 °C,¹² og flere vanlige salthydrater har smeltepunkt ned mot 30 °C.¹¹ Ulike typer paraffinvoks er også tilpasset det aktuelle temperaturintervallet.¹⁰

Den teknologiske modenheten til faseendringmaterialer varierer med anvendelsesområde. Lagring av varme ved flere hundre grader celsius i saltsmelter er en etablert teknologi som benyttes i solkraftverk verden over.¹¹ Ulike teknologier for lagring av varme ved noen titalls celsiusgrader nærmer seg kommersialisering.^{13–15}

4. Bruk som varme

Temperaturer på 35–40 °C er optimale for mange biologiske prosesser. Spillvarmen kan derfor brukes direkte til oppvarming av drivhus eller anlegg for alger, fiskeoppdrett eller akvaponi. (*Akvaponi* er et konsept som integrerer oppdrett av akvatiske organismer med produksjon av planter i et felles økosystem. På den måten kan næringsrike avfallstoffer fra oppdretten utnyttes som gjødsel i planteproduksjonen.)

Vann ved rundt 40 °C kan også brukes til å smelte is og snø på veier og plasser¹⁶ eller brukes i fjernvarmeanlegg til oppvarming av bolighus. Mange fjernvarmeanlegg baserer seg i dag på temperaturer rundt 60–80 °C. Varmtvann i bolighus kan benytte seg av lavere temperaturer enn dette. Vannet bør da jevnlig varmes opp til over 60 °C for å forhindre vekst av *Legionella*-bakterier.

Bruk av spillvarmen som fjernvarme og til algedyrking behandles nærmere i egne rapporter.

Varmtvann kan også brukes direkte til oppvarming i andre biobaserte produksjonsprosesser. To eksempler på dette er demonstrasjonsprosjekter for ølproduksjon¹⁷ med varmtvann på 25–105 °C og konseptstudier for fiskemelsproduksjon¹⁸ med varmtvann på 70 °C, begge fra solfangere.

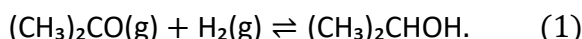
5. Oppgradering av spillvarme

For anvendelser som krever høyere temperaturer enn 35–40 °C er det mulig å heve temperaturen på varmtvannet ved hjelp av en varmepumpe. Om dette er regningssvarende eller ikke vil avhenge av den konkrete anvendelsen. Å oppgradere spillvarmen for å bruke den til å produsere elektrisk strøm vil for eksempel ikke lønne seg fordi temperaturen til spillvarmevannet i utgangspunktet er så nær utetemperaturen at varmepumpen og kraftverket som produserer strømmen vil arbeide over nesten den

samme temperaturdifferansen. I tillegg vil energien gå gjennom mange steg, hvert med sine tap, på veien fra spillvarme gjennom varmepumpen og kraftverket til elektrisk strøm.

5.1. Kjemiske varmepumper

En kjemisk varmepumpe utnytter en reversibel kjemisk reaksjon til å oppgradere termisk energi til en høyere temperatur.¹⁹ Et eksempel på en slik reaksjon er hydrogenering/dehydrogenering av isopropanol og aceton,



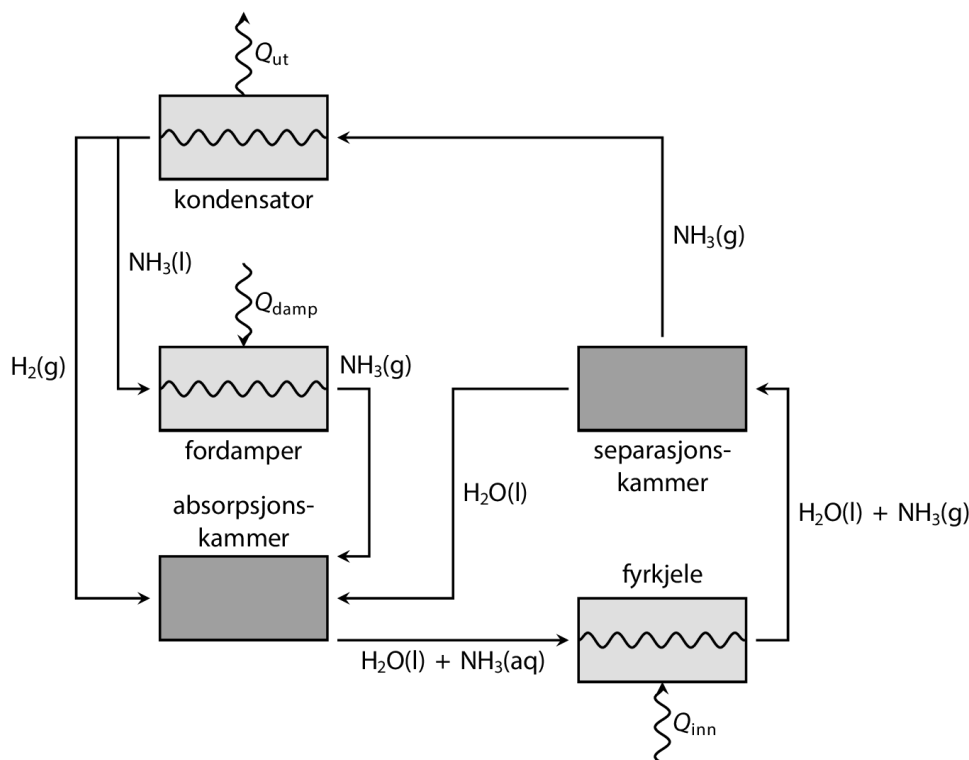
Dehydrogenering av isopropanol, fra høyre mot venstre ovenfor, er en endoterm reaksjon og kan drives ved lave temperaturer ved å tilføre varme fra for eksempel spillvarme. Hydrogeneringsreaksjonen, fra venstre mot høyre ovenfor, er eksoterm og frigir varme ved en høyere temperatur. Denne spesifikke reaksjonen har blitt brukt til å oppgradere spillvarme fra 80 °C til 136 °C med en effektfaktor på 1,8 (se referanse 20). Det finnes imidlertid et bredt spekter av reaksjoner som kan brukes til kjemiske varmepumper,¹⁹ og det er mulig konstruere en kjemisk varmepumpe som kan arbeide ved lavere temperaturer.

Den teknologiske modenheten til kjemiske varmepumper varierer mye med hvilken type reaksjoner som brukes. Varmepumper basert på hydrogeneringsreaksjonen i ligning (1) har nådd demonstrasjonsstadiet,²⁰ mens oppvarming og kjøling med reaksjoner basert på metallhydrider utforskes i akademisk forskning.²¹ Adsorpsjonsreaksjoner har vært forsøkt brukt til å utnytte eksosvarmen fra forbrenningsmotorer til kjøling.²² Absorpsjonsreaksjoner benyttes også først og fremst til kjøling og er en moden teknologi, se avsnitt 7.

6. Bruk som kjøling

Absorpsjonskjøling gjør det mulig å bruke spillvarme direkte til kjøling helt uten mekaniske deler eller forbruk av elektrisk energi.²³ Den tradisjonelle absorpsjonskjøleprosessen er basert på vann og ammoniakk, se Figur 1. Et absorpsjonskjøleskap utnytter vannets evne til å absorbere ammoniakk-gass til å senke damptrykket over den flytende ammoniakken i fordamperen. Når damptrykket blir lavt nok koker ammoniakken. Fordampingsvarmen hentes fra omgivelsene – fordi fordamperen er plassert inne i kjøleskapet gir dette en kjøleeffekt.

Det andre tradisjonelle kjølemediet for absorpsjonskjøling ved siden av vann og ammoniakk ($\text{H}_2\text{O}-\text{NH}_3$) er vann og litiumbromid ($\text{H}_2\text{O}-\text{LiBr}$). Av disse to er vann og ammoniakk i stand til å levere de laveste temperaturene (under 0 °C). Vann og litiumbromid egner seg bedre for moderate temperaturer (luftkondisjonering), men leverer en høyere effektfaktor.²⁴ Begge disse kjølemediene er imidlertid tilpasset varmekilder varmere enn omlag 85 °C.²⁴



Figur 1: Absorpsjonskjøling med vann og ammoniakk. Varmekilden varmer opp en blanding av vann og ammoniakk til den koker. Kokeprosessen drar ammoniakk i gassform og vann i væskeform opp gjennom et tynt rør til separasjonskammeret. Herfra fortsetter ammoniakk-gassen til kondensatoren, mens vannet renner ned i absorpsjonskammeret. Ammoniakk-gassen kondenserer i kondensatoren og gir samtidig fra seg varme til omgivelsene. Deretter renner ammoniakken ned til fordamperen, som befinner seg inne i kjøleskapet. Fordamperen er forbundet med absorpsjonskammeret. Fordi vann spontant absorberer ammoniakk holdes damptrykket i absorpsjonskammeret og fordamperen nede. Dette fører til at flytende ammoniakk kontinuerlig fordamper. Fordampningsvarmen tas fra innsiden av kjøleskapet, og det er dette som gir kjøleeffekten. Blandingen av vann og absorbert ammoniakk slutter syklusen ved å renne videre ned til fyrkjelen. Trykkforskjellene som skapes av at ammoniakken kondenserer og fordamper balanseres av et rør med hydrogengass som forbinder kondensatoren og absorpsjonskammeret.

Andre kjølemedier tillater absorpsjonskjøling ved lavere temperaturer.^{24,25} Både ammoniakk og litiumnitrat ($\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$) og R134a og dimetylacetamid (R134a-DMAC) kan levere brukbare effektfaktorer ned mot $65\text{ }^\circ\text{C}$.^{26,27} Det har også blitt foreslått at metylamin og vann ($\text{CH}_3\text{NH}_2\text{-H}_2\text{O}$) kan brukes helt ned til $60\text{ }^\circ\text{C}$.²⁸ Absorpsjonskjøling med aceton og sinkbromid ($(\text{CH}_3)_2\text{CO-ZnBr}_2$) har blitt demonstrert med en effektfaktor på 0,4 med en varmekilde på $50\text{ }^\circ\text{C}$.²⁹

Absorpsjonskjøling med vann og ammoniakk ($\text{H}_2\text{O-NH}_3$) og vann og litiumbromid ($\text{H}_2\text{O-LiBr}$) er modne teknologier med et bredt spekter av kommersielle tilbydere av løsninger for industriell skala.^{23,24,30} Alternative kjølemedier som $\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$ og R134a-DMAC

gjenstand for akademisk og industriell forskning, men har til nå ikke blitt kommersialisert. Kjølemediene det er snakk om har negative konsekvenser for miljøet ved eventuelle utslipp, og et absorpsjonskjølingsanlegg vil derfor måtte forholde seg til relevante regelverk for å forhindre lekkasjer.

Å produsere kulde med spillvarme fra kjøleanlegg kan virke forlokkende. Nyttene ved et slikt anlegg må imidlertid sees opp mot alternative løsninger. Investerings- og driftskostnadene knyttet til et absorpsjonskjølingsanlegg vil være betydelig høyere enn å kjøle direkte med sjøvann. For bruk internt på battericellefabrikken vil derfor kjøling med sjøvann være mest lønnsomt.

Vannkjøling kan også være relevant for å dekke noe av kjølebehovet til et nærliggende datasenter, men absorpsjonskjøling med spillvarme vil være et relevant alternativ. Absorpsjonskjøling ved hjelp av spillvarme kan også være attraktivt for anvendelser som krever temperaturer som er lavere enn sjøtemperaturen, som for eksempel et kjølelager.

7. Bruk til tørking

Industrielle tørkeprosesser er energiintensive og bruker mye varme. Tørking med varmepumper er utviklet for å redusere energibruken i tørkeprosessene.^{31,32} Spillvarme fra en battericellefabrikk vil være en egnet varmekilde for slike varmepumper. Fordi energien slike varmepumper kan utvinne fra spillvarmen brukes direkte unngår denne anvendelsen problemene som ble nevnt i avsnitt 6.

Varmepumper brukes ofte til tørking av ulike matvarer, men er også brukt til tørking av tekstiler, treverk og keramiske produkter.^{31,32} Tørking av tømmer³³ er en interessant anvendelse av spillvarmen fra en mulig battericellefabrikk på Lista, særlig med henblikk på mulig trekullproduksjon.

Modenheten til varmepumpeteknologi på industriell skala varierer med temperaturen til varmesluket.³⁴ Teknologien for varmesluk med temperaturer lavere enn 100 °C regnes for å være godt utviklet og det finnes ferdige løsninger for salg fra flere ulike tilbydere.³⁵ Varmepumper for bruk over 100 °C kalles høytemperaturvarmepumper.³⁴ En håndfull tilbydere selger høytemperaturvarmepumper i temperaturintervallet 100–150 °C.³⁴ Varmepumper beregnet for varmesluk som er varmere enn 150 °C er under utvikling,^{36–40} og det finnes enkelte pilotinstallasjoner i Europa.⁴¹

8. Bruk til renseprosesser

Renseprosesser som membrandestillasjon, destillasjon med flertrinnsinndampere og adsorpsjon egner seg godt til å utnytte spillvarme med relativt lav temperatur. Et viktig bruksområde for disse metodene internasjonalt er avsalting av sjøvann. Selv om nettopp denne anvendelsen ikke er aktuelt i forbindelse med en batterifabrikk, kan lignende prosesser være aktuelle i forbindelse med samlokaliserte virksomheter. Mulige eksempler på dette kan være vannrensing i forbindelse med landbasert oppdrett eller akvaponi.

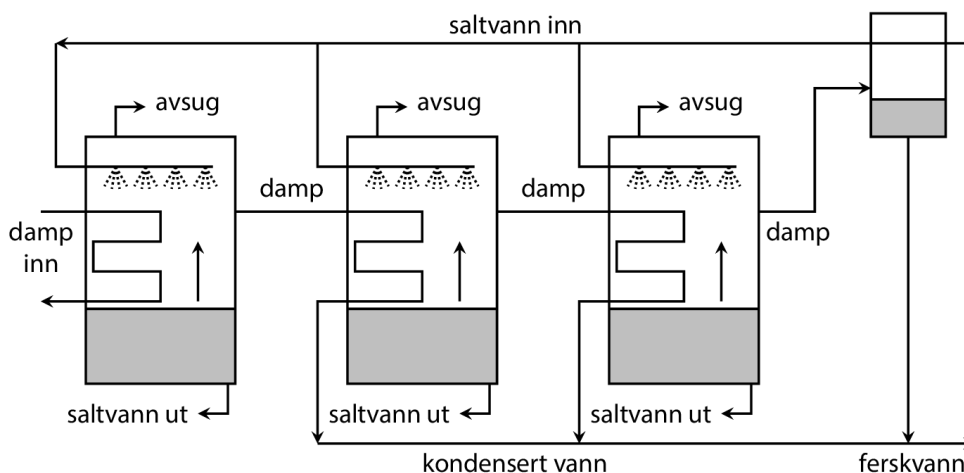
8.1. Membrandestillasjon

Membrandestillasjon utnytter den sterke overflatespenningen til vann. På grunn av overflatespenningen vil vann i væskeform ikke være i stand til å trenge gjennom en hydrofob membran med porestørrelse på noen hundre nanometer. Vannmolekylene er imidlertid mye mindre enn diameteren til en slik pore, og vanndamp vil trenge uhindret gjennom membranen. Dersom en slik membran settes inn mellom to kamre med vann som holder ulik temperatur, vil forskjellen i damptrykk over de to meniskene som trenger seg inn i en pore fra hver sin side av membranen gi en strøm av vann fra det varme til det kalde kammeret. Siden forskjellen i damptrykk kan variere relativt mye med en temperaturforskjell på bare noen titalls grader celsius, er membrandestillasjon egnet til å utnytte spillvarme med lav temperatur.

Membrandestillasjon er brukt til å rense vann eller andre polare væsker for forurensninger som for eksempel makromolekyler, arsenikk eller salt.^{42,43} Teknologien er nylig kommersialisert og det finnes en håndfull tilbydere på verdensbasis.^{43,44} En kjent utfordring som har hindret utbredelsen til teknologien er et relativt høyt energiforbruk, noe som kan være en kostnadsdriver dersom den termiske energien har en pris. Dette vil ikke være et problem ved utnyttelse av spillvarme fra en battericellefabrikk.

8.2. Destillasjon med flertrinnsinndampere

Flertrinnsinndampere utnytter at mesteparten av varmen som må tilføres vann for å fordampe det, er bundet opp i dampen som latent varme. Denne varmen kan tas ut og brukes igjen ved etterfølgende kondensasjon og slik kan destillasjonen utføres i flere trinn,



Figur 2: Destillasjon med flertrinnsinndamper for avsalting av sjøvann. Dampen som sendes inn i prosessen varmer opp saltvannet som sprøytes inn i det første kammeret slik at mye av det fordampes. Dampen tas videre til en varmeveksler i neste kammer der prosessen gjentas og den latente varmen overføres til neste runde med saltvann. Det ferske kondensatet som tas ut av varmeveksleren kan drikkes. I bunnen av hvert kammer tas det ut konsentrert saltvann. Reprodusert fra referanse 45.

se Figur 2. En forutsetning for at denne kaskaden skal fungere er at trykket – og dermed kokepunktet – i neste trinn er lavere enn i det forrige.

Destillasjon ved hjelp av flertrinnsinndampere er en moden teknologi og er en av de vanligste teknologiene for avsalting av sjøvann.⁴⁶ Prosessen kan gjøres enda mer energieffektivt ved å forvarme inngangsstrømmen ved hjelp av spillvarme. Dette har for eksempel vært gjort med spillvarme på 60–75 °C.⁴⁷

8.3. Adsorpsjon

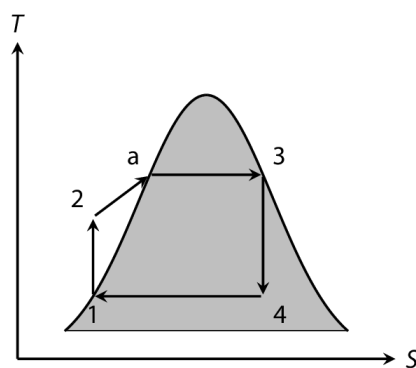
Adsorpsjonsmidler er stoffer som har stor evne til å adsorbere stoffer på overflaten. Et eksempel er amorf silika (SiO_2 ; kjent som silikagel) som gjerne adsorberer vann og brukes som et tørkemiddel. I en lukket beholder ved lavt trykk kan amorf silika senke damptrykket tilstrekkelig til å drive en betydelig fordampning. Vannet frigjøres igjen (desorberes) ved å varme opp silikaen til 55–140 °C.⁴⁸ Ved gjentatte adsorpsjons- og desorpsjonssykluser er det på denne måten mulig å rense vannet, for eksempel for avsalting. Andre vanlige hydrofile adsorpsjonsmidler er aktivt kull og aktivt alumina (Al_2O_3). Blekejord brukes i filtreringsprosesser for å rense vegetabiliske og animalske oljer samt mineraloljer ved adsorpsjon.

Dersom desorpsjonstemperaturen er tilstrekkelig lav, er det mulig å bruke spillvarme til å drive renseprosessen. Avsalting av sjøvann har vært utført med amorf silika som adsorbent og spillvarme med temperaturer på 50–85 °C.⁴⁸ Effektiviteten til prosessen kan økes ved å kombinere den med flertrinnsinndampere.⁴⁹

Ulike renseprosesser basert på adsorpsjon har svært ulik teknologisk modenhet. Filtrering med blekejord er gammel og moden teknologi som tilbys kommersielt av en rekke tilbydere. Vannrensing med amorf silika er en mye yngre teknologi som nå testes i pilotskala.^{48,49}

9. Elektrisitetsproduksjon

Den klart viktigste termodynamiske syklusen for elektrisitetsproduksjon er Rankine-syklusen.⁵⁰ Rankine-syklusen utnytter at det krever mindre arbeid å trykksette en væske enn å trykksette den tilsvarende gasmengden, se Figur 3. Ved å trykksette en væske før den varmes opp til over kokepunktet kan det dermed tas ut en større mengde arbeid når en lar gassen ekspandere gjennom turbinen enn den som brukes for å drive pumpen. Dette utnyttes i dampkraftverk verden over. Vanlige kilder til varme for å drive dampkraftverket er kull og kjernekraft.



Figur 3: T–S-diagram for Rankine-syklusen. I det skraverte området er det en blanding av væske og gass. Til venstre er arbeidsmediet i væskeform, til høyre er det i gassform. Toppunktet angir det kritiske punktet til arbeidsmediet. I Rankine-syklusen komprimeres væsken (1 → 2) før den varmes opp til den har fordampet helt (2 → 3). Deretter ekspanderer gassen gjennom turbinen (3 → 4) før den kjøles, kondenserer og er klar til en ny syklus (4 → 1).

9.1. Organisk Rankine-syklus

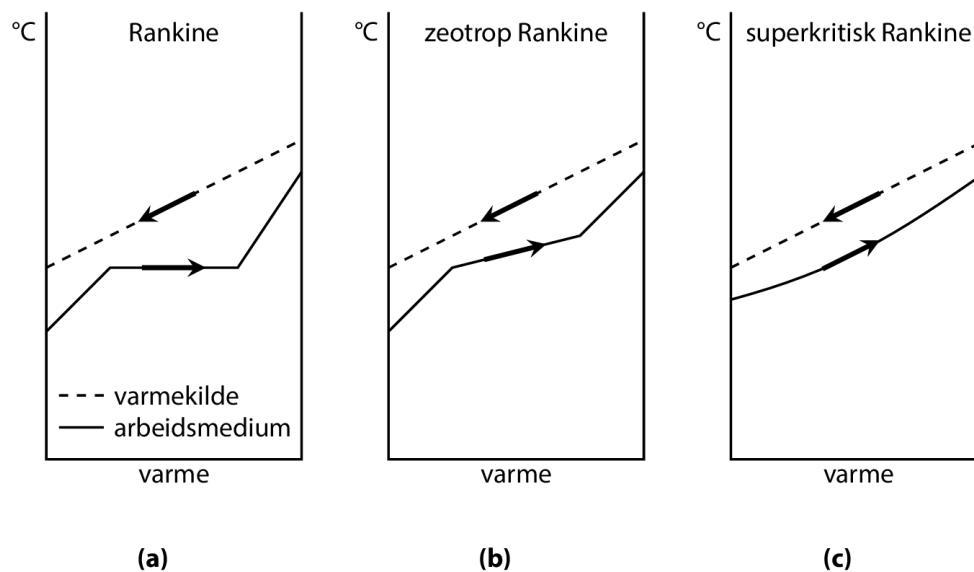
Kokepunktet til vann er 100 °C ved et trykk på én atmosfære og øker med økende trykk. Dampkraftverk trenger derfor varmekilder med temperaturer på flere hundre celsiusgrader. Den organiske Rankine-syklusen utnytter at andre arbeidsmedier – særlig organiske forbindelser – har lavere kokepunkt.⁵¹ De fleste organiske Rankine-sykluser krever likevel varmekilder med temperaturer på mer enn 80 °C, men det finnes prosesser som kan nyttiggjøre seg varmekilder med temperaturer ned mot 60 °C.⁵¹

Den organiske Rankine-syklusen er en moden teknologi og det er flere tilbydere som selger ferdige løsninger, særlig for kommersiell storskala.^{4,5}

9.2. Zeotrop Rankine-syklus

I en varmeveksler som brukes til å varme opp arbeidsmediet i en Rankine-syklus flytter arbeidsmediet og en annen gass eller væske i hver sin retning og utveksler varme gjennom en rørvegg. Mens temperaturen til gassen eller væsken som tar varme inn i varmeveksleren synker etter hvert som den gir fra seg varme, holdes temperaturen til arbeidsmediet konstant mens det fordampes. Dette kan føre til en relativt stor temperaturforskjell mellom arbeidsmediet og varmekilden mot slutten av fordampingen, se Figur 4, noe som gjør prosessen mindre reversibel, øker entropiproduksjonen og reduserer virkningsgraden.⁵²

Det er mulig å oppnå en bedre virkningsgrad med et *zeotrop* arbeidsmedium.⁵² En zeotrop væske er en blanding av to væsker med ulike kokepunkt, for eksempel ammoniakk og vann. Boblepunktet til en slik blanding ligger mellom kokepunktene til de to væskene. Når blandingen når boblepunktet begynner den mest flyktige av de to væskene å fordampe. Det fører til at blandingsforholdet endres og boblepunktstemperaturen øker. Blandingen koker dermed over et *intervall* av



Figur 4: Varmeveksling med ulike arbeidsmedium. (a) Når arbeidsmediet består av et rent stoff koker det ved en konstant temperatur. Det gir en relativt stor temperaturforskjell mellom arbeidsmediet og varmekilden mot slutten av fordampingen. (b) Når arbeidsmediet er en zeotrop blanding koker det over et intervall av temperaturer. Det gir en mindre temperaturforskjell mot slutten av fordampingen. (c) Når arbeidsmediet er superkritisk går det fra væske til gass uten en faseovergang. Uten knekkpunktene som skyldes faseovergangen blir temperaturforskjellen mellom arbeidsmediet og varmekilden ytterligere redusert. Reproduisert fra referanse 53.

temperaturer og ikke ved én gitt temperatur, se Figur 4. Et zeotropt arbeidsmedium vil derfor gi en mer reversibel varmeveksling, en lavere entropiproduksjon og en høyere virkningsgrad.⁵²

En zeotrop Rankine-syklus er en Rankine-syklus som benytter et zeotropt arbeidsmedium.⁵² Det vanligste arbeidsmediet er en blanding av vann og ammoniakk, men arbeidsmediet kan også være en blanding av organiske forbindelser. En zeotrop Rankine-syklus med organiske forbindelser krever i de fleste tilfeller varmekilder med temperaturer i overkant av 80 °C, selv om det finnes prosesser som kan nyttiggjøre seg varmekilder helt ned mot 50 °C.⁵²

Zeotrope organiske Rankine-sykluser er gjenstand for akademisk forskning, men har ennå ikke nådd pilotstadiet.⁵²

9.3. Kalina-syklus

Kalina-syklusen er en variant av Rankine-syklusen med en zeotrop blanding av ammoniakk og vann som arbeidsmedium.^{52,54} Temperaturen til varmekilden kan være ned mot 80 °C.

Kalina-syklusen er en kommersielt moden teknologi, men er mindre brukt enn den organiske Rankine-syklusen til tross for at den ofte har en noe bedre virkningsgrad. Dette skyldes dels at teknologien er yngre og dels at Kalina-syklusen er patentert med en

forretningsmodell som går ut på lisensiering. Kalina-syklusen er mest brukt til utnyttelse av geotermisk varme og industriell spillvarme, og det finnes noen tilbydere som selger ferdige løsninger innenfor disse segmentene.⁵

9.4. Superkritisk Rankine-syklus

Det er mulig å oppnå ytterligere forbedringer i varmevekslingen dersom arbeidsmediet er superkritisk⁵³ fordi temperaturforskjellen mellom arbeidsmediet og varmekilden kan reduseres i fraværet av en faseovergang, se Figur 4. Et superkritisk arbeidsmedium gir også bedre arbeidsforhold for turbinen – som ikke utsettes for kondensasjon – og høyere totalvirkningsgrad for prosessen. Karbondioksid⁵³ er det arbeidsmediet i tillegg til vann⁵⁰ som så langt har vært mest utforsket for bruk i en superkritisk Rankine-syklus. Prosessene som er utviklet krever imidlertid for høye temperaturer på varmekilden til at bruk av en superkritisk Rankine-syklus er aktuelt for utnyttelse av spillvarme fra en battericellefabrikk.

9.5. Stirling-motorer og termoelektriske generatorer

I tillegg til ulike versjoner av Rankine-syklusen nevnes også Stirling-motorer og termoelektriske generatorer ofte i forbindelse med utnyttelse av spillvarme til elektrisitetsproduksjon.^{1,4,5} Dette er teknologier med relativt lav teknologisk modenhet som egner seg best for anvendelser i småskala.⁵ De vil derfor ikke være aktuelle i forbindelse med utnyttelse av store mengder spillvarme fra en battericellefabrikk.

10. Konklusjon

I denne rapporten er det sett på en rekke utradisjonelle bruksområdet for spillvarme med temperatur fra 35–40 °C og opp mot 80 °C.

Mellomlagring av spillvarme for utjevning av døgn-, ukes- eller årsvariasjoner kan gjøres i industriell skala med gode virkningsgrader og bør vurderes dersom det er tilstrekkelige variasjoner i produksjon eller forbruk.

Direkte bruk av varmen til oppvarming eller tørking kan også gjøres med gode virkningsgrader. Eksempler på prosesser og virksomheter som kan gjøre seg nytte av spillvarme på denne måten er nevnt i rapporten og det bør undersøkes videre om det er aktuelt for relevante aktører å etablere seg i tilknytning til battericellefabrikken. Spesielt nevnes tørking av tømmer for trekullproduksjon. Egnede varmepumper for tørkeprosessen er tilgjengelige kommersielt eller har nådd pilotstadiet, og det foregår en aktiv utvikling av slike varmepumper i Norge.

Bruk til kjøling, renseprosesser eller kjemiske varmepumper er mindre utviklede, men spennende, områder. Renseprosesser utpeker seg ved at de kan være aktuelle for aktiviteter det allerede er snakk om å etablere i tilknytning til battericellefabrikken. Absorpsjonskjøling kan være aktuelt for bruk i et datasenter, spesielt ved bruk av spillvarme som ligger i den øvre enden av temperaturintervallet som er vurdert her.

Virkningsgraden til elektrisitetsproduksjon ved hjelp av spillvarme i det aktuelle temperaturintervallet vil trolig ligge rundt 5% og tilbakebetalingstiden kan være lang.¹

Siden det er krevende å finne god utnyttelse av store mengder spillvarme ved lav temperatur, anbefales også en grundig gjennomgang av mulighetene for å redusere denne energimengden ved best mulig varmeintegrasjon internt i battericellefabrikken og eventuelt mellom ulike prosesser som allerede er planlagt på industriområdet.

11. Referanser

1. Sørensen, T., Imenes, A. G., Bø, Ø. & Randeberg, E. *Exergi utnyttelse av spillvarme*. <http://teknova.sitegen.no/customers/teknova/files/Spillvarmerapport%202010.pdf> (2010).
2. INCUBIS. INCUBIS – Energy Symbiosis Incubator. <http://www.incub-is.eu> (2020).
3. European Commission. An industrial symbiosis incubator for maximizing waste heat/cold efficiency in industrial parks and districts. *CORDIS – EU research results* <http://cordis.europa.eu/project/id/894800> (2020).
4. Sollesnes, G. & Helgerud, H. E. *Utnyttelse av spillvarme fra norsk industri – en potensialstudie*. (2009).
5. Ragnøy, M. M., Houbak, N. & Christophersen, E. B. *Teknologikartlegging – kraftgjenvinning fra lavtemperatur spillvarme*. (2014).
6. *Forskrift om rammer for vannforvaltningen*. (2007).
7. Banks, D. *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*. (Wiley-Blackwell, 2012). doi:10/d6hn.
8. Gehlin, S., Andersson, O., Chiu, J. N. & Martin, V. Sweden country update on energy storage. in *14th International Conference on Energy Storage* (IEA, 2018).
9. Tønnesen, J. F., Dalsegg, E. & Rønning, J. S. *Geofysiske bakkemålinger på Lista i 2011*. (2012).
10. Baetens, R., Jelle, B. P. & Gustavsen, A. Phase-change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy Build.* **42**, 1361–1368 (2010).
11. Fleischer, A. S. *Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials*. (Springer International Publishing, 2015). doi:10/d5s6.
12. Rambraut, M. Solar Power Molten Salt. *Yara* <https://www.yara.com/chemical-and-environmental-solutions/solar-power-molten-salt/> (2020).
13. European Commission. More effective use of renewables including compact seasonal thermal energy storage. *CORDIS – EU research results* <http://cordis.europa.eu/project/id/295983> (2012).
14. Norges forskningsråd. Clean and efficient wood stoves through improved batch combustion models and CFD modelling approaches – WoodCFD. *Prosjektbanken* <https://prosjektbanken.forskningsradet.no/#/project/NFR/243752> (2015).
15. Norges forskningsråd. PCM-based low-temperature thermal energy storage for a more sustainable food industry – PCM-STORE. *Prosjektbanken* <https://prosjektbanken.forskningsradet.no/#/project/NFR/308847> (2020).
16. Breivik, S. L. & Gløsen, D. A. M. *Muligheter for å utnytte lavtemperatur spillvarme fra prosessindustrien i Grenland*. (2019).
17. Mauthner, F., Hubmann, M., Brunner, C. & Fink, C. Manufacture of malt and beer with low-temperature solar process heat. *Energy Procedia* **48**, 1188–1193 (2014).

18. Oosthuizen, D., Goosen, N. J. & Hess, S. Solar thermal process heat in fishmeal production: Prospects for two South African fishmeal factories. *J. Clean. Prod.* **253**, 119818 (2020).
19. Wongsuwan, W., Kumar, S., Neveu, P. & Meunier, F. A review of chemical heat pump technology and applications. *Appl. Therm. Eng.* **21**, 1489–1519 (2001).
20. KlinSoda, I. & Piumsomboon, P. Isopropanol–acetone–hydrogen chemical heat pump: A demonstration unit. *Energy Convers. Manag.* **48**, 1200–1207 (2007).
21. Muthukumar, P. & Groll, M. Metal hydride based heating and cooling systems: A review. *Int. J. Hydrog. Energy* **35**, 3817–3831 (2010).
22. Ziegler, F. State of the art in sorption heat pumping and cooling technologies. *Int. J. Refrig.* **25**, 450–459 (2002).
23. Srihirin, P., Aphornratana, S. & Chungpaibulpatana, S. A review of absorption refrigeration technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **5**, 343–372 (2001).
24. Karamangil, M. I., Coskun, S., Kaynakli, O. & Yamankaradeniz, N. A simulation study of performance evaluation of single-stage absorption refrigeration system using conventional working fluids and alternatives. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **14**, 1969–1978 (2010).
25. Sun, J., Fu, L. & Zhang, S. A review of working fluids of absorption cycles. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **16**, 1899–1906 (2012).
26. Wang, J. F., Gao, G. C. & Chen, G. M. An improved absorption refrigeration cycle driven by unsteady thermal sources below 100 °C. *Int. J. Energy Res.* **24**, 633–640 (2000).
27. Muthu, V., Saravanan, R. & Renganarayanan, S. Experimental studies on R134a–DMAC hot water based vapour absorption refrigeration systems. *Int. J. Therm. Sci.* **47**, 175–181 (2008).
28. Pilatowsky, I., Rivera, W. & Romero, R. J. Thermodynamic analysis of monomethylamine–water solutions in a single-stage solar absorption refrigeration cycle at low generator temperatures. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **70**, 287–300 (2001).
29. Karno, A. & Ajib, S. Thermodynamic analysis of an absorption refrigeration machine with new working fluid for solar applications. *Heat Mass Transf.* **45**, 71–81 (2008).
30. Mansouri, R. Theoretical and experimental study of absorption and absorption/diffusion refrigerating machines using ammonia as a refrigerant: Simulation under steady-state and dynamic regimes and experimental characterization of a pilot. (Universitat Rovira i Virgili, 2016).
31. Colak, N. & Hepbasli, A. A review of heat pump drying: Part 1 – Systems, models and studies. *Energy Convers. Manag.* **50**, 2180–2186 (2009).
32. Colak, N. & Hepbasli, A. A review of heat-pump drying (HPD): Part 2 – Applications and performance assessments. *Energy Convers. Manag.* **50**, 2187–2199 (2009).
33. Minea, V. Using industrial heat pumps in sawmills for lumber drying. *IEA Heat Pump Cent. Newsl.* **30**, 19–25 (2012).
34. Arpagaus, C., Bless, F., Uhlmann, M., Schiffmann, J. & Bertsch, S. S. High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. *Energy* **152**, 985–1010 (2018).
35. Laue, H.-J. *Application of Industrial Heat Pumps*. <https://iea-industry.org/annexes/annex-xiii> (2014).
36. Norges forskningsråd. High temperature heat pumps for efficient utilisation of low temperature surplus heat – HeatUp. *Prosjektbanken* <https://prosjektbanken.forskningsradet.no/#/project/NFR/243679> (2015).

37. Norges forskningsråd. Centre for an energy efficient and competitive industry for the future – HighEFF. *Prosjektbanken*
<https://prosjektbanken.forskningsradet.no/#/project/NFR/257632> (2016).
38. Norges forskningsråd. Sustainable and efficient heat pump development for combined process heat and cool – SkaleUp. *Prosjektbanken*
<https://prosjektbanken.forskningsradet.no/#/project/NFR/296374> (2019).
39. European Commission. Waste Heat Recovery in Industrial Drying Processes. *CORDIS – EU research results* <http://cordis.europa.eu/project/id/723576> (2016).
40. Lauermann, M. *Feasibility study on high temperature heat pump with heat sink at 200 °C. Identification of working fluid, technology readiness levels and system availability.* (2017).
41. Schneeberger, A., Helminger, F. & Bantle, M. *Integrated Heat Pump Systems.* (2019).
42. Tomaszewska, B. *et al.* Use of low-enthalpy and waste geothermal energy sources to solve arsenic problems in freshwater production in selected regions of Latin America using a process membrane distillation – Research into model solutions. *Sci. Total Environ.* **714**, 136853 (2020).
43. Zaragoza, G., Andrés-Mañas, J. A. & Ruiz-Aguirre, A. Commercial-scale membrane distillation for solar desalination. *Npj Clean Water* **1**, 20 (2018).
44. Thomas, N., Mavukkandy, M. O., Loutatidou, S. & Arafat, H. A. Membrane distillation research & implementation: Lessons from the past five decades. *Sep. Purif. Technol.* **189**, 108–127 (2017).
45. Saadat, A. H. M., Islam, M. S., Parvin, F. & Sultana, A. Desalination technologies for developing countries: A review. *J. Sci. Res.* **10**, 77–97 (2018).
46. Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T. H., Smakhtin, V. & Kang, S. The state of desalination and brine production: A global outlook. *Sci. Total Environ.* **657**, 1343–1356 (2019).
47. Liponi, A., Wieland, C. & Baccioli, A. Multi-effect distillation plants for small-scale seawater desalination: thermodynamic and economic improvement. *Energy Convers. Manag.* **205**, 112337 (2020).
48. Ng, K. C., Thu, K., Kim, Y., Chakraborty, A. & Amy, G. Adsorption desalination: An emerging low-cost thermal desalination method. *Desalination* **308**, 161–179 (2013).
49. Shahzad, M. W., Burhan, M., Ang, L. & Ng, K. C. Adsorption desalination—principles, process design, and its hybrids for future sustainable desalination. in *Emerging Technologies for Sustainable Desalination Handbook* 3–34 (Elsevier, 2018). doi:10/d648.
50. Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D. & Bailey, M. B. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics.* (John Wiley & Sons, 2018).
51. Quoilin, S., Broek, M. V. D., Declaye, S., Dewallef, P. & Lemort, V. Techno-economic survey of organic Rankine cycle (ORC) systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **22**, 168–186 (2013).
52. Modi, A. & Haglind, F. A review of recent research on the use of zeotropic mixtures in power generation systems. *Energy Convers. Manag.* **138**, 603–626 (2017).
53. Sarkar, J. Review and future trends of supercritical CO₂ Rankine cycle for low-grade heat conversion. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **48**, 434–451 (2015).
54. Zhang, X., He, M. & Zhang, Y. A review of research on the Kalina cycle. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **16**, 5309–5318 (2012).