

Dato

**2014-November**

# TEKNOLOGIKARTLEGGING KRAFTGJENVINNING FRA LAVTEMPERATUR SPILLVARME



**RAMBØLL**

Utarbeidet av

Marius Monsen Ragnøy, Niels Houbak og Espen Borgir Christophersen (Rambøll Energi)

# TEKNOLOGIKARTLEGGING LAVTEMPERATUR SPILLVARME

Revisjon **Endelig**  
Dato **2014/10/15**  
Utført av **Marius Monsen Ragnøy**  
Kontrollert av **Niels Houbak**  
Godkjent av **Espen Borgir Christophersen**  
Beskrivelse Levert rapport

## **Kontaktinfo:**

Espen Borgir Christophersen  
ebcosl@ramboll.com  
+47 901 64 172

Niels Houbak  
NIHO@ramboll.com  
+45 5161 3404

Marius Monsen Ragnøy  
mmrosl@ramboll.com  
+47 922 55 939

## INNHALDSFORTEGNELSE

<b>1.</b>	<b>SAMMENDRAG</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>INNLEDNING</b>	<b>3</b>
2.1	Hensikten med studien	3
2.2	Metode og omfang	3
2.3	Begreper og definisjoner	3
<b>3.</b>	<b>SPILLVARME I NORGE</b>	<b>4</b>
<b>4.</b>	<b>TEKNOLOGIKARTLEGGING</b>	<b>5</b>
4.1	Den fundamentale kraftproduserende prosessen: konvensjonell Rankine Cycle	5
4.2	Organic Rankine Cycle (ORC)	8
4.3	Kalina Cycle®	17
4.4	Transkritisk/Superkritisk Rankine Cycle	22
4.5	Trilateral Flash Cycle	24
4.6	Organic Flash Cycle	25
4.7	Absorpsjons-Rankine Cycle	26
4.8	Stirling	28
4.9	Termoelektrisk generator (TEG)	32
4.10	Phase Change Material -teknologi	34
4.11	Andre tilstøtende teknologier – to-fase-ekspander	36
<b>5.</b>	<b>SAMMENLIGNING AV TEKNOLOGIER</b>	<b>38</b>
5.1	Tolkning av resultater	40
5.2	Oppsummering	40
<b>6.</b>	<b>TEKNOLOGIUTVIKLING</b>	<b>43</b>
6.1	Teknologier aktuelle for Norge i dag	43
6.2	Teknologiutvikling de seneste 5 årene	43
6.3	Aktuelle teknologier i fremtiden	44
	<b>REFERANSER</b>	<b>45</b>

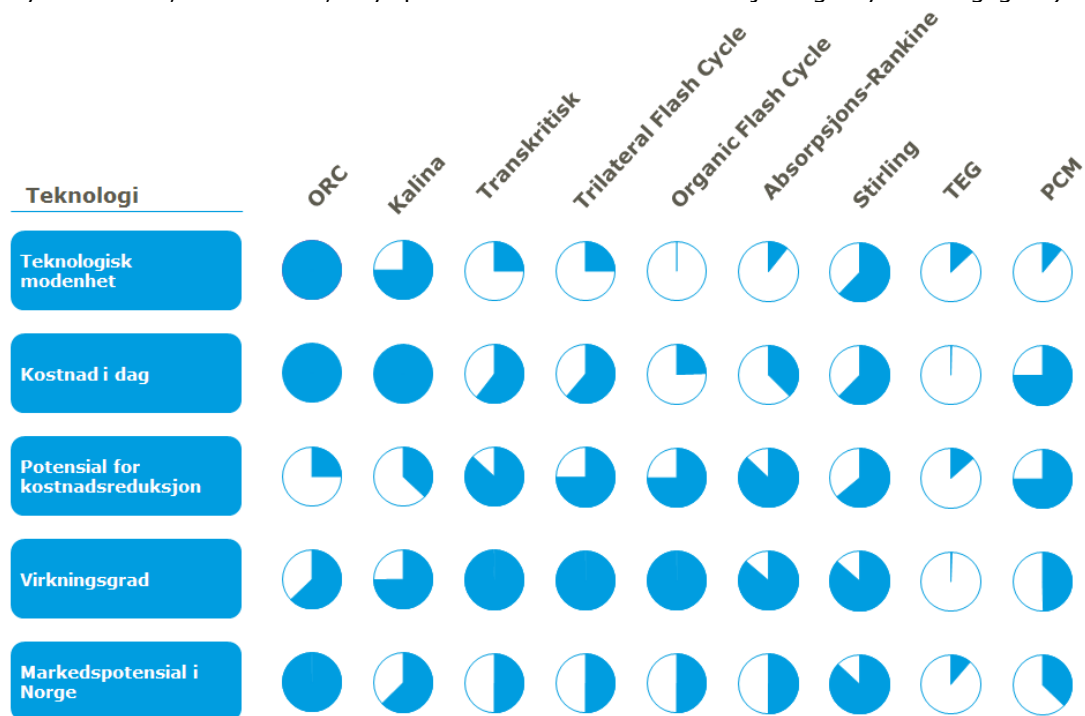
## FIGURLISTE

Figur 3.1: Spillvarmepotensialet i Norge fordelt på bransjer og temperaturklasser [1]	4
Figur 4.1: Oppnåelig effektivitet i en Rankine-prosesser med ulike medier [2]	6
Figur 4.2: TS-diagram for vann med en enkel Rankine-prosess	6
Figur 4.3: TS-diagram for Pentan i en ORC.	7
Figur 4.4: Skjematisk tegning uten regenerator. Dersom regenerator benyttes, er denne plassert etter turbin, med varmeoverføring fra arbeidsmediet etter pumpe	8
Figur 4.5: Utvalg av ORC-teknologier. Figuren visualiser Rambølls vurdering av modenhet for de utvalgte teknologiene	10
Figur 4.6: Oversikt over markedsutvikling innenfor ORC-markedet frem til 2012. Hentet fra [3], utført av University of Liege (2011/2012). Figur til høyre viser andel av antallet ORC-enheter totalt.	15
Figur 4.7: Venstre: Kostnad sammenlignet med størrelsen på anlegget. Høyre: Kostnadskurve for ORC gitt av spesifikk investeringskostnad sammenlignet med effekt [8]	16
Figur 4.8: Fordampningsprosess av kun vann (nederste kurve) og en varm (gass-) strøm over.	17
Figur 4.9: Inntegnet fordampningsprosess for ammoniakk og vann (rosa prosesslinje)	18
Figur 4.10: Illustrasjon av omtrentlig modenheten til Kalina Cycle.	19
Figur 4.11: Superkritisk prosess (rosa prosess i superkritisk område) sammenlignet med en konvensjonell Rankine Cycle (grønn prosess, som vist tidligere). Kun for illustrasjon.	22
Figur 4.12: Illustrasjon av modenheten til teknologien	23
Figur 4.13: TS-diagram til venstre for å illustrere forskjellen på en enkel Rankine Cycle og en Trilateral (prosesstall markert med stjerne *og rosa). Flytskjema illustrert til høyre.	24
Figur 4.14: TS-diagram over OFC til venstre, flytskjema til høyre [12]	25
Figur 4.15: Skjematisk flytskjema av en absorpsjons-Rankine Cycle [17]	26
Figur 4.16: Illustrasjon av modenheten til teknologien	27
Figur 4.17: Skisse av mekanisme i Stirling-motor (beta type) [19]	28
Figur 4.18: En alternativ utforming av krumtapp og stempel (alfa type) [19]	29
Figur 4.19: Illustrasjon av teknologienes modenhet	31
Figur 4.20: Illustrasjon av teknologiens modenhet	33
Figur 4.21: Varmepute med PCM [28]	34
Figur 4.22: Illustrasjon av teknologiens modenhet	35
Figur 4.23: Illustrasjon av modenheten til teknologien	37
Figur 5.1: Innsamlet informasjon om teknologileverandørene. Manglende utfylte felter skyldes manglende tilgang på informasjon. Kommentarer til figur er gitt i avsnitt 5.1. Nummereringen 1-17 er ut ifra rekkefølgen på teknologileverandørene presentert med caser i rapporten. Disse utvalgte teknologileverandørene er plassert i grafen som illustrasjon. Numrene 18-36 er vilkårlig.	38
Figur 5.2: Sammenligning av modenheten ved teknologileverandørene gjennomgått i rapporten, angitt som piler. Punktene plassering i grafens vertikale retning har ingen betydning - kun plassering horisontalt.	39
Figur 5.3: Sammenligning av vurderte teknologier innenfor modenhet, kostnad og potensial for kostnadsreduksjon, virkningsgrad og markedspotensial i Norge.	40

## 1. SAMMENDRAG

I 2009 ble det identifisert et spillvarmepotensial i Norge på 19,4 TWh/år fra varmekilder over 25 grader (med 0 °C som referanse). Rapporten [1] stadfestet videre et potensial på rundt 9 TWh for varmekilder på 60-350 °C. 250 GWh<sub>el</sub>/år ble antatt som sannsynlig potensial for kraftproduksjon.

I denne rapporten er det kartlagt teknologier og tilhørende teknologileverandører for kraftutnyttelse av lavtemperatur spillvarme - underforstått teknologier som kan realisere deler av potensialet identifisert i 2009. 9 teknologier er identifisert som aktuelle til dette formålet. Totalt 36 leverandører av disse teknologiene er vurdert basert på dens modenhet, kostnad og potensial for reduksjon, virkningsgrad og markedspotensial i Norge. Under er resultatene fra denne vurderingen. Blå kake er ansett som positivt (høy modenhet, lav kostnad, høyt potensial for kostnadsreduksjon og høy virkningsgrad).



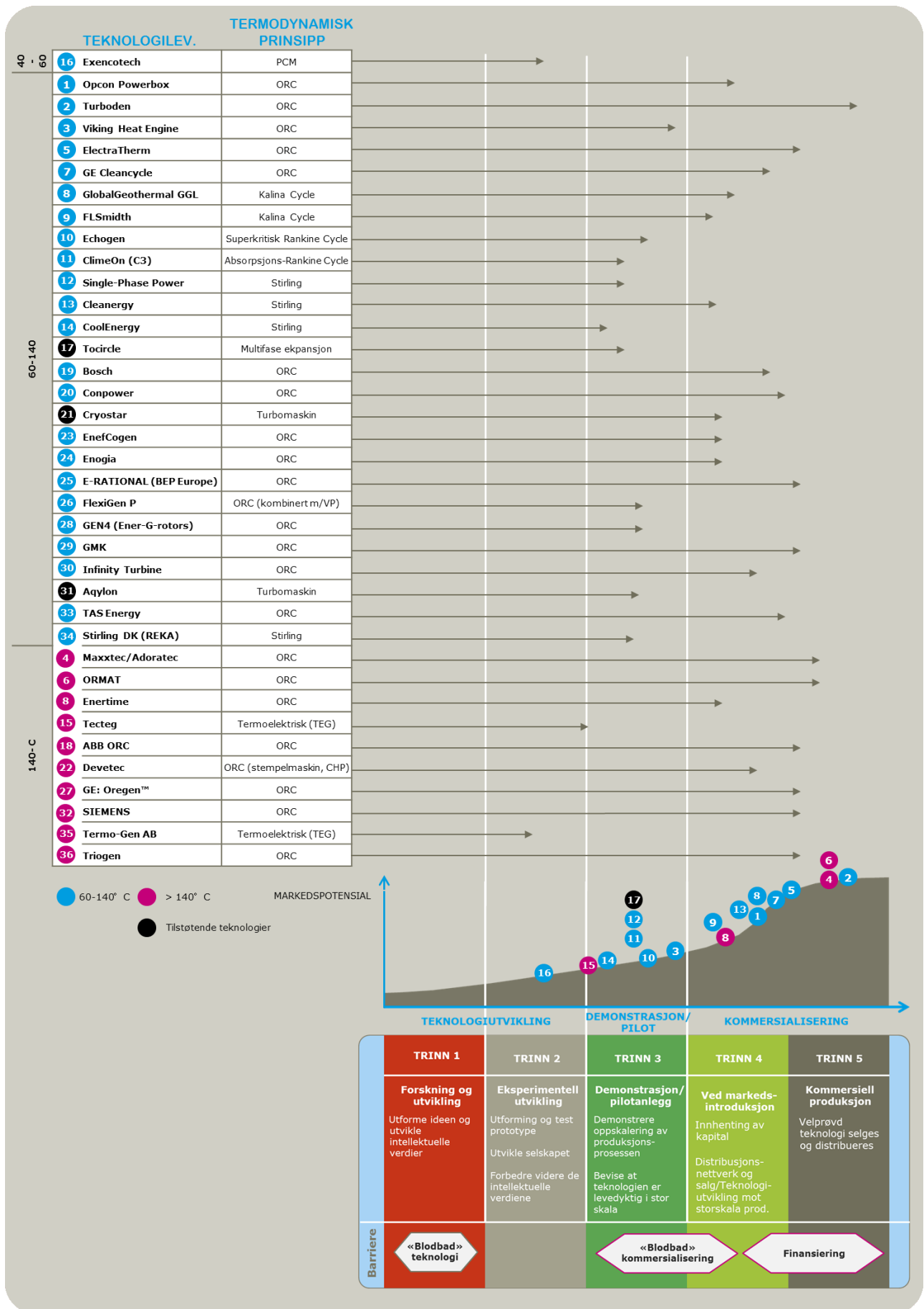
ORC og Kalina er en videreutvikling av den konvensjonelle og høyst kommersielle damp-Rankinesyklusen, og er blant annet derfor den mest modne av kraftgjenvinnende teknologier fra lavtemperatur varmekilder i dag. Bestanddelene i begge teknologiene er velutprøvde. Kalina har likevel færre aktører som driver teknologiutviklingen, mye grunnet ugunstig rettighetsstrategi fra teknologi-eieren, og har sett i forhold til ORC få anlegg. ORC derimot har hatt en eksplosiv økning i antall anlegg de siste 10 årene, og har svært mange aktører som driver teknologiutviklingen videre. Virkningsgraden for ORC og Kalina er sammenlignet med andre Rankine-baserte teknologier ikke ansett som høy, likevel har teknologiene høyest lønnsomhet i dag.

Forskning og demonstrasjon av nye arbeidsmedier og ekspandere vil på sikt kunne øke virkningsgraden og redusere kostnaden forbundet med ORC, og kanskje spesielt Transkrittisk Rankine Cycle, Trilateral Flash Cycle (og Organic Flash Cycle). Sistnevnte teknologier er umodne, men har et klart potensial på kort og mellomlang sikt i mindre anlegg. Stirling og ORC er likevel de mest modne teknologiene i dag for mindre (<300 kW) lavtemperatur anlegg, selv om dette generelt er å anse som et ganske umodent applikasjonsområde for teknologiene. De kartlagte teknologileverandørene har levert ca. 200 enheter med under 300 kW nominell effekt, hvilket er relativt lite sett i sammenheng med anlegg med høyere effekt. Flere tusen slike anlegg er i drift i dag.

Termoelektriske generatorer (TEG) kan være aktuelle til kraftproduksjon basert på lavtemperatur spillvarme, og noe forskning pågår omkring dette. Kostnaden er riktignok svært høy, og moderate effektivitetsresultater i forskning tilsier at det er lite sannsynlig at teknologien blir kommersiell innenfor lavtemperatur spillvarmeutnyttelse i industrien. Bruk av Phase Change Materials (PCM) til kraftproduksjon er under eksperimentell utvikling i Sverige, og kan være spennende teknologi for utnyttelse av svært lave temperaturer.

Laveste investeringskostnad er i dag rundt 8-9.000 NOK/kW<sub>el</sub> for anlegg i MW-klassen, og rundt 16.000-18.000 NOK/kW<sub>el</sub> ned mot 0,5 MW. Under 500 kW<sub>el</sub> er det sterkt varierende, og kan være

opp mot 30.000-40.000 NOK/kW<sub>el</sub>. Under er en liste over vurderte teknologileverandører med Ram-bølls vurdering av modenhet, temperaturklasse og termodynamisk prinsipp.



## 2. INNLEDNING

### 2.1 Hensikten med studien

Rapporten er en videreføring av den tidligere utførte Spillvarmestudien [1] (2009). Det overordnede ønsket er å knytte det allerede identifiserte spillvarmepotensialet til aktuelle teknologier på området.

Rapporten skal, i tillegg til å gi en oversikt over mulige leverandører for norsk industri, gi Enova grunnlag i videreutviklingen av sitt programtilbud. Et viktig suksesskriterium for Enova er å ha treffsikre programmer, der virkemidlene som tilbys treffer både markedene og teknologiene på en effektiv måte. For å kunne utløse nye investeringer innenfor kraftgjenvinning i Norge, ønsker Enova å allokere investeringsstøtte til de mest kostnadseffektive teknologiene. Samtidig vil det være viktig for Enova å tilby støtte til teknologier som per i dag kan anses for å være umodne, men som på sikt kan ha et stort potensial. Rapporten skal danne et underlag for vurderinger omkring dette.

### 2.2 Metode og omfang

Rapporten har tatt for seg kraftproduserende teknologier, både norske og utenlandske, tilpasset spesielt lav-temperatur spillvarme fra industri.

Informasjonsinnhenting har tatt utgangspunkt i Rambølls allerede opparbeidete erfaring og kjennskap til kraftvarmeteknologier gjennom mange års samarbeid med ulike forskningsmiljøer og næringsliv verden over. I tillegg er det supplert med innhenting av offentlig tilgjengelig informasjon, gjennom søk på internett og litteratursøk. Alle 36 teknologileverandørene har blitt kontaktet direkte for å øke kunnskapen om den aktuelle teknologien. Rundt 20 teknologileverandører har gitt fylldig svar på forespørselen. Teknologiene er forsøkt fremstilt på en «rettferdig» måte.

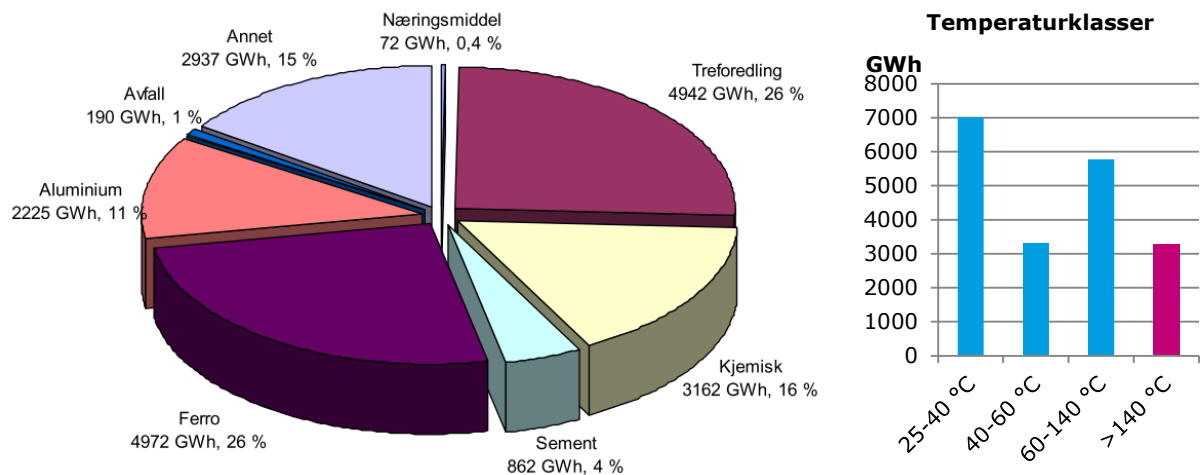
### 2.3 Begreper og definisjoner

<b>Pilotanlegg/pilotering</b>	Med pilotanlegg og pilotering menes utvikling av en ny fungerende løsning (produkt, tjeneste eller prosess) for uttesting i mindre skala enn fullskala.
<b>Demonstrasjonsanlegg/demonstrasjonsprosjekter</b>	Med demonstrasjonsanlegg og demonstrasjonsprosjekter menes videreutvikling av en fungerende løsning (produkt, tjeneste eller prosess) for uttesting i stor skala før den eventuelt settes i full industriell produksjon eller lanseres som fullverdig tjeneste.
<b>Lavtemperatur spillvarme</b>	I denne studien er lavtemperatur spillvarme definert som kilder under 500 °C.
<b>ORC</b>	Organic Rankine Cycle
<b>WHR</b>	Waste Heat Recovery
<b>TEG</b>	Thermo Electric Generator
<b>PCM</b>	Phase Change Materials
<b>OTEC</b>	Ocean Thermal Energy Conversion
<b>Valutakurser:</b>	
- <b>Amerikanske dollar</b>	I studien benyttet 5,7 NOK/USD
- <b>Euro</b>	I studien benyttet 8,1 NOK/euro
- <b>Svenske kroner</b>	I studien benyttet 0,90 NOK/SEK
<b>Transkritisk og superkritisk</b>	Superkritisk er når et arbeidsmedium er i en tilstand som er over det kritiske punktet for mediet. Transkritiske prosesser er prosesser som operer både over og under kritisk punkt.
<b>LCOE</b>	Levelized Cost of Energy

### 3. SPILLVARME I NORGE

I 2009 gjennomførte Norsk Energi i samarbeid med NEPAS en *Potensialstudie for utnyttelse av spillvarme fra norsk industri* [1]. Bransjer som ble gjennomgått var næringsmiddel, treforedling, kjemisk, sement- og Leca, aluminium, ferrolegeringer og øvrig industri/ilandføringsterminaler. Totalt 72 bedrifter deltok i studien, med en samlet energibruk på 53,7 TWh.

Rapporten identifiserte spillvarmepotensialet til 19,4 TWh/år fra varmekilder over 25 °C (med 0 °C som referanse). Rapporten stadfestet videre at 250 GWh<sub>el</sub>/år var sannsynlig potensial for kraftproduksjon med varmekilder på 60-350 °C.



Figur 3.1: Spillvarmepotensialet i Norge fordelt på bransjer og temperaturklasser [1]

45 bedrifter i studien utnyttet i 2009 spillvarme. 39 bedrifter hadde planer om å utnytte spillvarme enten til eksterne (1380 GWh/år) eller interne (753 GWh/år) formål. Dette ble beregnet til 11 % av det kartlagte spillvarmepotensialet.

Studien [1] understrekte behovet for teknologiutvikling innenfor; 1) kraftproduksjon fra spillvarmekilder ned mot 60-70 °C, 2) lavtrykk dampturbiner i Norge, 3) varmepumper for høy temperatur, og 4) kraftproduksjon fra varmekilder med temperatur lavere enn 60-70 °C.

Det er flere barrierer assosiert med realisering av spillvarmepotensialet i Norge. Disse er blant annet;

- **Økonomiske utfordringer**, både i forhold til lønnsomhet og kapitaltilgang.
- **Tekniske utfordringer**, herunder spillvarmekildens temperatur, effekt og varighet, og forurensninger i varmekilden (kan være en betydelig kostnad).
- **Teknologienes begrensninger**, herunder deres tilpasningsevne til norske forhold, tilgjengelighet på komponenter, og interessen for Norge som marked.
- **Geografisk avstand mellom bruker og varmekilde**, spesielt i avsidesliggende strøk med lite behov for fjernvarme.
- **Organisatoriske utfordringer**, herunder interessen for og ønske om installasjon av ny og ukonvensjonell teknologi. Dette er myntet også på kultur og interesse for energieffektivisering.
- **Kunnskapsutfordringer i industribedriften**, både i forhold til å identifisere mulighetene, men også å realisere dem i praksis uten at det påvirker bedriftens kjernevirksomhet.
- **Manglende politiske incitament og virkemidler.**



## 4. TEKNOLOGIKARTLEGGING

Denne studien har kartlagt følgende teknologier for produksjon av elektrisitet fra lavtemperatur spillvarme:

- ORC
- Kalina Cycle
- Superkritisk/transkritisk Rankine Cycle
- Trilateral Flash Cycle (TFC)
- Organic Flash Cycle (OFC)
- Absorpsjons-Rankine Cycle
- Stirling
- Termoelektrisk (TEG)
- Phase Change Material (PCM) til kraftproduksjon
- Tilstøtende teknologier

En videre presentasjon av disse teknologiene er presentert i dette kapittelet. Studien har forsøkt å inkludere teknologier innenfor de fleste modenhetsfasene – fra forskningsstadium til kommersialisering. Siden antallet teknologileverandører av Rankine-baserte prosesser som Kalina og ORC er i klart flertall og kommersielt tilgjengelige, har studien av naturlige årsaker gitt mest fokus på teknologileverandører av disse teknologiene. Rapporten har lagt vekt teknologileverandører med relevans for prosjekter i Norge – deres teknologi, applikasjonsområde, potensial for kraftproduksjon, virkningsgrad og kostnader.

### 4.1 Den fundamentale kraftproduserende prosessen: konvensjonell Rankine Cycle

Når det skal genereres elektrisitet fra varme er det tradisjonelt tre sykluser som er aktuelle; (1) Otto-, (2) Brayton- og (3) Rankine Cycle, eller mulige kombinasjoner av disse. Otto-prosessen finnes blant annet i dag i dieselmotorer. Brayton-prosessen finner vi gassturbiner (GT) og Rankine-prosessen brukes f.eks. i dampbaserte kraftverk.

Alle tre prosessene er basert på at en trykksatt og varm gass ekspanderer til et lavere trykk og en lavere temperatur. Ekspansjonen kan skje enten ved at gassen beveger et stempel (som i en dieselmotor) eller ved at gassen ved høyere hastighet får en turbin til å rotere. I begge tilfellene brukes det mekaniske arbeidet som genereres til å rotere en generator.

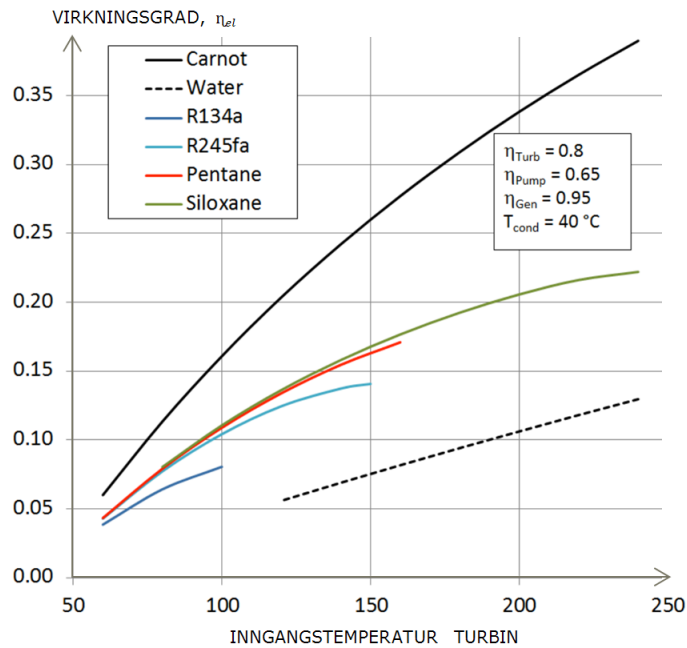
Basalt sett, så profiterer Otto og Brayton-prosessene på at det skal brukes mindre arbeid å komprimere en gass ved lav temperatur enn det arbeidet som skal slippes ut igjen når den samme gassen etter oppvarming ekspanderer med en mye høyere temperatur. For en Rankine-prosess, så ligger den største gevinsten i at det kreves lite arbeid å trykksette en væske, i motsetning til å måtte trykksette den tilsvarende gassmengden.

I runde tall kan man for de tre prosessene oppnå en virkningsgrad på nesten 50 % for Otto-prosessen, 46 % av Rankine-prosessen og nesten 40 % av Brayton-prosessen. Ved å kombinere en Brayton- og Rankine-prosess i det som kalles en kombinert syklus (CCGT) kan man oppnå omtrent 60 % i el-virkningsgrad. I alle tilfeller er den nødvendige materialstyrken ved høye temperaturer og trykk den begrensende faktoren. Man kan øke den samlede energiutnyttelsen fra prosessene ved å utnytte prosessenes restvarme til fjernvarme. Det vil i de fleste tilfeller gi en samlet energiutnyttelse på omtrent 90 % (varierende fra ca. 87 % til 94 %).

Carnot-prosessen er en (imaginær) varme-kraft-prosess som opererer mellom to reservoarer ved kjente temperaturer  $T_H$  og  $T_L$  (begge i Kelvin). Carnot-virkningsgraden er gitt ved;

$$\eta_C = (T_H - T_L) / T_H = 1 - T_L / T_H$$

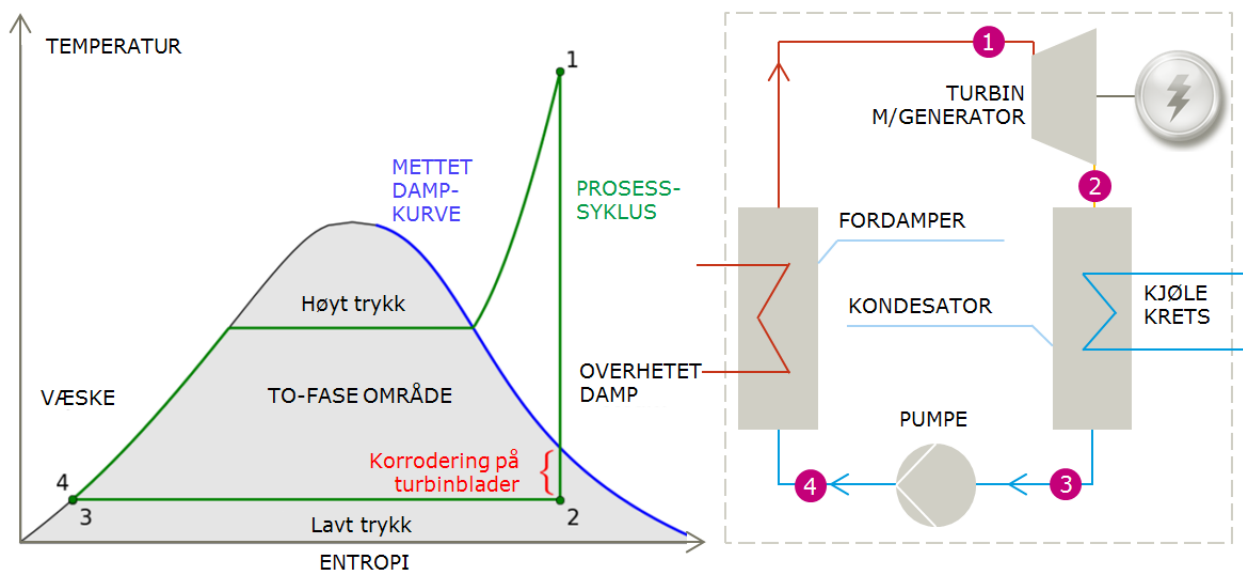
Carnot-virkningsgraden er en øvre grense for hvor høy virkningsgraden kan være. I den virkelige verden skal man forvente at ingen prosesser er en Carnot-prosess og at i ikke-ideelle prosesser er tap som reduserer den oppnåelige virkningsgraden som en andel av Carnot-virkningsgraden. I Figur 4.1 nedenfor er det vist temperaturer opp til 250 °C og forventet virkningsgrad i Rankine-prosessen med ulike medier med nokså like forhold. Av grafen fremgår det at i det lave temperaturområdet er vann ikke det beste arbeidsmediet. Imidlertid bør man være oppmerksom på at ved høyere temperaturer vil de organiske mediene brytes ned, særlig hvis de kommer i kontakt oksygen (også ved svært lave mengder).



Figur 4.1: Oppnåelig effektivitet i en Rankine-prosesser med ulike medier [2]

Rankine-prosessen har tradisjonelt blitt brukt med vann som arbeidsmedium; det er billig, det er giftfritt, ikke brennbart, er termisk / kjemisk stabilt, og dets egenskaper er forholdsvis anvendelig i sammenheng med prosessen. I Figur 4.2 nedenfor er det vist både et såkalt TS-diagram for vann og en enkel Rankine-prosesser.

Vann kan opptre som is, som en væske (et bånd til venstre for det grå område), gass/damp (i området til høyre for og litt over det grå området), og som en to-fase blanding (det grå området). Væskeområdet er et ganske smalt område nær grensekurven til to-fase-området, og jo høyere trykket blir jo lenger bort fra grensekurven kommer man. Ved oppvarming av vannet ved konstant trykk vil man først følge en isobar i væskeområdet (opp langs grensekurven); ved en bestemt temperatur (metningstemperatur ved dette trykket) skjærer kurven via to-fase-området, og vannet fordampes. Isobaren fortsetter som en myk kurve oppover i dampområdet. Denne prosessen kan bli funnet i anleggenes kjel (fordamperen) og er i TS-diagrammet den grønne linjen fra punktet 4 til 1. Ved et trykk på 221 bar (ca.) vil isobaren gå rett gjennom toppen av metningsområdet (det kritiske punkt, toppen av kurven) med en temperatur på ca 374 °C. Ved trykk over dette vil vannet skape en kontinuerlig faseforandring fra vann til damp, kalt en superkritisk prosess.



Figur 4.2: TS-diagram for vann med en enkel Rankine-prosesser

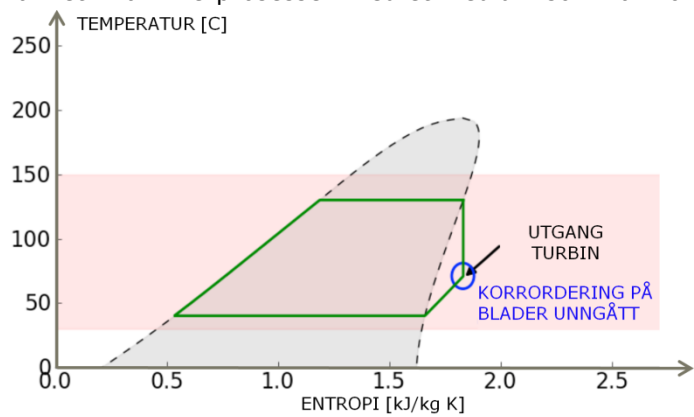
De andre vitale komponentene i en Rankine-prosesser er pumpe, turbin og kondensator. Prosessmessig er pumpeprosessen fra punkt 3 til punkt 4, de to punktene er nesten identiske - en indikasjon på at trykksetning av væske ikke koster mye rent energimessig. Prosessen fra punkt 1 til punkt 2 er

ekspansjonsprosessen gjennom turbinen; i denne prosessen omdannes en vesentlig del av energiinnholdet i den varme trykkdampen til mekanisk arbeid, trekker rundt generatoren og genererer dermed elektrisitet. I prinsippet kan man benytte en stempelmaskin for ekspansjon. Det er ikke like effektivt som en turbin, og kan ikke bygges til store effekter. Det er fortsatt mye energi igjen i dampen etter ekspansjonen, men med lav temperatur. Energi må dermed fjernes ved at dampen kondenseres i en varmeveksler som deretter kjøles av kaldere vann (sjøvann, fjernvarmevann eller et kjølemedium fra et kjøletårn).

Et problem med vann er at fordampningsentalpien er høy og fordampningen skjer ved konstant temperatur. Dette fører til store temperaturredifferanser i fordampningen mellom vannet og gassen det tas opp varme fra - et fenomen som termodynamisk gir opphav til både reduksjon i virkningsgrad og problemer ved dimensjonering av varmeoverførende overflater. Et annet problem er at ekspansjonen i turbinen kan bringe vannet inn i to-faseområdet, med det resultat at vandråpene som dannes ved den partielle kondensasjonen kan erodere stålet på turbinskivlene. Et tredje problem med bruk av vann i Rankine-prosessen, spesielt i forhold til anvendelse av lav temperatur varme, er at turbinprosessen (1-2) energimessig blir relativt beskjeden i forhold til kjel-prosessen (energitilførselen fra tilstand 4 til 1) med en (sterk) reduksjon i virkningsgrad som resultat.

Egnetheten for en prosess er naturligvis avhengig av hvilket «miljø» den skal operere i. Ett eksempel er hvis temperaturen til varmekilden er lav (pga. spillvarme fra en industriell prosess). I et slikt tilfelle vil det kunne være fordelaktig å erstatte vannet i Rankine-prosessen med et medium som har noen mer egnede egenskaper, f.eks. organiske forbindelser (derav navnet Organic Rankine Cycle). Bortsett fra de egenskapene dette mediet har i forhold til vann, så er det ikke store fundamentale forskjeller mellom en ORC- og den konvensjonelle Rankine-prosessen.

Figur 4.3 til høyre viser et TS-diagram for den organiske forbindelsen pentan; formen på to-fase-området (stiplet linje) gjør at ekspansjonsprosessen aldri kommer inn i to-fase regionen med de problemer det kan påføre turbinen.



Figur 4.3: TS-diagram for Pentan i en ORC.

En annen måte å omgå utfordringene med vann som medium er å bruke en vann-ammoniakk blanding. Den rette blanding av dette har den egenskapen at fordampningstemperaturen varierer med konsentrasjonen av ammoniakk; det betyr at varmetilførselen til kretsprosessen blir termodynamisk bedre (mer reversibel). Denne prosessen kalles en Kalina Cycle, og beskrives nærmere i avsnitt 4.3.

## 4.2 Organic Rankine Cycle (ORC)

### 4.2.1 Beskrivelse av teknologien

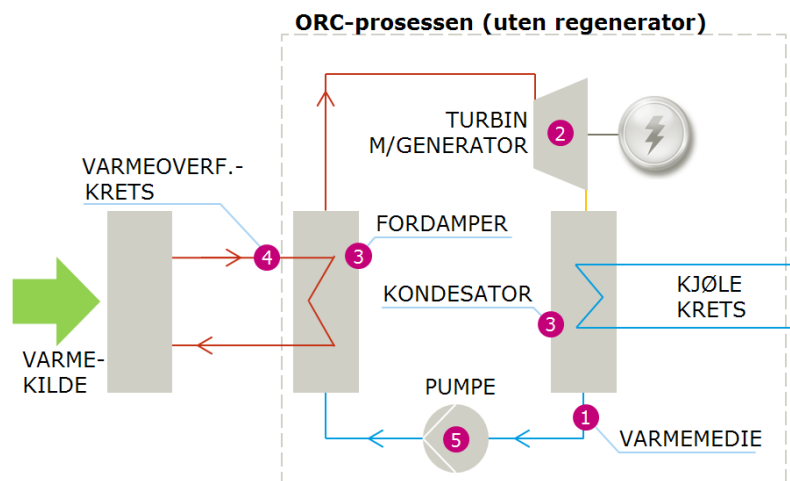
ORC er i dag en kommersielt tilgjengelig teknologi for utnyttelse av spillvarme fra industri, og ORC-produsenter har eksistert på markedet i rundt 30 år. Likevel er teknologien innenfor enkelte applikasjonsområder fremdeles på FOU-stadiet (for eksempel ORC til produksjon av kjøling og utnyttelse av havvarme), og det er stadig forbedringer på deler av prosessen. ORC-systemene har mulighet til å utnytte varmekilder fra rundt 80 °C og oppover, med effektområde fra 5 kW til flere MW. Systemene som tilbys er både modulbaserte og skreddersydd, og med store variasjon i effekt og arbeidstemperatur.

ORC er som nevnt basert på en Rankine Cycle, hvor forskjellen fra en konvensjonell Rankine Cycle (dampturbin) hovedsakelig ligger i bruken av organiske forbindelser som arbeidsmedium fremfor vann. Komponentene som er involvert i prosessen er derfor de samme som for en konvensjonell Rankine Cycle med bruk av damp. Konsekvensen av et annet arbeidsmedium påvirker likevel i stor grad hvordan systemet er bygget opp.

Fordeler med ORC fremfor konvensjonell Rankine er blant annet;

1. Organiske fluider har lavere kokepunkt, og dermed mulighet for å ta opp varme på lavere temperaturer.
2. Enkelte organiske fluider har den egenskapen at de forblir overhettet etter ekspansjon, hvilket gjør at ORC-prosessen ikke krever overheting. Dette gir noe høyere virkningsgrad, og forlenger turbinens levetid.
3. Organiske fluider har høyere massetetthet, og gjør at anleggene kan bygges mer kompakt [3].
4. Lavere trykk i fordamperen, som følge av at man gjerne benytter termisk olje (hetolje) for overføring av varme fra varmekilden (dampsyklus krever gjerne 60-70 bar, mens ORC ikke trenger å overstige 30 bar).
5. Arbeidsmediet i en ORC-prosess har lavere fall i entalpi over turbinen. Dette krever færre turbinsteg og lavere kostnad.
6. Krever mindre vedlikehold, og har færre myndighetskrav som følge av lavere arbeidstrykk

Som et resultat av det ovennevnte er det to helt klare kommersielle forskjeller mellom ORC og konvensjonell Rankine Cycle; ORCs evne til å ta opp varme fra lavere temperaturer, og muligheten for mer desentralisert og små og middels skala produksjon av elektrisitet (ned mot noen få kW). ORC kan dermed være en mer aktuell teknologi for kraftproduksjon basert på fornybare varmekilder som sol, geotermisk energi, bioenergi og havvarme (OTEC), og ikke minst lavtemperatur kraftgjenvinning fra industrien. For spillvarme fra større industrielle anlegg med høyere temperaturer (gjærne over 450 °C) er konvensjonell Rankine Cycle fremdeles foretrukket, med en høyere virkningsgrad og lavere kostnad. Konvensjonell Rankine Cycle har også fordelen at vann benyttes som arbeidsmedium, hvilket er billigere, ikke brennbart og giftig, og mer miljøvennlig enn organiske forbindelser. ORC består av de samme komponentene som konvensjonell Rankine Cycle, som vist i Figur 4.4.



Figur 4.4: Sjematisk tegning uten regenerator. Dersom regenerator benyttes, er denne plassert etter turbin, med varmeoverføring fra arbeidsmediet etter pumpe

Under er det presentert hovedalternativene i dag innenfor de ulike delsystemene, og hva som typisk benyttes i dag:

1. **Arbeidsmedium:** I dag benyttes et fåtall av de organiske forbindelsene, og det forskes per i dag mye på å tilpasse arbeidsmedier og deres termodynamiske egenskaper til passende applikasjonsområder. Vanlige arbeidsmedier innen WHR er R134a (svært lave temperaturer), R245fa, n-pentan, Solkatherm og toluen [3].
2. **Ekspander:** ORC-prosessens virkningsgrad er sterkt avhengig av ekspanderen; der arbeidsmediet går fra høyt til lavt trykk og temperatur, og lavt til høyt spesifikt volum, og på den måten genererer mekanisk arbeid. Det er ikke tilfeldig at flere ORC-leverandører er vel-etablerte produsenter av turbiner. Det benyttes hovedsakelig to typer ekspandere:
  - a. Turbomaskiner, enten aksial- eller radialturbiner. Turbomaskiner er best egnet for større anlegg, gjerne over 100 kW.
  - b. Fortrengningsmaskiner, hovedsakelig ekspansjon med stempel eller roterende som skrue-, skovl- eller scroll-turbiner. Turbomaskiner er en mer velutviklet og tilgjengelig teknologi enn fortrengningsmaskiner – de aller fleste fortrengnings-ekspandere er basert på kompressorer. Fortrengningsmaskiner er et godt alternativ til turbomaskiner ved mindre anlegg. Fordelen med dem er blant annet at man kan ekspandere inn i to-fase-området (eksempelvis ToCircle, se avsnitt 4.11), ha lav omløpshastighet og oppnå relativt høy virkningsgrad i mindre anlegg.
3. **Varmevekslere (fordamper og kondensator):** Normalt benyttes rør- (større anlegg) og platevarmeveksler (kompakte og passende for mindre anlegg).
4. **Varmeoverføringskrets:** Ved kraftgjenvinning fra spillvarme benyttes det i slike systemer normalt en varmekrets som overfører varmen fra varmekilden til ORC-prosessen. Ofte benyttes en termisk olje. Dette gjør prosessen mer kontrollerbar og man unngår nedbrytning av det organiske arbeidsmediet som følge av eksemplvis igangkjøring av prosessen ved direkte varmeoverføring.
5. **Pumpe:** Benyttes både fortrengnings- og sentrifugalpumper. I konvensjonelle Rankine Cycler og større ORC-anlegg er pumpearbeidet en liten del av elproduksjonen. I små til middels store ORC-anlegg med lav temperatur er pumpearbeidet en større del. Pumpens virkningsgrad og valg av riktig type pumpe er i de tilfellene svært avgjørende for prosessens totale virkningsgrad.

#### 4.2.2 Teknologiens utviklingsløp og modenhet

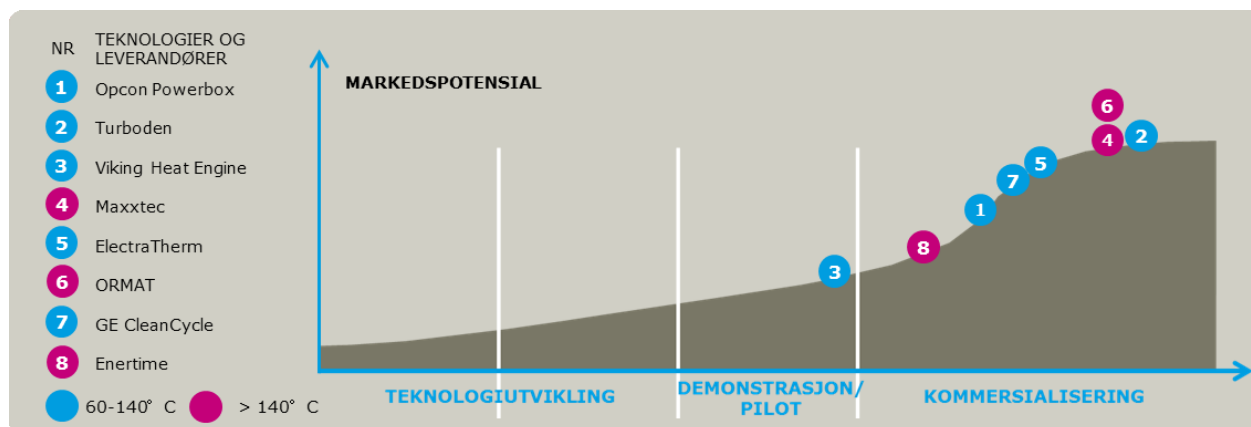
Ved design av en Rankine-prosess er turbinen som nevnt avgjørende for prosessens ytelse. Det er viktig å være oppmerksom på at det er vanskeligere å lage en liten turbin med god effektivitet enn en tilsvarende stor turbin. I de første utviklingsårene av en relativt ny teknologi som ORC, vil det å få en turbinleverandør med på ideen alltid være stor barriere. I dag, med både Siemens og General Electric (GE) involvert i ORC-prosjekter, har barrieren mer blitt et spørsmål om å finne den rette turbinen til et bestemt formål. Tilsvarende er valget av medium avgjørende; med en enda mer industrialisert tilnærming til bygging av ORC-anlegg vil valget av medium være et helt annet og i større grad løses av standardisering.

De aller fleste ORC-anlegg som bygges i dag kan anses å ha en relativt enkel oppbygging [3]; sub-kritiske, rene arbeidsmedier (kun bestående av en forbindelse) og ett fordampningstrykk. Prosessen har flere forbedringspotensialer når det gjelder valg av arbeidsmedium og prosessens arkitektur. Blant annet forskes det på bruk superkritisk og transkritiske prosesser, delprosesser i kaskade, forbedring av virkningsgrad ved dellast og effektiv ekspansjon i to-fase-området. Dette inkluderer også forbedring av turbinytelsen. Siden store aktører som Siemens og GE satser på teknologien, øker sannsynligheten for at teknologien vil utvikle seg, og realisere sitt potensiale raskere.

### 4.2.3 Presentasjon av ORC-teknologier m/caser

Studien har tatt for seg 22 teknologier og teknologileverandører av ORC. Applikasjonsområder for de kartlagte teknologiene er primært:

- Biomasse
- Geotermisk energi
- Spillvarme fra industri (blant annet sement, smelteverk etc.)
- Varme fra gassturbiner (*bottoming cycle*)
- Varme fra brenselceller
- Solvarme
- Havvarme




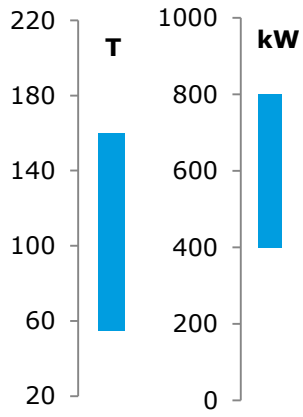
Figur 4.5: Utvalg av ORC-teknologier. Figuren visualiser Rambølls vurdering av modenhet for de utvalgte teknologiene

Temperaturområdene på varmekilden som teknologileverandørene oppgir spenner fra ca. 80 °C opp til 400-500 °C, og med levert effekt fra 2 kW opp til flere titalls MW. De mindre modne teknologiene er blant de små ORC-maskinene (under 1 MW). Teknologiene varierer stort når det gjelder ekspansjonsprosessen og type organisk fluid som arbeidsmedium i prosessen.

Figur 4.5 fremstiller utvalgte ORC-teknologier i et teknologilivsløp. Teknologiene vil presenteres mer inngående i de påfølgende avsnittene, og er valgt for å gjenspeile helheten i markedet. Logikken bak kurven i Figur 4.5 er ment å gjenspeile markedspotensialet eller potensiell kundemasse (y-akse) for en gitt teknologi i en gitt modenhetsfase (x-akse) i teknologilivsløpet. Dette er kun for illustrasjon, og hovedbudskapet i figuren er modenheten gitt av x-aksen. Vurderinger rundt modenhet baserer seg på antall solgte enheter (i kommersiell fase), antall demonstrasjoner/piloter (demonstrasjon/pilot-fase). Bak ligger også en kvalitativ vurdering av nyhetssaker og annet materiell omkring teknologienes termodynamiske prinsipp, tilgang på kapital/ressurser, team og et helhetsinntrykk av teknologileverandøren.

Casene presentert nedenfor er basert på tilsendt informasjon fra leverandørene, samt offentlig tilgjengelig materiale. Informasjon om de ulike leverandørene er av ulike detaljeringsgrad, da de mer kommersielle aktørene gjerne er mindre villig til å dele informasjon enn aktørene som nylig har entret markedet. I casene presenteres:

- Temperatur på varmekilden (i form av vann, damp, avgass eller termisk olje).
- Effektområde gitt i nominell elektrisk effekt, altså maksimal effekt gitt i enten kW eller MW.
- Kostnader forbundet med ORC-enheten, herunder fordampner, kondensator, ekspander, generator, arbeidsmedium (og i noen tilfeller forvarmer og regenerator dersom prosessen har det). De aller fleste prisene er omtrentlige, og vil variere sterkt avhengig av varmekilde og kjemisk komposisjon, temperatur, størrelse på anlegg og kompleksiteten.


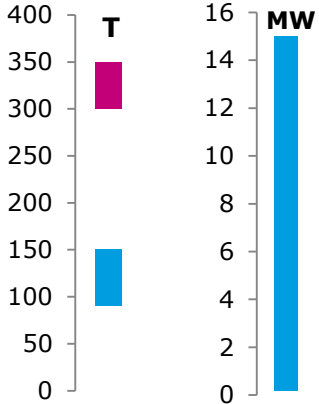
<b>1</b>	<b>TEK. LEVERANDØR</b>		Opcon, Opcon Powerbox	
	<b>Nasjonalitet</b>	Sverige		
	<b>Antall leverte enheter</b>	2 (ORC)		
	<b>Termodynamisk konsept</b>	ORC, Arb.med: Ammoniakk, Ekspander: Lysholm-/skrueturbin fra SRM)		
	<b>Modul/skreddersøm</b>	Modul og skreddersøm		
	<b>Investeringskostnad</b>	8,6 – 10,8 MNOK (11.800–13.500 NOK/kW <sub>el</sub> ) <sup>1</sup>		
	<b>Teknologiens modenhet</b>	Markedsintro i kommersialiseringsfasen		
	<b>Oppgitte applikasjoner</b>	Spillvarme, bioenergi, kjølesystemer		
	<b>Kjøling</b>	Kjøletemperatur 0-60 °C		
	<b>Beskrivelse av prosessen</b>	Opcon har to ulike maskiner; ORC og WST-CU. ORC er rettet mot lavtemperatur. En stand-alone/modul kraftverk. Basert på skrueturbin/tannhjulsturbin fra SRM AB. Kostnaden er svært følsom varmevekslerenes utforming. Tilgjengelighet typisk rundt 92-95 %. Har en nyere generasjon i produksjon i dag [4]. Virkningsgrad er oppgitt til å ligge mellom 12-15 %.		

**REFERANSECASE**

<b>Lokasjon</b>	Sverige, Munksjö (kunde: Aspa Bruk AB)
<b>Varmekilde</b>	76-81 °C spillvarmevann
<b>Kjøling</b>	2-21 °C kjølevann
<b>Elproduksjon (midlere)</b>	Opp til 580 kW <sub>el</sub> (netto), 675 kW <sub>el</sub> (brutto) (7,3 % el-virkningsgrad)
<b>Investeringskost</b>	7,8 mill NOK (ca. 13.500 NOK/kW <sub>el</sub> )
<b>D&amp;V-kostnader</b>	3-5 øre/kWh

**Beskrivelse av referansecase**

Aspa Bruk produserer bleket og ubleket sulfatmasse, og er verdensledende innen spesialpapir. Kapasitet på ca. 200.000 tonn årlig. Før installasjon ble avløpsvannet ledet ut i Vättern. Etter installasjon ledes avløpsvannet gjennom Opcon Powerbox.

<b>2</b>	<b>TEK. LEVERANDØR</b>		Turboden, under Mitsubishi Heavy Ind.	
	<b>Nasjonalitet</b>	Italia		
	<b>Antall leverte enheter</b>	289 totalt (à 32 spillvarme), 200 i drift		
	<b>Termodynamisk konsept</b>	ORC (superkritisk, fluid: OMTS,Solkatherm, Ekspander: To-steps turbo aksial-turbin)		
	<b>Modul/skreddersøm</b>	Modul (bl.a. PureCycle) og skreddersøm		
	<b>Investeringskostnad</b>	8.100 – 16.200 NOK/kW <sub>el</sub> <sup>2</sup>		
	<b>Teknologiens modenhet</b>	Kommersiell storskala		
	<b>Oppgitte applikasjoner</b>	Biomasse, spillvarme, geotermisk, sol		
	<b>Kjøling</b>	Vann på mellom 0-40 °C. Luft brukes også.		
	<b>Beskrivelse av prosessen</b>	Turboden er den ledende leverandøren i Europa av ORC-teknologi. Leverer PureCycle, småskala på 280kW, 91-149 °C. Større anlegg krever 1,2MW(th). Levert flere CHP-moduler til fjernvarme basert på biomasse. Har moduler på 200 kW til 10 MW, og skreddersyddde løsninger opp til 15 MW. 17-26 % el-virkningsgrad.		

**REFERANSECASE**

<b>Lokasjon</b>	Roeselare, Belgia (kunde: MIROM, Spie Belgium) <sup>3</sup>
<b>Varmekilde</b>	180 °C spillvarmevann
<b>Kjøling</b>	15 -25 °C kjølevann og kjøleluft
<b>Elproduksjon (midlere)</b>	3 MW <sub>el</sub> netto (16,5 % el-virkningsgrad)
<b>Investeringskost</b>	Ukjent
<b>D&amp;V-kostnader</b>	Ukjent

**Beskrivelse av referansecase**

Et eksempel på en skreddersydd løsning med bruk av oppvarmet vann på ca 180 °C. Ble idriftsatt i 2008. Anlegget er kun laget for el-produksjon, og er et av få prosjekter som Turboden har som er skreddersydd.

<sup>1</sup> Oppgitt for en 800 kW modul med investeringskostnad mellom 10,5 og 12 MSEK. Dette er inkludert tilkopling. kW i kW<sub>el</sub>

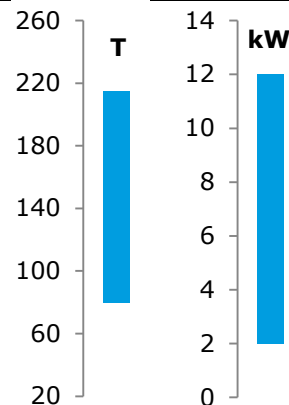
<sup>2</sup> Laveste pris angitt for 250 °C, høyeste 100 °C. Begge tilfeller spillvarmekilde på 10 MW(th), kjøling 10 °C. PureCycle = 16.200 kr/kW

<sup>3</sup> Illustrasjon hentet fra tilsendt materiell fra Turboden



**3 TEK. LEVERANDØR**Viking Heat Engines,  
CraftEngine

<b>Nasjonalitet</b>	Norge
<b>Antall leverte enheter</b>	21 (demonstrasjonsanlegg) <sup>4</sup>
<b>Termodynamisk konsept</b>	ORC (Fluid: ammoniakk, R410a, R134a, R236fa, R245fa. Ekspander: stempelmotor)
<b>Modul/skreddersøm</b>	Modul
<b>Investeringskostnad</b>	Mål: 162.000 NOK (13.500 NOK/kW <sub>el</sub> ) <sup>5</sup>
<b>Teknologiens modenhet</b>	Demonstrasjon
<b>Oppgitte applikasjoner</b>	Biomasse, spillvarme, geotermisk, sol
<b>Kjøling</b>	Vann på 0-20 °C, utgangstemp. 20-90°C

**Beskrivelse av prosessen**

El-virkningsgrad oppgitt til 5-17 %, moduler på 2-12 kW<sub>el</sub>, med mulighet til å kombinere flere maskiner i Power Packs (10-100 kW), og opp til 1 MW med kombinasjon av mange Power Packs. Kan operere ned til 30 % delast, hvilket er en fordel sammenlignet med turbomaskiner. Partner med AVL. Patentert teknologi, og er en av få på markedet innen små-skala kraftgjenvinning.

**REFERANSECASE**

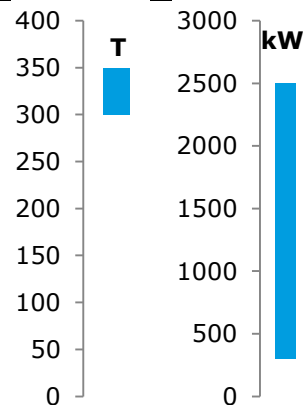
<b>Lokasjon</b>	Forbrenningsanlegg eid av Returkraft, Kristiansand
<b>Varmekilde</b>	Ca. 100 °C spillvarmevann
<b>Kjøling</b>	15 °C kjølevann
<b>Elproduksjon (midlere)</b>	Opp til 30 kW <sub>el</sub>
<b>Investeringskost</b>	7,7 MNOK (25.600 NOK/kW <sub>el</sub> ) <sup>6</sup>
<b>D&amp;V-kostnader</b>	Ukjent

**Beskrivelse av referansecase**

Bruker spillvarme fra forbrenningsanlegget til å produsere elektrisk kraft, ca 150.000-200.000 kWh per år. Et demonstrasjonsanlegg for videre utvikling av teknologien.

**4 TEK. LEVERANDØR**Maxxtec,  
eier av Adoratec

<b>Nasjonalitet</b>	Tyskland
<b>Antall leverte enheter</b>	120 i Europa
<b>Termodynamisk konsept</b>	ORC (Fluid: OMTS, Ekspander: Turbogenerator)
<b>Modul/skreddersøm</b>	Modul og skreddersøm
<b>Investeringskostnad</b>	Ukjent
<b>Teknologiens modenhet</b>	Kommersiell storskala
<b>Oppgitte applikasjoner</b>	Primært biomasse, men også spillvarme
<b>Kjøling</b>	Kjølevann, normalt 25-38 °C. CHP; 60/80°C

**Beskrivelse av prosessen**

Maxxtec har primært rettet seg mot biomasse-CHP markedet, med forholdsvis høye temperaturer, men har mulighet til lavere temperaturer i industri. Utvikler for tiden mindre enheter (opp til 80 kW<sub>el</sub>). Adoratec, kjøpt av Maxxtec, har utviklet teknologien. Blant de tre største leverandørene av ORC-systemer.

**REFERANSECASE**

<b>Lokasjon</b>	Canada, Weiss Envicraft
<b>Varmekilde</b>	Avfallsforbrenning
<b>Kjøling</b>	Kjølevann
<b>Elproduksjon (midlere)</b>	500 kW <sub>el</sub> / 3.000 kW <sub>th</sub>
<b>Investeringskost</b>	Ukjent
<b>D&amp;V-kostnader</b>	Ukjent

**Beskrivelse av referansecase**

De aller fleste ORC-enheter som er idriftsatt er med biomassefyrte kjeler, og produksjon av både varme og elektrisitet. Et av få prosjekter med avfallsforbrenning er presentert ovenfor.

<sup>4</sup> 18 maskiner til uttesting innenfor geotermisk, biomasse, solenergi og spillvarme verden over. I tillegg installert tre på Returkraft[26].


<sup>5</sup> Oppgitt i [27]; 20.000 euro per modul eller lavere. Ligger i dag antagelig noe høyere enn 15.000 NOK/kW<sub>el</sub>

<sup>6</sup> For komponenter. Demonstrasjonsprosjekt og dertil høye kostnader.



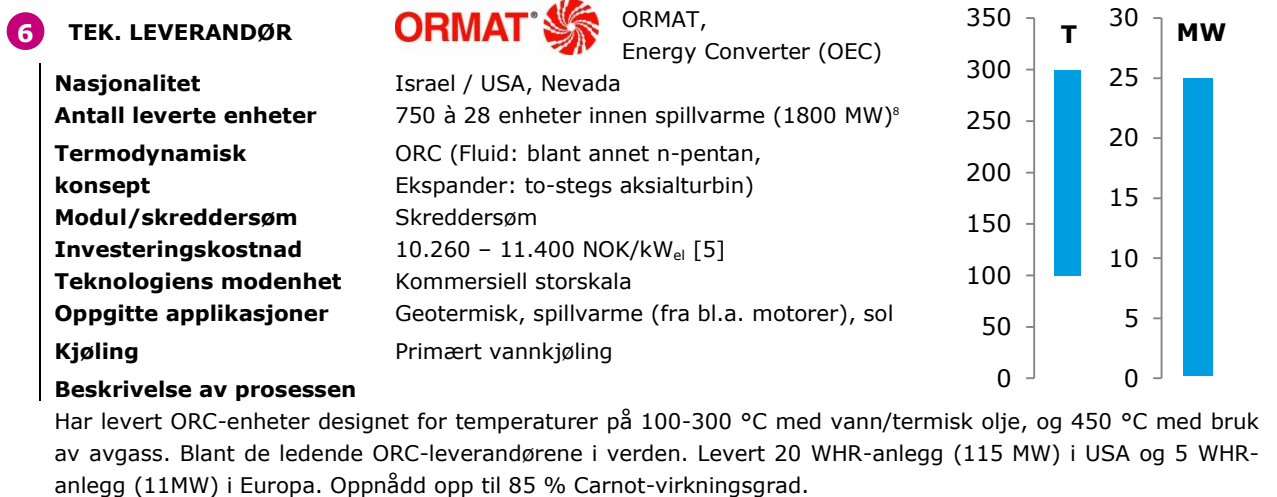


## REFERANSECASE


<b>Lokasjon</b>	Levice, Slovakia	
<b>Varmekilde</b>	77-116 °C spillvarmevann fra 2 gassturbiner	
<b>Kjøling</b>	4-43 °C kjølevann	
<b>Elproduksjon (midlere)</b>	Opp til 500 kW <sub>el</sub> (netto) (10 enheter i parallell)	
<b>Investeringskost</b>	Ukjent	
<b>D&amp;V-kostnader</b>	Ukjent	

**Beskrivelse av referansecase**

ElectraTherm idriftsatte 10 Green Machines i juni 2014 på et sentralisert fjernvarmesystem i Slovakia, med det formål å øke effektiviteten til to gassturbiner i et fjernvarmesystem. Varme som ikke kan benyttes til fjernvarme benyttes til å generere elektrisitet ved hjelp av ORC-modulene.



## REFERANSECASE

<b>Lokasjon</b>	Huelva, Spania (kunde: ENAGAS, 2011)	
<b>Varmekilde</b>	LNG regassifiseringsterminal	
<b>Elproduksjon (midlere)</b>	Kapasitet på 5 MW <sub>el</sub>	
<b>Investeringskost</b>	Ukjent	
<b>D&amp;V-kostnader</b>	Mindre enn 0,6 øre/kWh	

**Beskrivelse av referansecase**

Kraftgjenvinning fra spillvarme fra fordampningsprosessen av LNG i Huelva, Spania. Et av to prosjekter for ENAGAS.

<sup>7</sup> Pris oppgitt fra leverandør til 0,16-0,29 millioner dollar for alle størrelser. Større enheter gir billigere kW-pris. LCOE oppgitt fra leverandør på 17-45 øre/kWh, størsteparten av dette skyldes investeringskostnad.

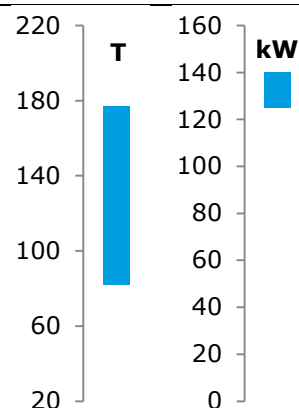
<sup>8</sup> I tillegg til 600 MW som for øyeblikket er under konstruksjon.

**7 TEK. LEVERANDØR**GE  
Clean Cycle

<b>Nasjonalitet</b>	USA
<b>Antall leverte enheter</b>	Ca. 100 enheter
<b>Termodynamisk konsept</b>	ORC (Fluid: R245fa. Integrert turbin/gen. Ekspander: en-fase radialturbin, 27.500 RPM)
<b>Modul/skreddersøm</b>	Modul
<b>Kostnad</b>	11.400–20.000 NOK/kW <sub>el</sub>
<b>Teknologiens modenhet</b>	Kommersiell
<b>Oppgitte applikasjoner</b>	Biomasse, spillvarme fra motorer og industri
<b>Kjøling</b>	Luft (10-40 grader)

**Beskrivelse av prosessen**

CleanCycle er utviklet av Calnetix (ThermaPower), nå kjøpt av GE. Teknologien er GE's småskalaløsning. GE har i tillegg OREGEN som er skreddersydde løsninger på 5 til 17 MW, men er for relativt høye temperaturer; 450-550 °C ved bruk av avgass. Har magnetisk lager i generator som gir lave D&V-kostnader.

**REFERANSECASE**

<b>Lokasjon</b>	Warrington, UK (Biffa Waste Services Ltd., 2011)
<b>Varmekilde</b>	GE Jenbacher J320 gassturbiner på fyllingsplass
<b>Kjøling</b>	Ukjent
<b>Elproduksjon (midlere)</b>	102 kW (netto)
<b>Investeringskost</b>	Ukjent
<b>D&amp;V-kostnader</b>	Under 0,6 øre/kWh

**Beskrivelse av referansecase**

Risley fyllingsplass er en av de første anleggene i UK som produserer elektrisitet fra avgassen på gassturbiner. Dette for å øke virkningsgraden til gassturbine hvor metan forbrennes for å generere elektrisitet. Eksporterer i gjennomsnitt 102 kW over et år, med i gjennomsnitt tilførsel av 980 kWth varme.

**8 TEK. LEVERANDØR**EnerTime  
ORCHID©

<b>Nasjonalitet</b>	Frankrike
<b>Antall leverte enheter</b>	7 totalt (2 ORCHID)
<b>Termodynamisk konsept</b>	ORC (Fluid: HFC, HFO, HFE or HCFO. Ekspander: flerstegs aksialturbin)
<b>Modul/skreddersøm</b>	Skreddersøm
<b>Investeringskostnad</b>	~13.100 NOK/kW <sub>el</sub> netto (kun ORC-maskin), 16.000-19.000 NOK/kW <sub>el</sub> netto <sup>9</sup> (EPC)
<b>Teknologiens modenhet</b>	Markedsintro
<b>Oppgitte applikasjoner</b>	Industriell spillvarme, biomasse, geotermisk.
<b>Kjøling</b>	Luftkjøling

**Beskrivelse av prosessen**

EnerTime har modellen ORCHID som er spesielt egnet mot industrielle applikasjonsområder. Foreløpig kun to installerte ORCHID-maskiner. Utvikler for tiden en mindre ORC-enhet med mulighet for kraftproduksjon basert på 80 °C varmekilder og OTEC (25/28 °C), og en større enhet (7 MW) for utnyttelse av geotermisk energi (realisert i 2017 tidligst).

**REFERANSECASE**

<b>Lokasjon</b>	Soudan, Frankrike (Kunde: FMGC)
<b>Varmekilde</b>	Smelteverk (70.000 tpy), termisk olje 200 °C / 6MW
<b>Kjøling</b>	Luftkjøling
<b>Elproduksjon (kW<sub>el</sub>)</b>	1.000 brutto/850 netto ( $\eta_{el,brutto} = 16,5\%$ )
<b>Investeringskost</b>	16,2 MNOK (19.000 NOK/kW <sub>el</sub> netto)
<b>D&amp;V-kostnader</b>	324.000 NOK per år (4,7 øre/kWh)

**Beskrivelse av referansecase**

Turnkey-prosjekt levert av EnerTime. Totalkostnaden inkluderer selve modulen, mekanisk (kun tilkobling til termisk syklus) og elektrisk tilkobling. Prosjektet inkluderte også transformator for 20 kV-konvertering til intern bruk i smelteverket. Prosjektet ble gjennomført i perioden 09/2011 til 11/2012. Genererer 6,8 GWh/år.

<sup>9</sup> Mekanisk og el-tilkobling, civil work, men uten varmeveksler mot avgass (som kan være en betydelig kostnad).

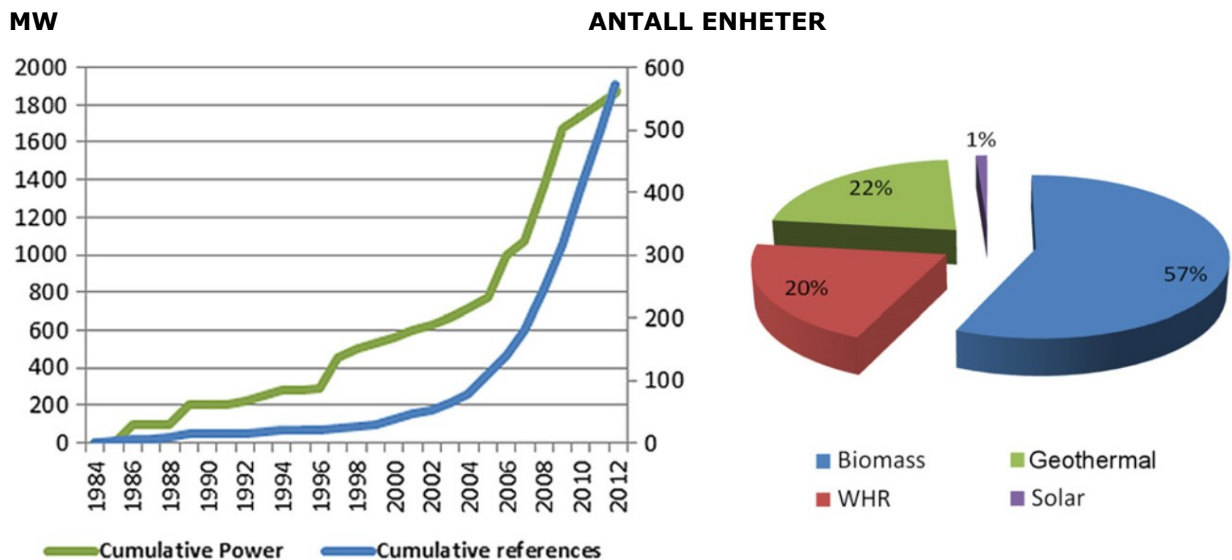
#### 4.2.4 ORC-markedet og sentrale aktører

ORC-markedet har vokst drastisk de siste 10 årene, og er en moden teknologi innenfor applikasjonsområdene biomasse, geotermisk og WHR. ORC med solenergi som varmekilde har til nå vært mindre utbredt, og er per i dag umodent sett i forhold til de andre markedene.

Mye av teknologiutviklingen har foregått innenfor sementproduksjon. Det første ORC-systemet på en sementfabrikk ble installert i Lengfurt. Systemet leverer 1,2 MW<sub>el</sub>, eller 12 % av fabrikkens elektrisitetsbehov. Prosjektet var vellykket, men elektrisitetsprisene sank raskt årene etter installasjonen. Dette førte til at aktørene i det Vest-Europeiske sementmarkedet konkluderte med at ORC ikke var en lønnsom teknologi.

25 WHR-anlegg ble senere installert i Kina i 2006. I 2009 var det 455 WHR-anlegg (525 totalt innen sementindustrien i verden), og i 2013 rundt 740 i Kina. 99 % av anleggene var i 2009 basert på konvensjonell Rankine Cycle basert på damp, hvor ingen anlegg var basert på Kalina og svært få på ORC [6].

I Europa skjedde det lite, før WHR-teknologi igjen kom i fokus i 2008/2009 etter at man forsto at markedet vokste kraftig i Kina. Antallet ORC-enheter er fremdeles lavt sammenlignet med konvensjonelle Rankine Cycler, men spesielt vestlige selskaper benytter seg av ORC-teknologien. Dette skyldes blant annet at europeiske og amerikanske sementfabrikker er relativt små, hvilket gjør ORC fordelaktig.



Figur 4.6: Oversikt over markedsutvikling innenfor ORC-markedet frem til 2012. Hentet fra [3], utført av University of Liege (2011/2012). Figur til høyre viser andel av antallet ORC-enheter totalt.

De største aktørene i markedet sett i forhold til antall installerte enheter og effekt er [7]:

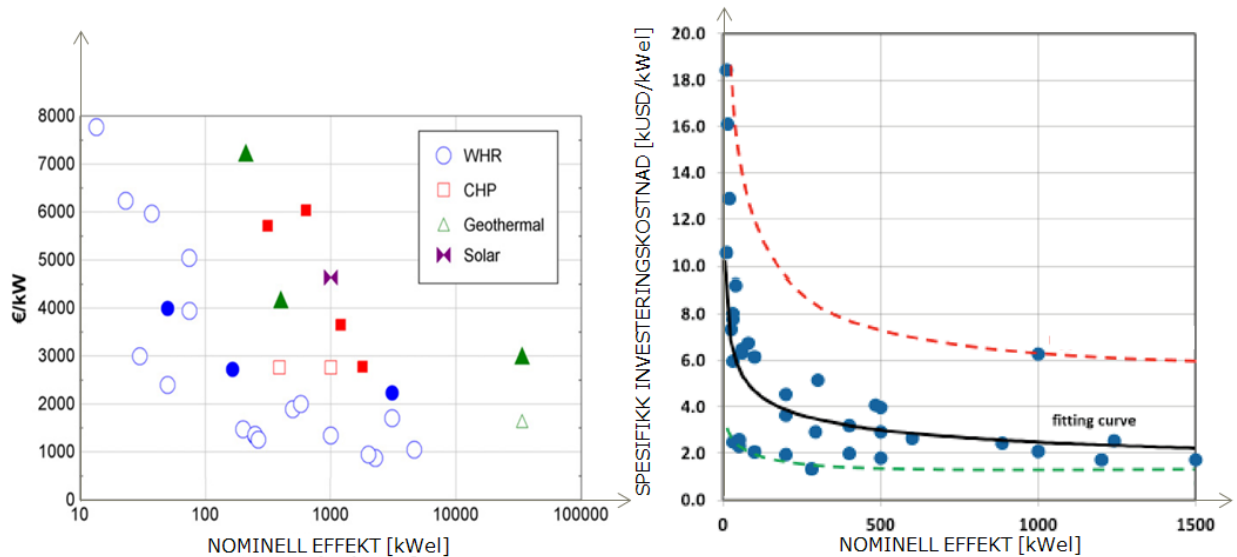
- Italienske Turboden (45 % installerte enheter i 2012, 8.6 % akkumulert kraftproduksjon)
- Amerikanske ORMAT (24 % installerte enheter i 2012, 86 % akkumulert kraftproduksjon)
- Tyske Maxxtec (23 % installerte enheter i 2012, 3.4 % akkumulert kraftproduksjon)

Andre aktører som leverer mindre enheter (under 500 kW) er relativt nye i markedet, for eksempel mikro-CHP (basert på biomasse eller solvarme) og ORC tilknyttet motorer og gassturbiner (*bottoming cycles*). Disse kan anses for kommersielle, men har ennå ikke nådd stor-skala kommersialisering.

#### 4.2.5 Oppsummering ORC

Grafen til venstre i Figur 4.7 presenterer typiske investeringskostnader oppgitt i Euro/kW per ORC-modul, i forhold til installert effekt. Tallene er hentet fra en studie gjennomført i 2013 [3]. Sammenligning av kostnader kan være vanskelig, da leverandørene priser leveransen på forskjellig måte. Likevel viser grafen en generell trend som tilsier at WHR-systemer er billigere enn CHP-, sol- og geotermiske systemer, og at kostnaden er synkende med større anlegg. Det er verdt å merke seg at fylte punktene i grafen under indikerer totalpris (inkluderer kostnader forbundet med prosjektering og prosessintegrasjon osv.) mens de «hule» punktene kun inneholder kostnaden til selve modulen. Førstnevnte kan være en vesentlig del av investeringskostnad (opp til 2-3 gangen av selve modulen) [3]. Totalkostnaden forbundet med dette er økende ved høyere installert effekt, da dette normalt krever mer komplisert prosjektering. Spesifikk kostnad er likevel synkende ved økt nominell effekt.

Generell kostnadskurve uavhengig av applikasjonsområde er gitt av den høyre grafen i Figur 4.7 [8]



**Figur 4.7: Venstre: Kostnad sammenlignet med størrelsen på anlegget. Høyre: Kostnadskurve for ORC gitt av spesifikk investeringskostnad sammenlignet med effekt [8]**

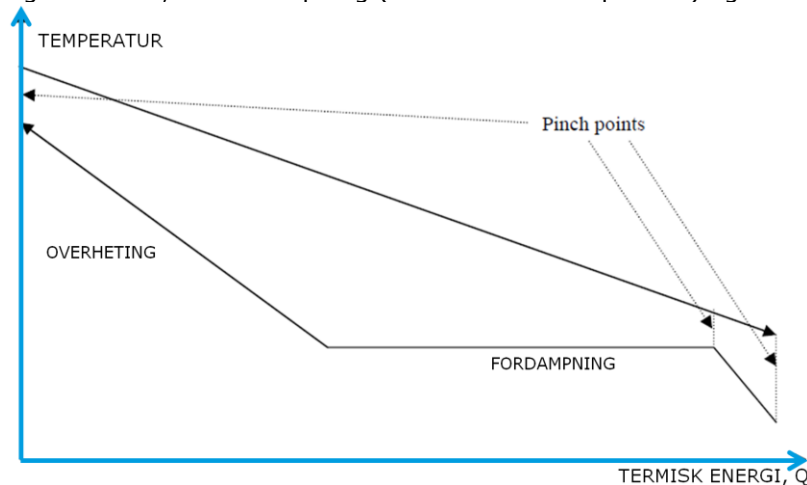
ORC er den mest utbredte teknologien i dag for utnyttelse av lavtemperatur spillvarme. Teknologien har hatt en ekstrem utvikling de siste 10 årene, og kanskje spesielt de siste 5 årene, og store aktører satser på teknologien. Per i dag er det den teknologien som har lavest kostnad (i tillegg til Kalina) for anlegg på 200 kW og oppover.

### 4.3 Kalina Cycle®

#### 4.3.1 Beskrivelse av teknologien

Kalina-prosessen er som nevnt tidligere i utgangspunktet en Rankine Cycle på samme måte som ORC. Akkurat som ORC avviker den fra Rankine Cycle etter måten arbeidsmediet oppfører seg på (dets egenskaper).

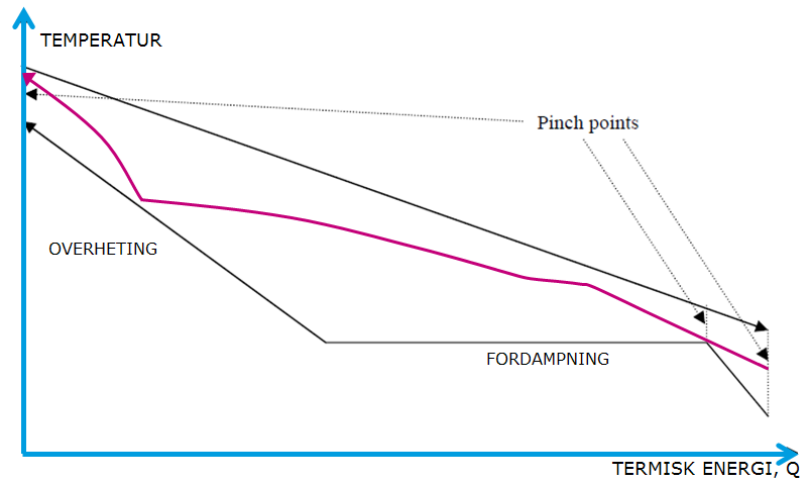
I en Kalina-prosess er det anvendte mediet en blanding av vann og ammoniakk. Blandingsforholdet kan justeres, men typisk er det omkring 50-50. Den helt klare termodynamiske fordel ved arbeidsmediet er at det ikke fordampes ved en bestemt temperatur, som for eksempel vann gjør. Siden fordampningstemperaturen er trykkbestemt, så vil den stige etter hvert som deler av blandingen (ammoniakken) fordampes. Konsekvensen av dette er at det er mulig å utforme en varmeveksler hvor varme tilføres arbeidsmediet (i form av en varm gass eller væskestrøm), med en gjennomsnittlig temperaturforskjell som er betydelig mindre enn for en vannbasert varmeveksling. I Figur 4.8 nedenfor er det vist et eksempel på en fordampning av vann inntegnet i et T-Q diagram. Den øverste kurven er avkjøling av en (gass-)strøm og den nederste kurven illustrerer (fra høyre mot venstre) først en oppvarming av væske, en fordampning (ved konstant temperatur) og til slutt en overheting.



Figur 4.8: Fordampningsprosess av kun vann (nederste kurve) og en varm (gass-) strøm over.

Ved ett av de inntegnede *pinch-points*ene vil varmevekslingens minste temperaturforskjell mellom de to mediene finne sted; den største temperaturforskjellen vil (typisk) være der hvor fordampningen er fullstendig (metningslinje damp). Det er verdt å merke seg at siden X-aksen er  $Q$  (den overførte termiske effekten), så blir helningen på kurvene lik  $1 / (m \cdot C_p)$  (massestrøm multiplisert med  $C_p$ , varmekapasitet). Under fordampningen er  $C_p$  å betrakte som uendelig. Ved endringer i massestrømmene vil disse kurvene endre innbyrdes plassering. Derfor er det viktig, ved design av varmeveksleren, å sikre at temperaturforskjellene mellom kurvene (og dermed arealet mellom kurvene) er så liten som mulig.

Et tilsvarende temperaturforløp resulterende fra en vann-ammoniakk blanding kan ses i nedenstående figur.



Figur 4.9: Inntegret fordampningsprosess for ammoniakk og vann (rosa prosesslinje)

Det ses tydelig av dette at fordampningskurven nå ligger vesentlig tettere på temperaturkurven for den avkjølte (gass-)strømmen. Termodynamisk oppnår man varmeveksling med en høyere grad av reversibilitet og det redusert produksjon av entropi. Det ideelle ville være om to kurver var helt parallelle og tett inntil hverandre. Mye av forskningen på de fleste typer Rankine-prosesser går ut på å optimalisere denne tilpasningen.

Man kan i prinsippet bruke en dampturbin til ekspansjonen i en Kalina-prosess med bruk av ammoniakk og vann som arbeidsmedium, men det er et litt mer komplisert system til kondensering av vann-ammoniakk-blandingen etter turbinen. Dette gjøres dels for at kunne presse vandamptrykket lavere og dels for at kunne justere blandingsforholdet mellom vann og ammoniakk i det kondensatet/matevannet som sendes til kjelen igjen. Bortsett fra disse justeringene oppfører prosessen seg nesten som en konvensjonell Rankine Cycle.

Sammenlignet med ORC oppnår Kalina Cycle en noe høyere virkningsgrad ved lave temperaturer og stor skala. Ulempen med systemet er arbeidsmediet, som er giftig i store konsentrasjoner (det må derfor sikres at tettheten til hele systemet er god, herunder spesielt turbinen), kortere levetid og er vanskeligere å få til å fungere i kompakte systemer. Anleggene er også kostnadseffektive (lav kostnad gitt i NOK/kW<sub>el</sub>) og lettere å drifte enn ORC [6].

#### 4.3.2 Teknologiens utviklingsløp og modenhet

Det første patentet tilknyttet Kalina Cycle® er fra 1985, og rettighetene til dette og til bruk av navnet Kalina, tilhører et selskap ved navn Recurrent Engineering LLC, som er et datterselskap av Global Geothermal. Det danske selskapet FLSmidth har rettighetene i de fleste land til bruk av prosessen i forbindelse med sementfabrikker. Der er i dag 15 anlegg i drift innen forskjellige områder, deriblant geotermisk og utnyttelse av industriell spillvarme fra forskjellige industrier. De første installasjonene (i MW-klassen) er fra 1991.

Det er utviklet en «andre-generasjons» utgave av Kalina-prosessen. Denne skal være bedre egnet for høyere temperaturer på spillvarmen. Der er ikke funnet referanser på anvendelser av denne teknologien. Det som er kjent er at teknologien er utviklet av Dr. Kalina, hvor rettighetene er eid av Kallex LLC.

Teknologien vurderes som kommersiell, basert på at det er levert anlegg av stor størrelse på kommersielle betingelser. Prosessen er imidlertid stadig beskyttet av patenter og lisenser. Dette, kombinert med ammoniakks egenskaper (giftig og brennbar), gjør at det vil ta lang tid (hvis det overhodet kommer til at skje) innen det blir en kommersiell suksess. Selv ved det faktum, dersom det skulle vise seg at prosessen er mer konkurransedyktig (pris og virkningsgrad) enn ORC, så kan lisensbetingelser være av en sådan art at kundene søker mot mer «åpne» prosesser.

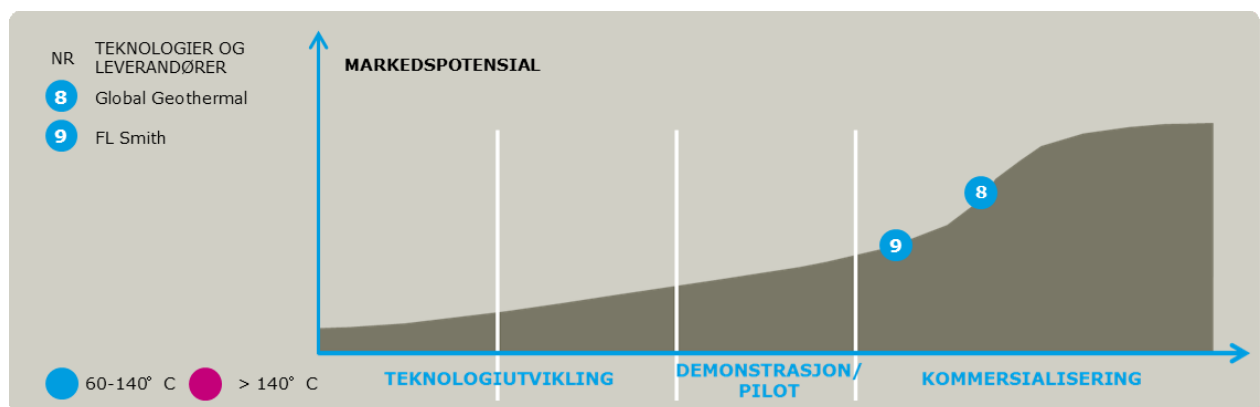
### 4.3.3 Presentasjon av ulike teknologileverandører m/caser

Oversikt over bygde Kalina-anlegg er vist i Tabell 4.1 under.

År	Effekt	Prosjekt	Kunde	Land	Applikasjon
1991	6,5 MW	Canoga Park	Exergy Inc	USA	Gassturbin på kraftverk
1998	4,5 MW	Fukuoka	MITI	Japan	Forbrenningsovn
1999	3,5 MW	Kashima	Sumitomo	Japan	Smelteverk
2000	2,0 MW	Husavik	Municipality	Island	Geotermisk
2006	4,0 MW	Fuji Oil	Fuji Oil Refinery	Japan	Oljeraffineri
2009	3,4 MW	Unterhaching	Municipality	Tyskland	Geotermisk
2009	0,6 MW	Bruchsal	EnBW Utility	Tyskland	Geotermisk
2009	50,0 kW	Tibet	SSNE	Tibet	Geotermisk
2010	50,0 kW	Shanghai World Expo	SSNE	Kina	Solvarme
2010	50,0 kW	Taiwan	SSNE	Taiwan	Geotermisk
2011	50 kW	Otari	GERD	Japan	Geotermisk
2011	2 MW	Husavik 2 (repower)	Wasabi Energy	Island	Geotermisk
2011	8,6 MW	Khairpur Cement Plant	FLSmith / DJ Khan	Pakistan	Industriell spillvarme
2012	50 kW	Ministry of Environment	GERD	Japan	Geotermisk
2013	4,5 MW	Taufkirchen	GeoEnergie Taufkirchen	Tyskland	Geotermisk
2013	4,75 MW	Star Cement plant	FLSmith/Star Cement	De forente Arabiske Emirater	Industriell spillvarme

Tabell 4.1: Oversikt over bygde anlegg basert på Kalina Cycle (R)

Kalina-teknologiens modenhet er vurdert til å være kommersiell. Siden teknologien hittil i størst grad er benyttet innen geotermisk, er det vurdert som en markedsintroduksjon innen utnyttelse av industriell spillvarme. FLSmith er som nevnt tidligere en lisenshaver innen bruk av Kalina i sementfabrikker, og er markert nedenfor som tidlig i kommersialiseringsfasen.



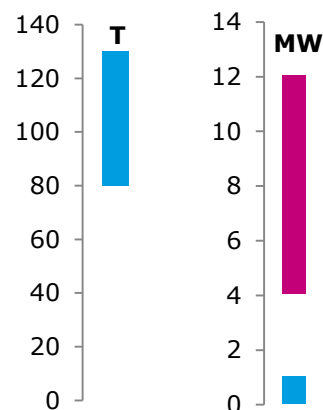
Figur 4.10: Illustrasjon av omtrentlig modenheten til Kalina Cycle.



**8 TEK. LEVERANDØR**

Global Geotherm (GGL)  
Parent: Wasabi Energy

<b>Nasjonalitet</b>	UK / Australia
<b>Antall leverte enheter</b>	10 skreddersydde, og 5 moduler à 50 kW <sub>el</sub> Totalt 42 MW <sub>el</sub>
<b>Termodynamisk konsept</b>	Kalina Cycle®, Arb.med: Ammoniakk/Vann, Ekspander: radialturbin
<b>Modul/skreddersøm</b>	Modul og skreddersøm
<b>Investeringskostnad</b>	8.550 – 11.400 NOK/kW <sub>el</sub> [9] Conoga Park kostet rundt \$4 millioner, \$1.100 /kW <sub>el</sub> (i 1991)
<b>Teknologiens modenhet</b>	Kommersiell
<b>Oppgitte applikasjoner</b>	Sol, geotermisk, industri, gassturbiner
<b>Kjøling</b>	Vann- og luftkjøling

**Beskrivelse av prosessen**

Har både modulbaserte på mellom 50 og 1000 kW, og skreddersydde løsninger på mellom 4-12 MW. Har anlegg innenfor geotermisk, smelteverk, oljeraffinering. GGL eier alle rettigheter til første generasjons Kalina Cycle, med 200 tilhørende patenter. De fleste anlegg har varmekilde på rundt 120 °C.

**REFERANSECASE**

<b>Lokasjon</b>	Japan, Kashima Steel Works (Sumitomo Metals 1999)
<b>Varmekilde</b>	98 °C spillvarmevann (76 °C utgangstemp)
<b>Kjøling</b>	18 °C kjølevann (3380 m <sup>3</sup> /h)
<b>Elproduksjon (midlere)</b>	3.450 kW <sub>el</sub>
<b>Investeringskost</b>	Ukjent
<b>D&amp;V-kostnader</b>	~0,6 øre/kWh

**Beskrivelse av referansecase**

Benytter varme fra kjølevannet i smelteverket til å produsere elektrisitet. ORC ble på den tiden vurdert til å kun produsere 60% av Kalina-prosessen. Har operert med en kapasitetsfaktor på 96 %, og produserer omkring 29.000 MWh årlig. Benytter Kalina Cycle® System 11.

**9 TEK. LEVERANDØR**

FL Smidth,  
Kalina Cycle® -lisens i  
sementindustri

<b>Nasjonalitet</b>	Danmark
<b>Antall leverte enheter</b>	2 (2 av 10 Kalina-anlegg)
<b>Termodynamisk konsept</b>	Kalina Cycle® KCS1-2Aa (Arb.med: Ammoniakk/Vann, Ekspander: To- stegs turbo aksial-turbin)
<b>Investeringskostnad</b>	Ukjent
<b>Teknologiens modenhet</b>	Markedsintro
<b>Oppgitte applikasjoner</b>	Kun innenfor sementindustrien

**REFERANSECASE**

<b>Lokasjon</b>	Pakistan, Khairpur Cement Plant (Kunde: DG. Khan Cement Company)
<b>Varmekilde</b>	Avgass fra klinkerkjøling, og forvarmer
<b>Kjøling</b>	Luftkjøling
<b>Elproduksjon</b>	8.600 kW
<b>Investeringskost</b>	Ukjent
<b>D&amp;V-kostnader</b>	Ukjent

**Beskrivelse av referansecase**

FLSmidth, som EPC-leverandør og produsent av komponenter til sementindustrien, idriftsatte et anlegg i 2013 med hjelp fra Wasabi Energy. Anlegget var et Kalina-anlegg basert på KCS1-2Aa som er en av mange Kalina-«modeller». Varmen hentes fra avgassen fra klinkerkjølingen i sementanlegget og forvarmeren.



#### **4.3.4 Oppsummering Kalina Cycle ®**

De seneste årene har det vært en rask utvikling av Kalina-teknologien, både i utvikling av systemet, men også innenfor et økt antall applikasjonsområder. En av fordelene ved Kalina er noe høyere virkningsgrad sammenlignet med eksempelvis ORC - i hvert fall i teorien. Likevel har det ikke vært en rask vei til kommersialisering, med få anlegg installert, primært innenfor geotermisk. Mye av dette skyldes at Kalina Cycle® er en patentert teknologi, hvor forretningsmodellen i stor grad går ut på lisensiering. Dette gir som oftest en noe tregere utbredelse av teknologien, med krevende kontrakter og store lisenssummer, og dertil færre incentiver for en potensiell lisenshaver. De seneste årene har likevel større energiselskaper og utstørsprodusenter til industrien vist interesse for teknologien, og til dels satt fart på kommersialiseringen.

Med det sagt er Kalina fremdeles en relativt ung teknologi sammenlignet med for eksempel ORC, til sammenligning på samme stadiet som ORC for 30 år siden [10], og er delvis på demonstrasjonsstadiet innenfor enkelte applikasjoner.

#### 4.4 Transkritisk/Superkritisk Rankine Cycle

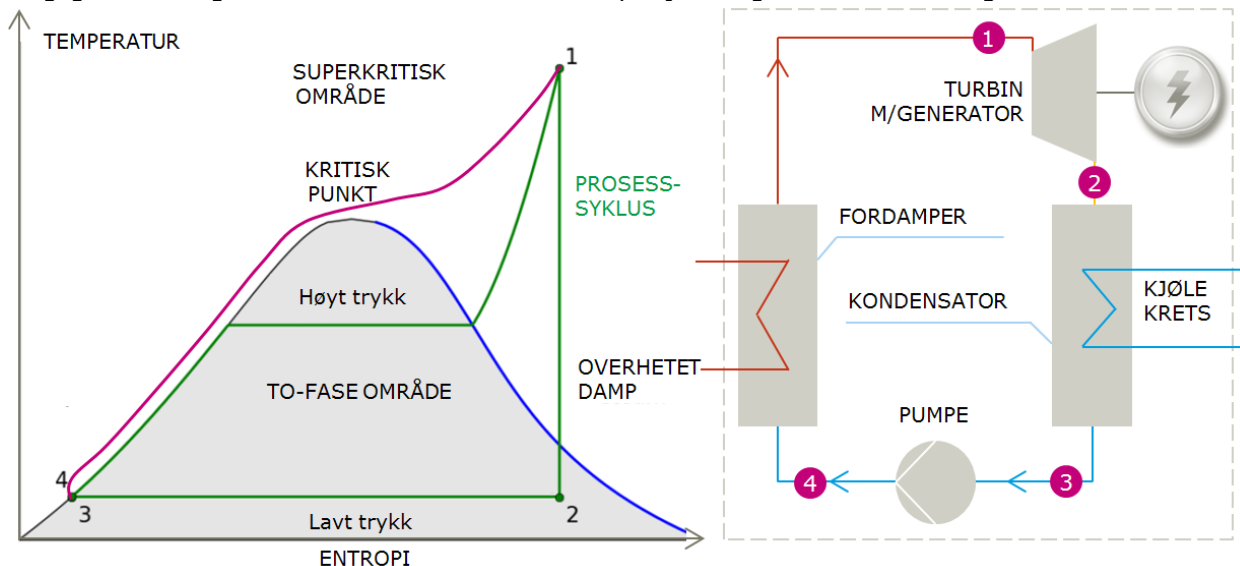
Rankine Cycle er som nevnt tidligere en fundamental termodynamisk prosess, med flere teknologiske utspring; deriblant dampturbin, ORC og Kalina Cycle ®. I tillegg til disse bør det trekkes frem tre kraftproduserende teknologier basert på Rankine Cycle:

- Superkritisk/transkritisk Rankine Cycle
- Trilateral Flash Cycle
- Absorpsjons-Rankine Cycle

Felles for disse er at de baserer seg på de tilnærmet samme bestanddelene; varmeveksler for varm og kald siden, en ekspander og en pumpe til å drive fluidet rundt. Effektiviserende justeringer på den opprinnelige Rankine-prosessen gjøres i disse teknologiene enten på varmeopptakssiden (som Kalina og ORC) eller på ekspansjonsprosessen. I en transkritisk/superkritisk Rankine Cycle er den største forbedringen knyttet til varmeopptakssiden.

##### 4.4.1 Beskrivelse av teknologien

I en superkritisk/transkritisk Rankine Cycle er trykket i fordamperen høyere enn det kritiske trykket for arbeidsmediet. Dette er fordelaktig, da det gir et større varmeopptak i fordamperen, gode arbeidsforhold for turbinen og økt totalvirkningsgrad på prosessen [11]. Flere moderne dampturbinanlegg basert på fossile energikilder benytter i dag superkritiske prosesser for å øke den termiske virkningsgraden. I Figur 4.11 nedenfor er det vist et flytskjema og tilhørende TS-diagram.



**Figur 4.11: Superkritisk prosess (rosa prosess i superkritisk område) sammenlignet med en konvensjonell Rankine Cycle (grønn prosess, som vist tidligere). Kun for illustrasjon.**

Ulempen med prosessen er at komponenter i fordamperen og turbinen skal takle høye trykk og temperaturer. Materialer i fordamperen skal tåle høye temperaturer, hvor manglende tilgang på kjøling kan være katastrofalt. Tilsvarende er superlegeringer og keramiske materialer i turbinen også en nødvendighet for at turbinens funksjon opprettholdes.

Forskning har til nå vurdert flere alternative arbeidsmedier for prosessen; både organiske fluider som isobutan, propan, propylen osv. og CO<sub>2</sub>. CO<sub>2</sub> har flere egenskaper som gjør den til et passende arbeidsmedium i en superkritisk Rankine Cycle; moderat kritisk punkt, stabilt, lav kostnad i tillegg til at den har liten klimaeffekt [11]. Echogen er en teknologileverandør, som vil presenteres i mer detalj nedenfor, som benytter CO<sub>2</sub> i en superkritisk Rankine Cycle.

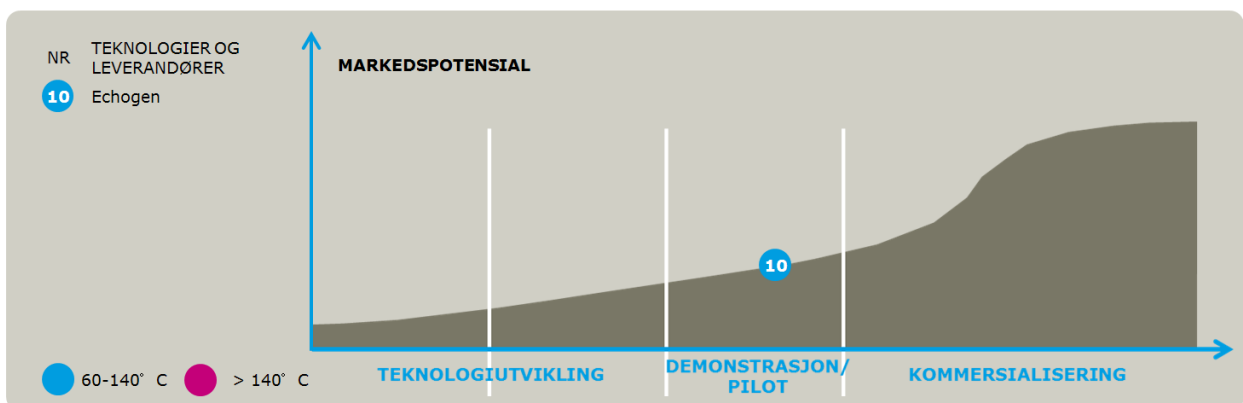
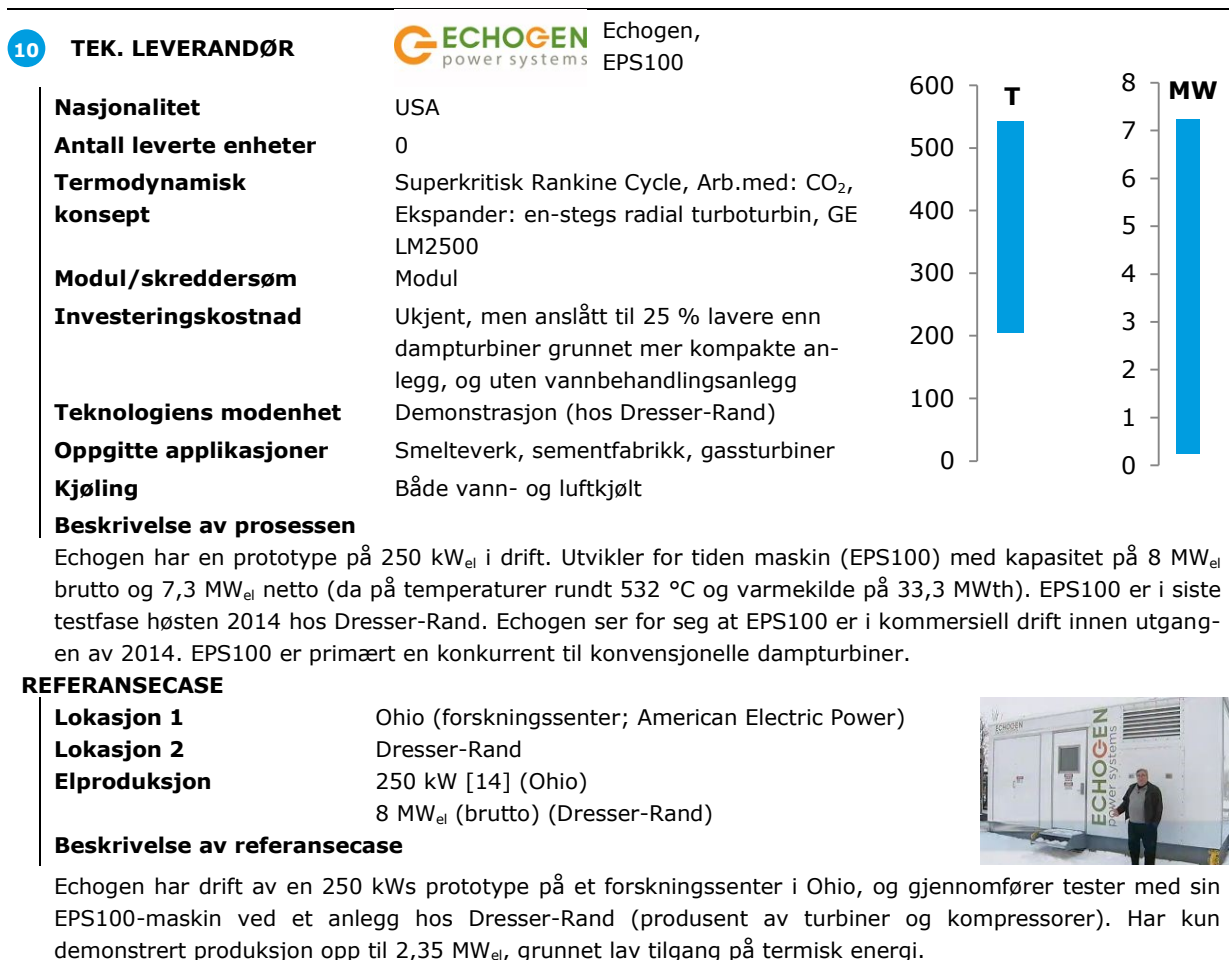
##### 4.4.2 Teknologienes utviklingsløp og modenhet

Barrieren for teknologien ligger primært i designet av turbinen. Foreløpig er det få turbiner egnet for andre typer fluider enn vann, som har kommet videre fra FOU-stadiet [12]. Dette skyldes at et arbeidsmedium i superkritisk område er ganske ustabil, og kan resultere i varierende mengder væske- og gassandel. Turbinen må derfor takle begge faser – i tillegg til å ha høy virkningsgrad.

I Norge ble det gjennomført et prosjekt i perioden 2007-2013 (ROMA - *Teknologienes utviklingsløp og modenhet*) finansiert av Forskningsrådet, for blant annet å se på CO<sub>2</sub> i en superkritisk/transkritisk Rankine Cycle. Resultatet var oppløftende, men prosessen opplevde to store problemer knyttet til korrosjon og duggpunktproblematikk. Det ble konkludert med at det var behov for å videreføre forskningen i industriell skala [13].

Amerikanske Echogen er som nevnt en teknologileverandør av superkritisk Rankine med bruk av CO<sub>2</sub>. Bedriften har foreløpig et «patent pending».

#### 4.4.3 Presentasjon av teknologileverandør m/case



Figur 4.12: Illustrasjon av modenheten til teknologien

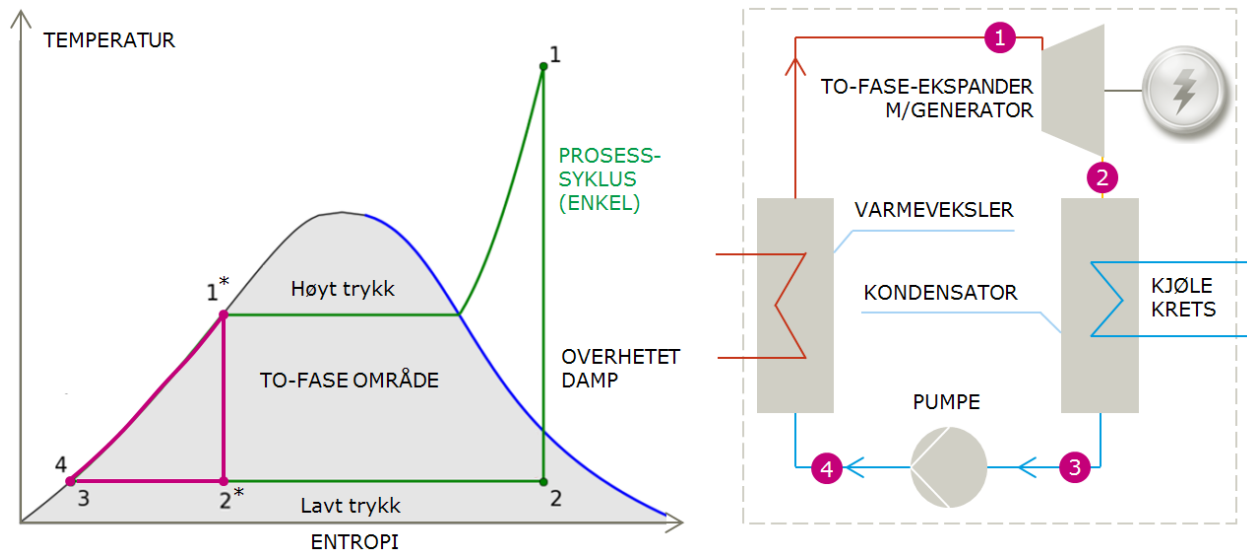
#### 4.4.4 Oppsummering av superkritisk Rankine Cycle

Superkritisk/transkritisk Rankine Cycle er en relativt spennende teknologi, og har klare fordeler ved at prosessen har effektivt varmeopptak og relativt enkel konfigurasjon. Barrierene er primært utforming av turbinen og prosessens høye trykk. En stadig utvikling innenfor mer robuste materialer og bedre to-fase-turbiner kan gi grobunn for at teknologien på sikt kan bli kommersielt tilgjengelig i stor skala.

## 4.5 Trilateral Flash Cycle

### 4.5.1 Beskrivelse av teknologien

En Trilateral (tresidet) Flash Cycle er en kraftproduserende syklus hvor ekspansjonen foregår i væskeområdet istedenfor i gassområdet, som er mest vanlig i konvensjonelle Rankine-prosesser. Ekspanderen er dermed en to-fase ekspander. Ellers er det mest likt sammenlignet med den vanlige Rankine Cycle.



**Figur 4.13: TS-diagram til venstre for å illustrere forskjellen på en enkel Rankine Cycle og en Trilateral (prosessstall markert med stjerne \* og rosa). Flytskjema illustrert til høyre.**

Ved å unngå å komme inn i to-fase området i varmepumpe, hvor varme overføres fra varmekilden til arbeidsmediet, vil temperaturforskjellen være relativt konstant sammenlignet med varmekilden. Dette reduserer irreversibiliteter (tap), og gjør at varmeoverføringen blir mer effektiv. Tilsvarende fordeler har man likevel ved andre typer prosesser, deriblant superkritisk/transkritisk Rankine.

En relativt ny studie (2014) viser til 30-40 % høyere termisk virkningsgrad sammenlignet med ORC (81 % eksergi-virkningsgrad) med bruk av isobutan og varmekilde på 88 og 118 °C [15].

### 4.5.2 Teknologiens utviklingsløp og modenhet

En stor barriere for teknologien er (tilsvarende for superkritisk Rankine) å utvikle ekspandere som takler to-fase-ekspansjon med høy adiabatisk effektivitet, spesielt i stor skala. Fortrengingsekspandere, for eksempel Lysholmturbinen (som benyttes i ORC-teknologien Opcon Powerbox, og som er en dobbeltskrueekspander) og andre fortrengningsmaskiner kan ekspandere effektivt i to-faseområdet. Med det sagt kan prosessen rent teoretisk oppnå høy virkningsgrad.

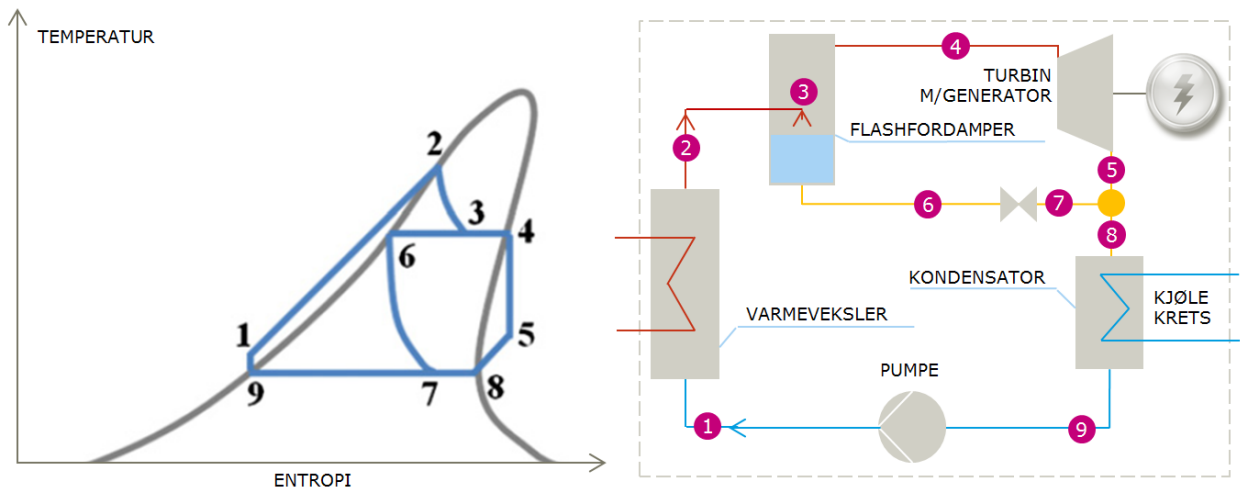
Rambøll har ikke kunnet finne bedrifter som har tatt teknologien videre fra forskningsstadiet innenfor kraftproduksjon basert på varme.

## 4.6 Organic Flash Cycle

### 4.6.1 Beskrivelse av teknologien

En måte å unngå en to-fase-ekspansjon i en trilateral prosess på er å separere gassen og væsken før turbinen, slik at det kun er gass som entrer turbinen. Forskere på University of California (Berkeley) har forsket på en slik prosess, kalt Organic Flash Cycle (OFC), siden den også benytter organiske stoffer som arbeidsmedium.

Til sammenligning med ORC skal teknologien være 9-13 % mer effektiv enn ORC [16] [15]. Dette er likevel ikke demonstrert. Fordelen ligger i en mer effektiv varmeoverføring i varmeveksleren. En ulempe med prosessen er dog strupingen i «flashfordamperen» da dette fører til eksergi-destruksjon.



Figur 4.14: TS-diagram over OFC til venstre, flytskjema til høyre [12]

### 4.6.2 Teknologiens utviklingsløp og modenhet

OFC har som nevnt ikke blitt demonstrert, og er kun på forskningsstadiet. Det er ukjent om en bedrift har utviklet teknologien videre mot det kommersielle marked.

## 4.7 Absorpsjons-Rankine Cycle

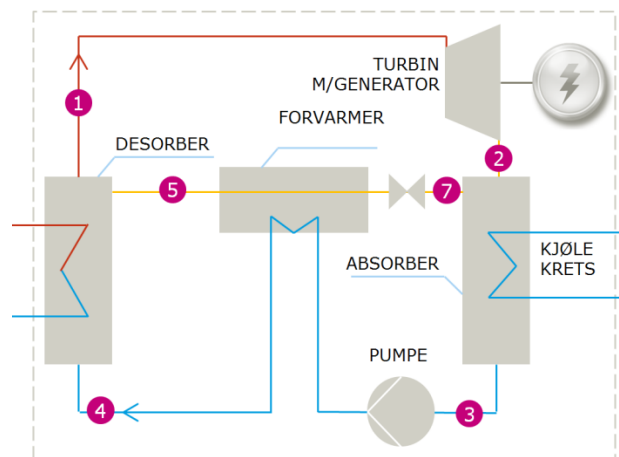
### 4.7.1 Beskrivelse av teknologien

En absorpsjons-Rankine Cycle er en prosess som baserer seg på en konvensjonell Rankine Cycle, men hvor en kondensator og fordampner er byttet ut med en absorber og desorber, og et arbeidsmedium bestående av en absorbent og et annet medium. Prosessen kan oppnå over 10 % i el-virkningsgrad dersom spillvarme på mellom 130 og 160 °C benyttes. ORC-leverandører i tilsvarende temperaturområde oppnår en virkningsgrad på rundt 8-10 % (bl.a. ElectraTherm, E-Rationale, Con-power). ORC-leverandøren Viking Heat Engine (CraftEngine) har oppnådd testresultater på 9,5 % på 155 °C.

Prinsippet bak teknologien har eksistert i over 50 år [17], hvor ammoniakk var som absorbent i kombinasjon med vann. Det er først etter årtusenskiftet at man har tatt forskningen på teknologien et skritt videre.

En skjematisk fremstilling av en typisk absorpsjons-Rankine Cycle er vist i Figur 4.15. Arbeidsmediet består av en absorbent og et fluid med gode termodynamiske egenskaper, eksempelvis CO<sub>2</sub>.

Fra absorberen pumpes arbeidsmediet med absorbert CO<sub>2</sub> (dersom det benyttes) gjennom forvarmeren til desorberer (4). I desorberer varmes arbeidsmediet opp av en varmekilde (for eksempel spillvarme fra industri). Dette fører til at CO<sub>2</sub> desorberes (frigjøres), og trykket øker betraktelig. CO<sub>2</sub> (1) og absorbent under høy trykk i mettet væskeform (5) separeres til to strømmer, hvor CO<sub>2</sub> går videre til turbinen. I turbinen reduseres trykket og elektrisitet blir generert ved hjelp av en generator. Absorbenten (7) og lavtrykk CO<sub>2</sub> (2) kombineres igjen i absorberer. Absorpsjonsprosessen er eksotermisk (varmeavgivende prosess), hvilket gjør at det er behov for kjøling. Luft eller vann med omgivelsestemperatur benyttes. CO<sub>2</sub> absorberes i absorbenten til løsningen er mettet, og kjøles videre til underkjølt tilstand (3). Deretter pumpes arbeidsmediet videre, og syklusen kjøres på nytt.



Figur 4.15: Skjematisk flytskjema av en absorpsjons-Rankine Cycle [17]

C3 (*Carbon Carrier Cycle*) er en patentert absorpsjons-Rankine Cycle. Teknologien er svensk og er basert på prinsipper nevnt ovenfor. Ifølge patentet reduserer teknologien energitapet (øker virkningsgraden) og er en kostnadseffektiv Rankine Cycle, spesielt med spillvarmekilder med lave temperaturer (best egnet til 70-120 °C). I stedet for en kondensator benytter prosessen en absorpsjonsprosess i turbinen ved hjelp av CO<sub>2</sub> og et amin som gjør at fluidet ut av turbinen er i væskeform (ned mot -70 °C). Dette gir fordeler med tanke på evne til å pumpes, et lavere arbeidstrykk i prosessen (atmosfærisk på høytrykk-side, ned mot vakuum etter turbin) og en større temperaturredifferanse over turbinen. Teknologien skal være signifikant bedre enn konkurrerende teknologi, som ORC.

C3 er i følge patentet [18] best egnet til varmekilder under 150 °C, og gir størst fordeler sammenlignet med en ORC i området 100 °C eller lavere. Fordelene som trekkes frem ved teknologien er:

- Kan benyttes til kjøling (kombinert med produksjon av el)
- Opererer med lave trykk og temperaturer, som senker kravene til komponentene. Dette gjør teknologien kostnadseffektiv.
- Høy virkningsgrad. >10 % ved 90 °C varmekilde og 25 °C kjøling. Over 50 %  $\eta_{\text{Carnot}}$ .
- Skalerbar (andre Rankine-baserte prosesser er også dette)

Flere patenter inneholder i dag tilsvarende prinsipper som innebærer å effektivisere kondensasjonen og trykkreduksjonen nedstrøms fra turbinen. Blant annet bruk av kjemikalier, som ammoniakk i Kalina-prosessen, muliggjør den typen effektiviseringer i en Rankine Cycle. Absorpsjon ved hjelp av et amin er den metoden som benyttes i C3.

Svenske Climeon AB er eierne av patentet, og har utviklet en modul som delvis baserer seg på C3-teknologien, men som også kan ansees å være en ORC. Primært skyldes deres høye virkningsgrad god varmeoverføring i varmevekslerene, et vakuumsystem og lave arbeidstrykk (2 bar på varm side

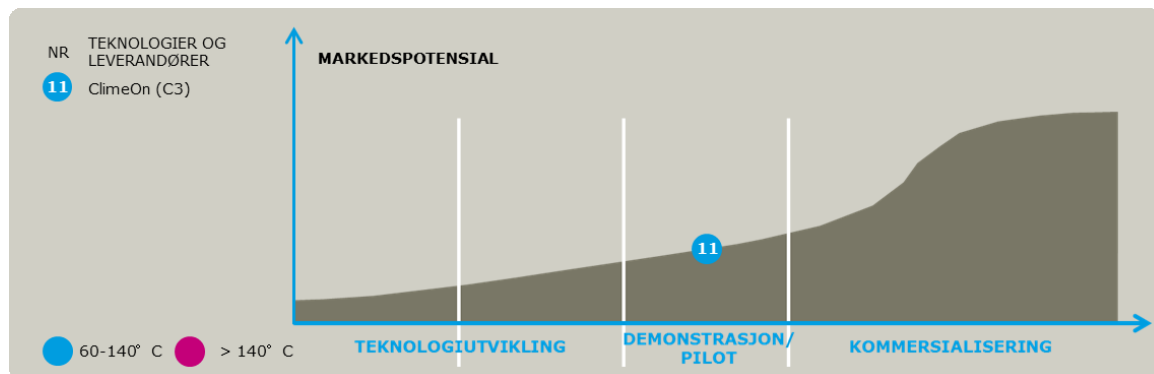
og 0,5 bar på kondensering/absorpsjonsside), fjerning av ikke-kondenserbare gasser og turbinen. C3-teknologien benyttes for å øke virkningsgraden ytterligere. Rambøll har ikke identifisert teknologileverandører av ren absorpsjons-Rankine Cycle.

#### 4.7.2 Teknologiens utviklingsløp og modenhet

Absorpsjons-Rankine Cycle er på forskningsstadiet. Climeon (rettigheter til C3) bygger på tilsvarende teknologi, og har fått innvilget et lån på 14,1 MSEK fra Energimyndigheten i Sverige til å videreutvikle teknologien sin. Climeon har et testanlegg på KTH (Kungliga Tekniska högskolan) og en fullskala (100 kW<sub>el</sub>) pilot/demonstrasjonsanlegg i Nörrköping under bygging. Det er forespeilet demonstrasjonsanlegg innenfor flere applikasjoner ila. 2015.

#### 4.7.3 Presentasjon av teknologileverandør m/case

11	TEK. LEVERANDØR	CLIMEON	ClimeOn, AB Ocean 100	
	<b>Nasjonalitet</b>	Sverige		
	<b>Antall leverte enheter</b>	0		
	<b>Termodynamisk konsept</b>	Absorpsjons-Rankine Cycle / ORC, Arb.med: Forskjellige varianter amin og CO <sub>2</sub> og andre medium		
	<b>Modul/skreddersøm</b>	Modul		
	<b>Kostnad</b>	20.250 NOK/kW <sub>el</sub> . Mål, LCOE: 23-57 øre/kWh		
	<b>Teknologiens modenhet</b>	Demonstrasjon		
	<b>Oppgitte applikasjoner</b>	Transportindustri, varme fra gassturbiner og marine motorer, industri, geotermisk		
	<b>Kjøling</b>	Kjøleteperatur 5-35 °C		
	<b>Beskrivelse av prosessen</b>	Climeon skal levere moduler på 100 kW <sub>el</sub> , produsert fra ca. 1 MWth på rundt 90 °C, med kjøling på rundt 20 °C. Den første modellen utviklet kalles Ocean 100, er en modulbasert løsning på 3x2,3 m, som kun krever tilkøpling av varmt vann fra spillvarmekilden og kjølevann. >10 % virkningsgrad, over 50 % $\eta_{Carnot}$ .		
	<b>REFERANSECASE</b>			
	<b>Lokasjon</b>	Marinfartøy		
	<b>Varmekilde</b>	Avgass og kjølevann fra motorer, ideelt 90 °C		
	<b>Kjøling</b>	Sjøvann 5-35 °C		
	<b>Elproduksjon (nominell)</b>	130 kW <sub>el</sub>		
	<b>Investeringskost</b>	Ca. 3-4 MNOK, avhengig av applikasjon (totalpris)		
	<b>D&amp;V-kostnader</b>	Uvisst		
	<b>Beskrivelse av referansecase</b>	Climeon posisjonerer seg også mot det marine markedet, og bruk av avgass på 140-170 °C fra motorene til å produsere elektrisitet på ca. 130 kW <sub>el</sub> . Det er her kun presentert et tenkt case.		



Figur 4.16: Illustrasjon av modenheten til teknologien

#### 4.7.4 Oppsummering absorpsjons-Rankine Cycle

Absorpsjons-Rankine Cycle har store fordeler knyttet til potensielt lave kostnader, men få rene absorpsjonsprosesser er på markedet. Climeon har teknologi basert på absorpsjons-prinsippene, og flere investorer og statlige støtteprogrammer har tro på teknologien. Climeon oppgir at teknologien vil bli kommersielt tilgjengelig fra 2015.

## 4.8 Stirling

Stirling-motoren er en meget gammel teknologi. Den ble patentert i 1816 av Robert Stirling, en skotsk prest og hans bror James, som var ingeniør. Prosessen skiller seg ut fra de fleste andre termiske prosesser ved at den er en lukket kretsprosess med ekstern varmetilførsel. Det betyr at den er velegnet til å absorbere varme fra for eksempel kontinuerlige forbrenningsprosesser eller solvarme. Temperaturforskjellen mellom dens kalde og varme side er avgjørende for motorens virkningsgrad, men den er ikke spesielt følsom for å ha en stor temperaturforskjell for å fungere.

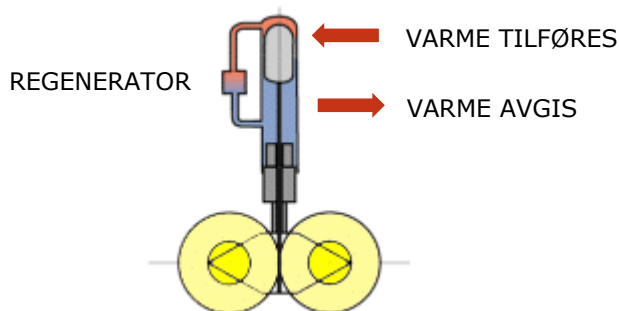
Den har en svakhet i form av at den termisk opererer mellom to (faste) temperaturer (på samme måte som en Carnot-prosess); det betyr at for eksempel ved utnyttelse av spillvarme, så kan den ikke kjøle en varm gasstrøm lengere ned enn til den høye prosessstemperaturen. En måte å omgå denne begrensningen på kunne være å ha to (eller flere) Stirling-maskiner designet til forskjellige temperaturer i kaskade. På den måten kunne den første ta de høyeste temperaturer, den neste det neste temperaturnivå, og så videre. Noen slike løsninger finnes i dag.

Når man tilfører varme til en Stirling motor, så vil maskinen begynne å jobbe; hvis man derimot tilfører mekanisk energi så vil den fungere som varmepumpe – dvs. den varme enden blir varmere og den kalde enden blir kaldere. Det kan utnyttes både til oppvarming som ved tradisjonell drift av en varmepumpe, men det kan også utnyttes til for eksempel produksjon av is.

### 4.8.1 Beskrivelse av teknologien

Det helt grunnleggende prinsippet som utnyttes i en Stirling-motor er at en varm gass opptar større volum enn en tilsvarende kald gass. Ved å oppvarme en innesperret gass, vil den etter hvert utvide seg og er dermed i stand til at utføre et arbeid; tilsvarende når gassen avkjøles igjen.

En mekanisme, som kan utføre denne prosessen er skissert i nedenstående Figur 4.17. I sylinderen er det innesperret en mengde av et arbeidsmedium (typisk Helium). Med et fortrenningsstempel (det lysegrå stempelet i toppen av sylinderen) flyttes (det meste av) arbeidsmediet fra det varme område (rødt) til det kalde område (blått). Så trekker det seg sammen (trykket faller) og et arbeidsstempel (det mørkegrå stempelet nederst i sylinderen) vil bevege seg opp og dermed redusere det totale volumet. Flytter fortrenningsstempelet det meste av gassen tilsvarende over i det varme området ved at det beveger seg ned, så utvider gassen seg med en trykkstigning som resultat. Dette får arbeidsstempelet til at øke det totale volumet ved også å bevege seg ned. Nederst i figuren illustreres mekanismen som sikrer at bevegelsen til de to stemplene er koordinert med hverandre.

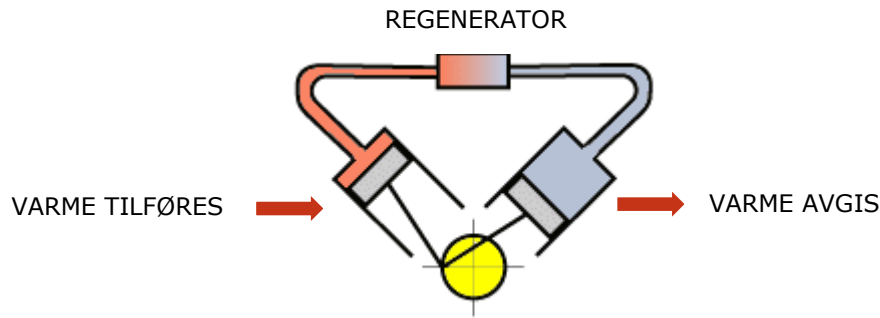


Figur 4.17: Skisse av mekanisme i Stirling-motor (beta type) [19]

I kanalen som knytter det varme området med det kalde området er det plassert en såkalt regenerator (et lite varmelager). Den øker virkningsgraden til motoren ved å lagre noe av varmen når arbeidsmediet skal avkjøles, til et senere trinn når arbeidsmediet skal gjenoppvarmes. Legg merket til at dette like godt kan virke begge veier.

Krumtapp- og stempelmekanismen kan utformes på forskjellige måter; i nedenstående Figur 4.18 er det vist en annen konfigurasjon av mekanismen.





**Figur 4.18: En alternativ utforming av krumtapp og stempel (alfa type) [19]**

Det er konstruert Stirling-maskiner med flere sylindere, hvor den kalde siden av fortreningsstempelet er knyttet til den varme siden av fortreningsstempelet i en annen sylinder. På den måten kan man bevare den noe enklere krumtapp-mekanismen fra Figur 4.17, og bevare den fordelene fra Figur 4.18 som går ut på at trykkforskjellen over stemplene er relativt beskjeden, og dermed stiller vesentlig mindre krav til tettinger.

Der er gjennom tidens løp konstruert en hel del forskjellige versjoner av Stirling-motoren, primært for å øke virkningsgraden. En del av disse forandringene er forankret i behovet for å kunne bruke maskinen til spesifikke anvendelsesområder. Et eksempel på dette er bruk av Stirling-motoren i ubåter, primært på grunn av at motorgangen omtrent er vibrasjonsfri. U-båten blir dermed vanskelig å spore basert på støy.

Typiske fordeler sammenlignet med andre teknologier er Stirling-motorens gode delestegenskaper og toleranse for høye temperaturer, og dens lange levetid.

#### **4.8.2 Teknologiens utviklingsløp og modenhet**

Stirling prosessen er en av de eldste teknologiene til å generere mekanisk arbeid, og er stadig anvendt tett opp til sin opprinnelige «versjon». Som det fremgår av det ovenstående, så er det i tidens løp blitt forbedret en del ved prosessen, men den har aldri fått nær den samme suksessen som for eksempel Rankine-prosessen. Årsaken til dette kan formentlig ligge i utviklingen av dampturbin (fremfor den tidligere anvendte stempelmaskinen), hvor effektiviteten i energiomsetningen til mekanisk arbeid (akseleffekt) kan bli ganger større hvor man har muligheten til å bygge større anlegg i et omfang som Stirling-maskinen slett ikke har muligheten til.

Det er sannsynlig at anlegg basert på Stirling-prosessen i fremtiden primært vil være til (mindre) lokale installasjoner (et hotell, en svømmehall) hvor det er et ønske om å bruke en spesiell energiresurs, som for eksempel biomasse, forsynt med egenprodusert el og varme. Flere bedrifter i dag utvikler Stirling-motorer til kraftvarmeproduksjon med bruk av fast biobrensel. Hvis det i løpet av året er et kjølebehov så kan en Stirling-motor også være løsningen. Til el-produksjon i større målestokk (MW-området) over hele året, basert på en relativt varm gasstrøm, så er det ikke det mest opplagte å velge en løsning basert på en Stirling motor. Man bør da forvente en dårligere virkningsgrad, i tillegg til et betydelig større vedlikeholdsarbeid på selve motoren, enn man ville oppnådd med en tilsvarende turbin.

## 4.8.3 Presentasjon av ulike teknologileverandører m/caser

12	TEK. LEVERANDØR	Single-Phase Power ENERGY RECYCLING	Single-Phase Power	220	300
	<b>Nasjonalitet</b>	Norge		180	250
	<b>Antall leverte enheter</b>	0 (mange varmepumper)		140	200
	<b>Termodynamisk konsept</b>	Stirling		100	150
	<b>Modul/skreddersøm</b>	Arb.medium: Helium		60	100
	<b>Modul/skreddersøm</b>	Modul (kan kombinere flere moduler)		20	0
	<b>Investeringskostnad</b>	4 MNOK (16.000-40.000 NOK/kW <sub>el</sub> ) <sup>10</sup>			
	<b>Teknologiens modenhet</b>	Demonstrasjon (lavtemp. kraftproduksjon)			
	<b>Oppgitte applikasjoner</b>	Markedsintro (varmepumpeanlegg)			
	<b>Oppgitte applikasjoner</b>	Spillvarme, kjølesystemer			
	<b>Kjøling</b>	Kjøletemperatur 0-20 °C			
	<b>Beskrivelse av prosessen</b>				

Stirlingprosessen til Single-Phase Power består gass (Helium) i lukkede kretser som hver består av to sylindervolumer, to varmevekslere og et varmelager. Single-Phase Power leverer hovedsakelig Stirling-maskiner som brukes som varmepumper. De samme maskinene genererer også elektrisk kraft. Levert flere varmepumpeanlegg, men ikke annet enn piloter på kraftgjenvinning ennå.

## REFERANSECASE

<b>Lokasjon</b>	Norge, Byrkjelo (kunde: Tine Meierier)
<b>Varmekilde</b>	120 °C hetvann
<b>Kjøling</b>	5-15 °C isvann
<b>Elproduksjon (midlere)</b>	Kun varme/kjøle-leveranse
<b>Investeringskost</b>	3,6 mill NOK
<b>D&amp;V-kostnader</b>	200 000 [kr /år modul] full serviceavtale med tilgjengelighetsgaranti på 90 %



## Beskrivelse av referansecase

Tine meiereier trenger høytemperatur varme, og det finnes få kommersielle aktører som leverer høytemperatur varme basert på varmepumpeteknologi. Dette klarer varmepumpene til Single-Phase Power. Den samme typen maskin kan benyttes til å produsere elektrisitet fra temperaturkilder over 100 °C.

13	TEK. LEVERANDØR	CLEANERGY	Cleanergy AB GasBox™ (SunBox™)	800	100
	<b>Nasjonalitet</b>	Sverige		700	90
	<b>Antall leverte enheter</b>	130		600	80
	<b>Termodynamisk konsept</b>	Stirling (Alfa type)		500	70
	<b>Modul/skreddersøm</b>	Arb.medium: Helium		400	60
	<b>Modul/skreddersøm</b>	Modul		300	50
	<b>Investeringskostnad</b>	36.000 NOK/kW <sub>el</sub>		200	40
	<b>Teknologiens modenhet</b>	Kommersiell		100	30
	<b>Oppgitte applikasjoner</b>	Biogass (deponier), solvarme		0	20
	<b>Oppgitte applikasjoner</b>	Vann på mellom 0-40 °C. Luft brukes også.			10
	<b>Kjøling</b>	Retur (vann) på 50-60 °C.			0
	<b>Beskrivelse av prosessen</b>				

## Beskrivelse av prosessen

Cleanergy AB leverer to typer Stirling-moduler; GasBox (2-9 kW<sub>el</sub>, mest rettet mot landfyllinger og produksjon av både varme og el (CHP)) og SunBox (2-11 kW<sub>el</sub>, rettet mot solvarme). Kan oppnå en el-virkningsgrad på 25 %. GasBox kan levere 8-26 kW<sub>th</sub>. Normalt leverer enheten 7,2 kW<sub>el</sub> og 20 kW<sub>th</sub>. Har installert 130 enheter på over 100 lokasjoner. Operer best med høy delta T ( gjerne omkring 500 °C), og er derfor ikke godt egnet til lavtemperatur spillvarme.

<sup>10</sup> 4 MNOK / ferdig anlegg gir 40 000 NOK/kWe ved 100 °C eller 16 000 NOK/kW<sub>el</sub> ved 200 °C spillvarmekilde.

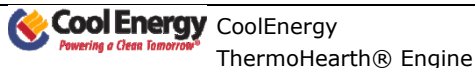
**REFERANSECASE (CLEANERGY)**

<b>Lokasjon</b>	Norge, Yggeset (kunde: Asker kommune)
<b>Varmekilde</b>	Fakling av lavverdig metangass
<b>Kjøling</b>	Vann på 35 °C inn og opp mot 70 °C ut
<b>Elproduksjon</b>	40 kW <sub>el</sub>
<b>Investeringskost</b>	5,8 MNOK totalt (gasstilførsel, kjøling, styring)
<b>D&amp;V-kostnader</b>	0,23 NOK/KWh

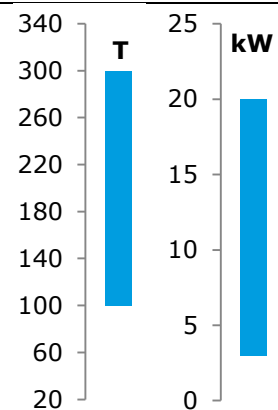
**Beskrivelse av referansecase**

Demonstrasjonsanlegget på Yggeset henter varme fra fakling av lavverdig metan fra fyllingsplassen. GasBox kan utnytte gass ned til 18 % metaninnhold. Første CHP-anlegget i Norge basert på Stirling og forbrenning av deponigass.

14

**TEK. LEVERANDØR**

<b>Nasjonalitet</b>	USA, Colorado
<b>Antall leverte enheter</b>	3 (til bl.a. Schneider Electric for testing)
<b>Termodynamisk konsept</b>	Stirling
<b>Modul/skreddersøm</b>	Modul
<b>Investeringskostnad</b>	Mål: 14.250 NOK/kW <sub>el</sub>
<b>Teknologiens modenhet</b>	Demonstrasjon
<b>Oppgitte applikasjoner</b>	Spillvarme fra industri og motorer, biomasse, solvarme
<b>Kjøling</b>	Vann på 0-20 °C

**Beskrivelse av prosessen**

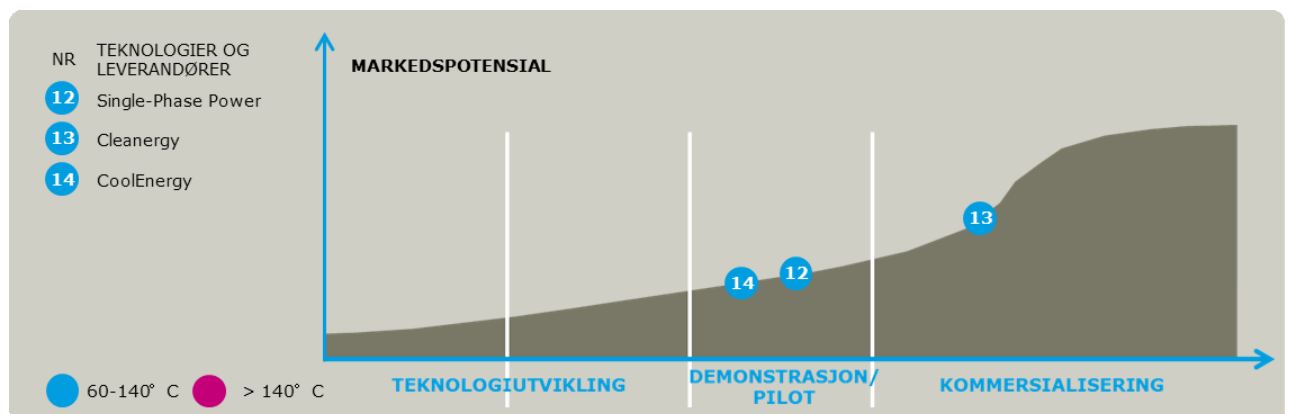
CoolEnergy har utviklet SolarHearth. Sin 4. prototype er på 3 kW, og de jobber med å bygge en fullskala enhet på 20 kW som skal være ferdig i Q3 2014. Planen er å på sikt utvikle større enheter (opptil 200 kW). Har oppnådd el-virkningsgrad på 22 % ved 270/10 °C. Teknologien er patentert.

**REFERANSECASE**

<b>Lokasjon</b>	Demonstrasjonsanlegg
<b>Varmekilde</b>	300 °C
<b>Kjøling</b>	20 °C
<b>Elproduksjon (midlere)</b>	Opp til 3,1 kW <sub>el</sub> (4. prototype)
<b>Investeringskost</b>	Ukjent
<b>D&amp;V-kostnader</b>	Ukjent

**Beskrivelse av referansecase**

Anlegg for testing. Oppnådde 22 % el-virkningsgrad.



Figur 4.19: Illustrasjon av teknologienes modenhet

**4.8.4 Oppsummering Stirling**

Stirling har foreløpig noe høye kostnader og noe begrenset bruksområde, men kan på sikt være en spennende teknologi i små-skala-markedet med lav til middels temperatur på varmekilden. Teknologien er å anse som moden.

## 4.9 Termoelektrisk generator (TEG)

### 4.9.1 Beskrivelse av teknologien

I en termoelektrisk generator kan generere elektrisitet ved hjelp av Seebeck-effekten, ved at det oppstår en spenningsforskjell når et materiale varmes og kjøles på to ulike steder. Dersom man eksempelvis varmer en metallstang i den ene enden, og kjøler i den andre, vil elektronene bevege seg i større grad i den varme enden av stangen. Bevegelsene opptar større plass enn elektroner i ro, og gjør at elektronene vil bevege seg fra den varme til den kalde enden. Med det har man to ender med forskjellig ladning, og et elektrisk potensial mellom de to endene som kan generere elektrisk strøm.

En termoelektrisk generator (TEG) utnytter Seebeck-effekten til å produsere strøm, ved at flere TEG-moduler er i kontakt med en varm side (en avgass eller en varm væske) og en kald side (kjølevann). Spenningsforskjellen mellom kald og varm side er gitt av temperaturforskjellen, som videre bestemmer hvor mye elektrisitet det er mulig å generere.

Termoelektriske materialer egnet for lavtemperatur spillvarme (herunder lavere enn 250 °C) er som regel basert på vismuttertellurid ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ). Ulempen med materialet er kostnaden. Dette gjelder også andre termoelektriske materialer, som ofte tilhører gruppen sjeldne jordarter. I tillegg er det ikke oppnådd lovende virkningsgrader, og kan ha begrensninger i oppskalering.

Et annet alternativ til termoelektriske generatorer er piezoelektriske generatorer. Teknologien er mer egnet for lavere temperaturer enn TEG (100 °C-150 °C). I prinsippet genererer piezoelektriske membraner elektrisitet ved en trykkpåkjenning, og vil med vekslende volumendring i et kammer ved faseendring (for eksempel væske til gass) i et lukket kammer generere spenning og elektrisitet. Teknologien er foreløpig umoden, med lav virkningsgrad og høy kostnad. Teknologiens mange utfordringer er blant annet syklusens frekvens, motstanden i materialet, tilgjengeligheten på materialet, samt utformingen og designet av varmeveksleren og kammeret [20]. Virkningsgraden kan være 8-10 % dersom man har flere selvstendige enheter i kaskade. Dette er foreløpig ikke demonstrert.

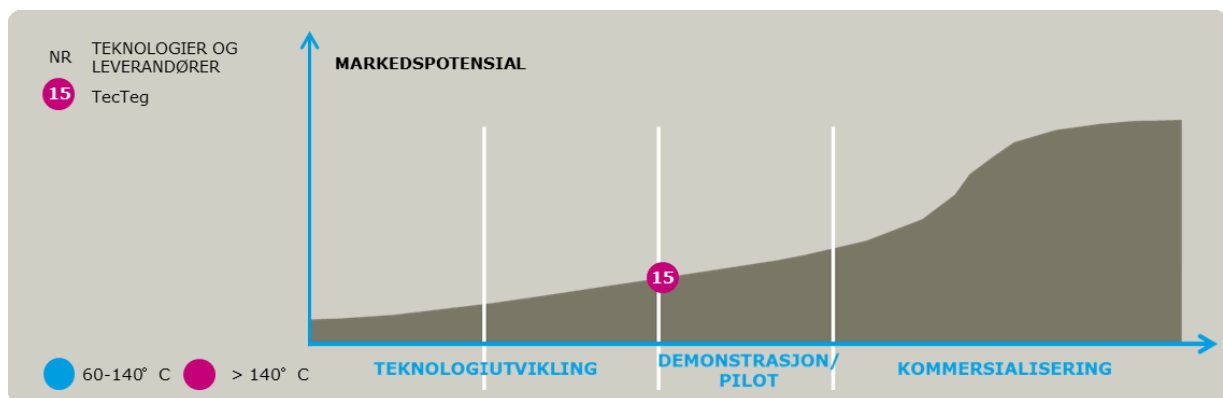
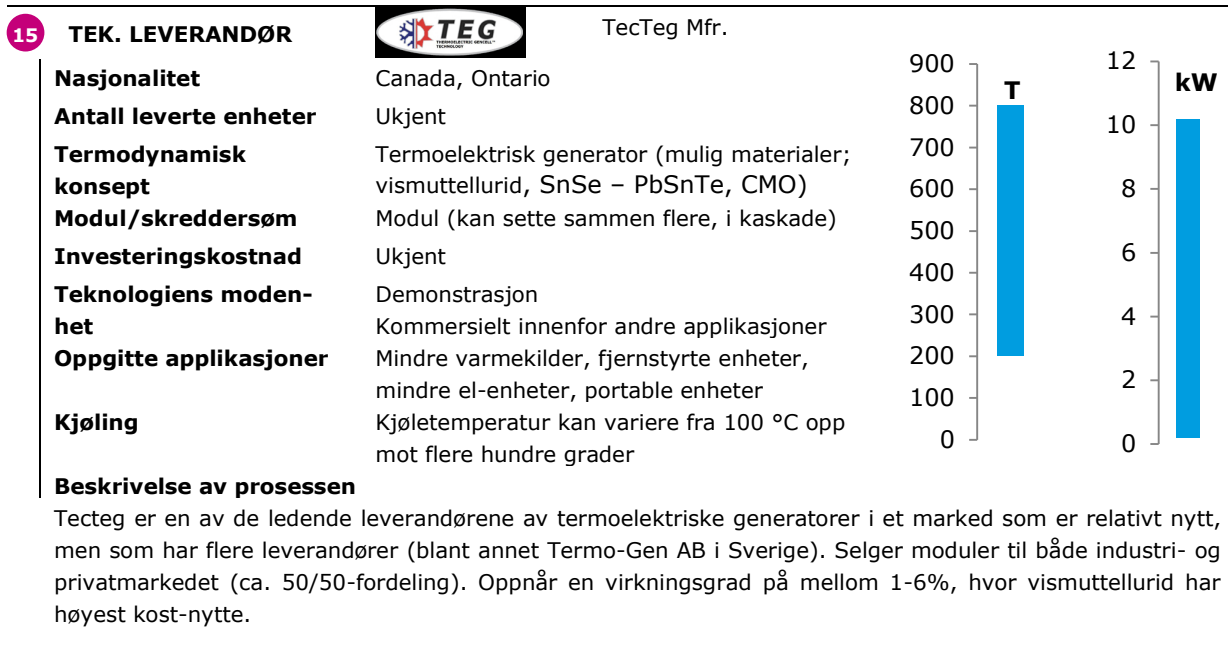
Det er likevel en klar fordel ved både TEG- og piezoelektriske enheter; de er begge svært lette og kompakte.

### 4.9.2 Teknologiens utviklingsløp og modenhet

Flere studier er publisert rundt bruken av termoelektriske generatorer. Lite tilsier at termoelektriske generatorer er egnet for industriell spillvarme, eller kraftgjenvinning noen større skala. Teknologien har lav virkningsgrad og oppskaleringsevne, og er lite egnet til dette formålet. Et bedre formål er lokale elektrisitetsproduserende enheter til styringssystemer eller andre lavspenningsformål, mindre pumper eller effektivisering av systemer. Montering av TEG på bilmotorer er noe det forskes på i dag.

Andre termoelektriske materialer til lav-temperatur spillvarme (under 230 grader), er ikke kjent. Kommersielt tilgjengelige TEG-moduler finnes på markedet i dag.

### 4.9.3 Presentasjon av teknologileverandør



Figur 4.20: Illustrasjon av teknologiens modenhet

### 4.9.4 Oppsummering TEG

TEG er en ny teknologi som er best egnet til små varmekilder, med relativt høye temperaturer. Hittil har studier vist for lav virkningsgrad (rundt 7 % ved 280 °C [21]) til at teknologien kan være konkurransedyktig mot andre teknologier innenfor kraftgjenvinning fra temperaturkilder med lave til moderate temperaturer. Det er likevel veldig sannsynlig at det vil være en stor utvikling av TEG innenfor andre applikasjonsområder.

## 4.10 Phase Change Material -teknologi

### 4.10.1 Beskrivelse av teknologien

PCM, eller Phase Change Material, er materialer som enten avgir eller tar opp store mengde varme ved faseendring. Det mest nærliggende eksempelet varmeputer som er illustrert til høyre. Ved at man knekker en metallplate skjer det en kjemisk reaksjon slik at væsker krystalliserer seg. Faseendringen fra væske til fast tilstand fører at varme avgis, samt en volumendring. Vann har også disse egenskapene, men i mye mindre grad (ca 6 % ekspansjon ved frysing til is), i tillegg til at en faseovergang krever ganske store energimengder. Enkelte stoffer har en relativt stor volumekspansjon ved endring av fase, og krever lite energi ved faseovergang.



Figur 4.21: Varmepute med PCM [28]

Exencotech fra Sverige har utviklet en teknologi (patentsøkt i 02/2014) som utnytter volumekspansjonen ved faseovergangen fra fast tilstand til væske. Denne volumekspansjon utnyttes til å generere et mekanisk arbeid. I prosessen benyttes en parafin-løsning som PCM, med lav volumetrisk varmekapasitet ved faseovergang, som kan justeres avhengig av applikasjonsområde. Teknologiens kjerne er dens energiceller, som har plater med parafin-løsningen. Platene opererer i motfase, og kjøles og varmes om hverandre. Oppvarmingen smelter parafinen under høyt trykk (300-400 bar), og gir en ekspansjon på ca. 20 %. Væsken blir så kjølt og endrer fase tilbake til fast tilstand og volumet er redusert tilbake til utgangspunktet. Volumendringen tas opp i et hydraulisk system som videre driver en generator som produserer strøm.

En energicelle kan generere 1 kW<sub>el</sub> under oppvarming. 20 energiceller kan dermed generere 10 kW under kontinuerlig drift (siden energicellene er i motfase).

Exencotech har tester som viser 7,5 % el-virkningsgrad ved 95 °C og 25 °C kjøling. Virkningsgraden er utelukkende avhengig av temperaturforskjellen mellom tilgjengelig kjøling og varmekilde, og øker med 2,5 % for hver økte temperaturforskjell på 24 °C, hvilket kan gi fordeler ned mot de lavere spillvarmetemperaturer. Teknologien er også enkelt skalerbar [22].

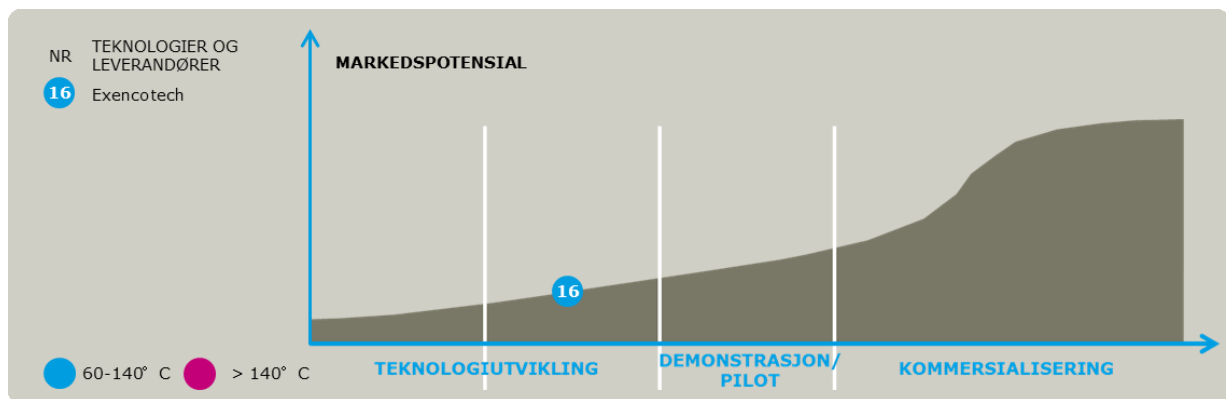
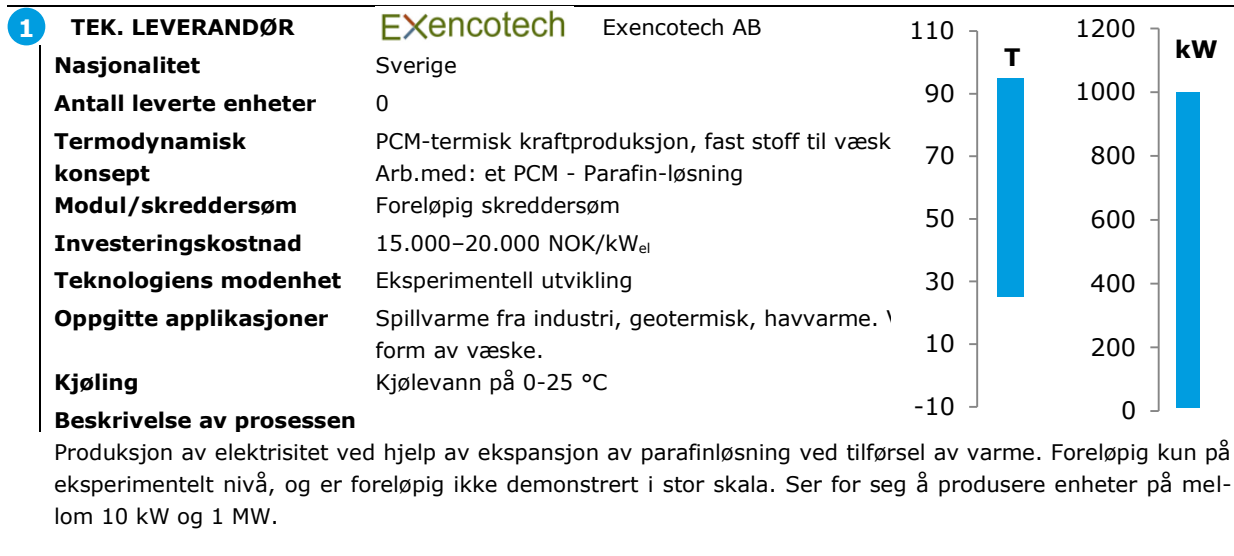
### 4.10.2 Teknologiens utviklingsløp og modenhet

Exencotech har utviklet en prototype på 4-5 kW, og har i dag kontakt med flere industrielle kunder innenfor papirindustrien. De har også flere industrielle partnere på teknologiutviklingsiden, som er produsenter av utstyr til industri. Finansielt støttes Exencotech av Energimyndighetene og Vinnova, og har private investorer på eiersiden.

Det gjenstår å demonstrere teknologien industrielt. De har som mål å bygge et 40-50 kW anlegg innen utgangen av 2015. Exencotech er på bakgrunn av dette på utkikk etter en industriell partner og et passende demonstrasjonsanlegg for teknologien.

NASA har tilsvarende patentert konsept fra 2008, og et fornyet patent i 2013 som baserer seg på utnyttelse av havvarme (OTEC) og solvarme til å produsere elektrisitet, tilført eksempelvis batteriet i en bil.

### 4.10.3 Presentasjon av teknologileverandører m/case



Figur 4.22: Illustrasjon av teknologiens modenhet

### 4.10.4 Oppsummering PCM

PCM til bruk i kraftproduksjon er foreløpig på FOU-stadium, basert på patenter eid av Exencotech i Sverige og NASA i USA. Teknologien kan ha potensiale på svært lave temperaturer, gjerne under 80 °C [23]. Det kan imidlertid bli en svært lang teknologit utviklingsperiode, da teknologien baserer seg på lite utprøvde løsninger. Man er avhengig av et demonstrasjonsanlegg for å avgjøre om teknologien potensiale til å bli kommersielt tilgjengelig.

#### **4.11 Andre tilstøtende teknologier – to-fase-ekspander**

Ekspanderen er svært avgjørende for ytelsen i de termodynamiske syklusene. Ekspanderen er hos mange av leverandørene, eksempelvis amerikanske Ener-G-Rotor, franske Cryostar og Aqylon, selve kjernen og konkurransefortrinnet i teknologien. Spesielt for lave temperaturer (>200 °C) i det nedre effektsjiktet er det få ekspandere i dag med tilfredsstillende virkningsgrad. Teknologit utviklingen innenfor denne kategorien er økende, da en effektiv ekspander potensielt kan gi store fordeler i markedet.

Den norske teknologileverandøren ToCircle fokuserer kun på salg av pumper, kompressorer og ekspandere basert på en patentert teknologi.

##### **4.11.1 Beskrivelse av teknologien**

ToCircle har utviklet en ekspander som kan oppnå bedre virkningsgrad i enkelte termodynamiske sykluser basert på lavtemperatur spillvarme. Dette fordi god utnyttelse av tilgjengelig varme ofte forutsetter utnyttelse av både overhetningsentalpi og kondenseringsentalpi i 2-faseområde, ved omdannelse fra varme til mekanisk energi. Dette gjelder i alle typer Rankinesykluser (organiske og ikke-organiske), og spesielt i Trilateral Flash Cycle. Fortrengningsmaskinen fungerer ved at det endrede volumet i den sirkulære rotasjonsmaskinen utnytter energien i mediet, og omdanner dette til mekanisk energi som driver generatoren.

Fortrengningsmaskinen ekspanderer både overhettet damp og damp/væske innenfor 2-faseområde, noe som er unikt innen turbinteknologi i dag. Den operer med damptrykk opp mot 20-25 bar og temperaturer opp til 250 °C. Det er utført tester med vanninnhold på 10 % ved utløpet av ekspanderen.

ORC-anlegg vil være aktuelle for teknologien til ToCircle. I den sammenheng vil det være snakk om utnyttelse av spillvarmekilder med temperaturer over 80-90 °C, gitt en lav kondenseringstemperatur (lav temperatur på kjølemedium).

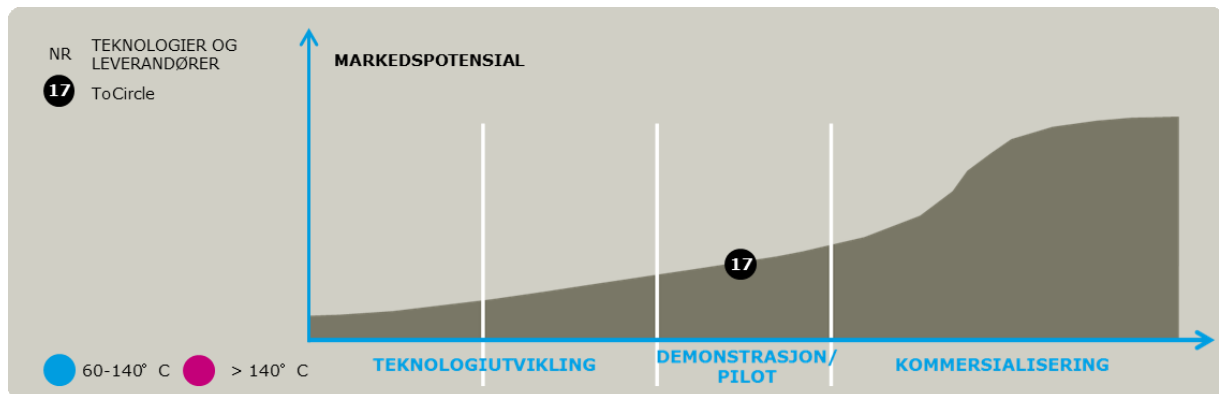
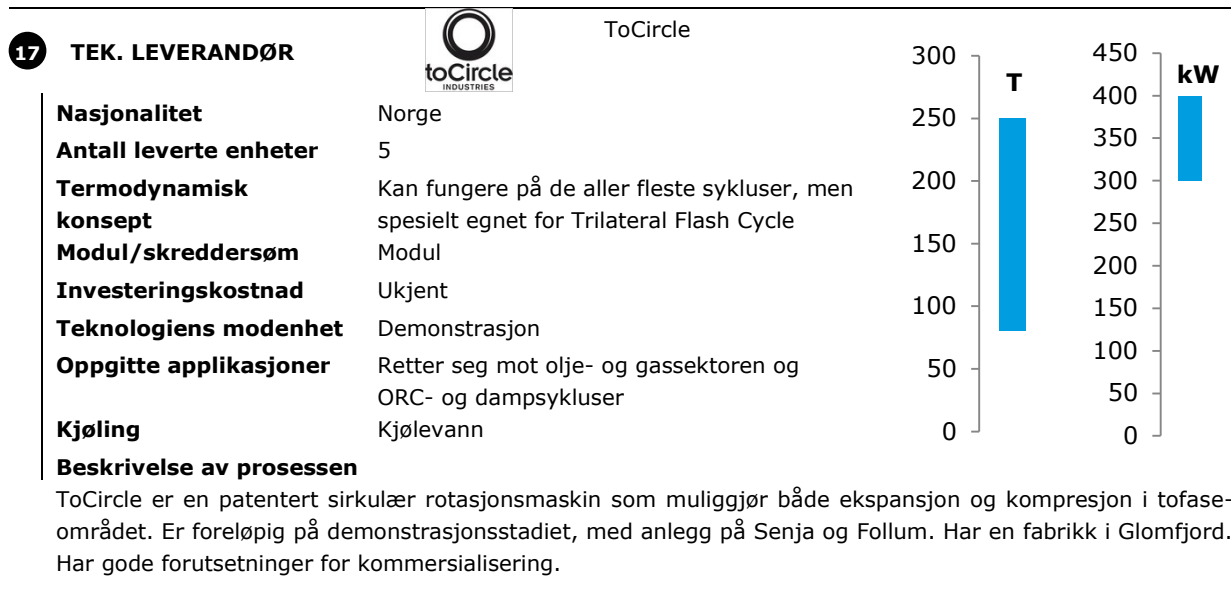
##### **4.11.2 Teknologiens utviklingsløp og modenhet**

ToCircle har eksistert siden 2003, og har utviklet teknologien siden. ToCircle leverer ekspandere til det norske markedet i dag, og har enkelte fullskala prosjekter under oppføring. Blant annet har de levert en ekspander til Senja avfallshåndtering og 4 stk. installeres på Follum for Hønefoss Fjernvarme. Tilstrekkelig data på ytelse vil mottas i 2015, når anlegget på Follum er i drift.

Ekspanderen kan benyttes i anlegg som benytter en rekke organiske forbindelser som propan/butan. Dette er turbinen testet mot. For CO<sub>2</sub> som medium er det ikke utført tester. ToCircle mener teknologien kan oppnå 30 % høyere virkningsgrad sammenlignet med tradisjonell teknologi [24].



### 4.11.3 Presentasjon av teknologileverandør



Figur 4.23: Illustrasjon av modenheten til teknologien

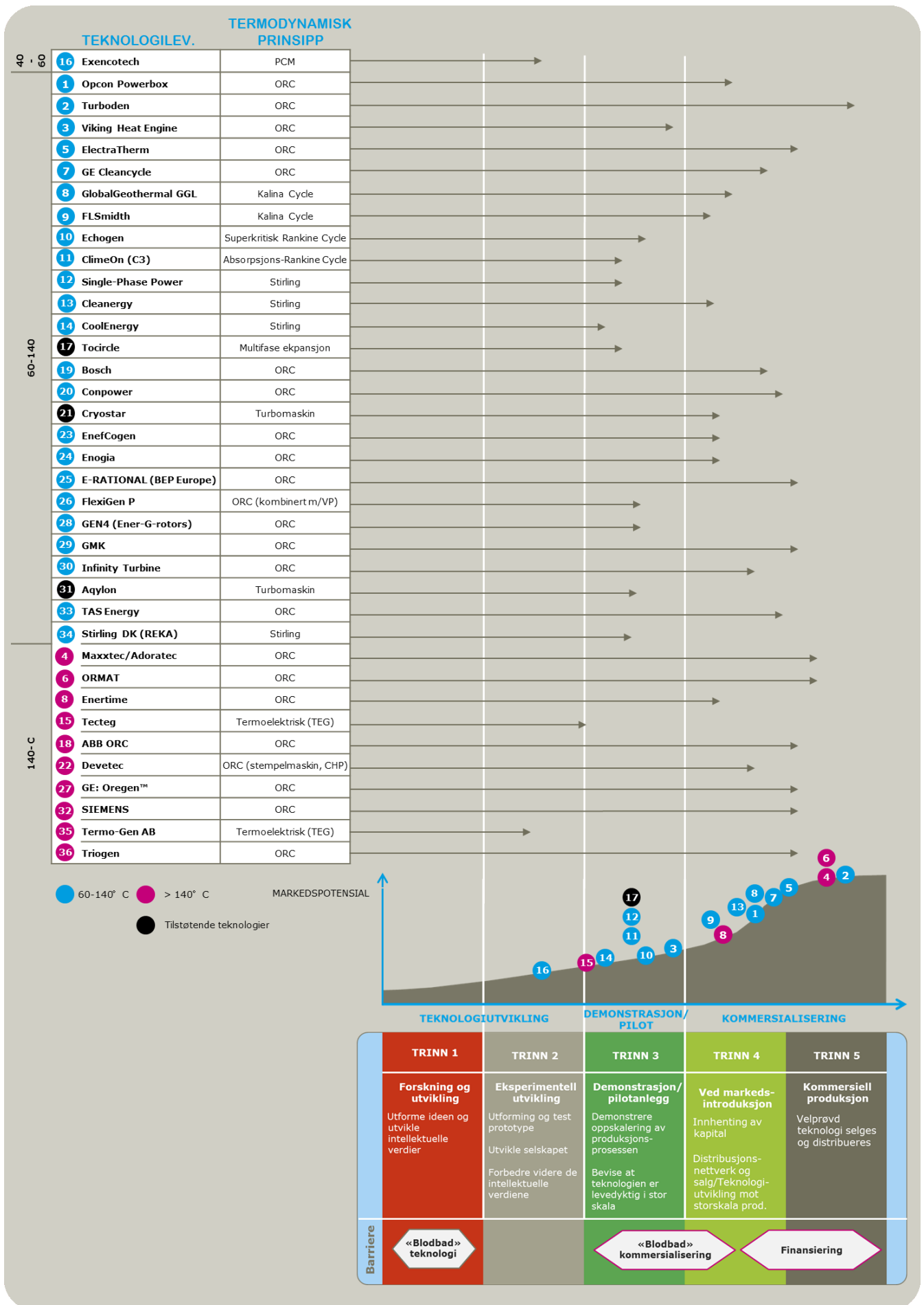
## 5. SAMMENLIGNING AV TEKNOLOGIER

	TEKNOLOGILEV.	TERMODYNAMISK PRINSIPP	MODENHET	OPPGITT TEMPERATUR	STØRRELSE KWeI	VIRKNINGS-GRAD*	INVEST.-KOSTNAD**
40 - 60	16 Exencotech	PCM	Eksperimentell utvikling	25 - 95	10 -1000	7,5 %	13.500 - 18.000
	1 Opcon Powerbox	ORC	Kommersielt	55 - 160	400-800	12-15 %	11.800 - 13.500
60-140	2 Turboden	ORC	Kommersielt	90-150 & 300-350	280 kW / 0,2-15 MW	17-26 %	8.100 - 16.200
	3 Viking Heat Engine	ORC	Demonstrasjon	80 - 215	2-10	5-17 %	13.500
	5 ElectraTherm	ORC	Kommersielt	77 - 116	35 / 65 / 110		15.000 - 26.000
	7 GE Cleancycle	ORC	Kommersielt	82 - 177	125		11.400 - 20.000
	8 GlobalGeothermal GGL	Kalina Cycle	Kommersielt	80 - 130	0,05 - 1MW / 4-12 MW		8.550 - 11.400
	9 FLSmidth	Kalina Cycle	Markedsintro	80 - 130	8,6 MW		
	10 Echogen	Superkritisk Rankine Cycle	Demonstrasjon	204 - 542	0,25 - 8 MW		
	11 ClimeOn (C3)	Absorpsjons-Rankine Cycle	Demonstrasjon	70 - 170	80 - 130	15 %	20.250
	12 Single-Phase Power	Stirling	Demonstrasjon	100 - 200	100 - 250		16.000 - 40.000
	13 Cleanergy	Stirling	Kommersielt	100 - 300	2 - 9	25 %	36.000
	14 CoolEnergy	Stirling	Markedsintro	100 - 300	3 - 20	22 %	Mål: 14.250
	17 Tocircle	Multifase ekspansjon	Demonstrasjon	140 - 250	1,50 MW testanlegg 400 kW Senja		
	19 Bosch	ORC	Kommersielt	90 - 150	75 - 350		
	20 Conpower	ORC	Kommersielt	Fra 85	13 / 23 / 37 / 75		
140-C	21 Cryostar	Turbomaskin (for ORC)	Markedsintro	100 - 400	0,5 - 15 MW		
	23 EnefCogen	ORC	Markedsintro	120 - 200	10 / 20 / 30		
	24 Enogia	ORC	Markedsintro	80 - 200	5 - 100		
	25 E-RATIONAL (BEP Europe)	ORC	Kommersielt	80 - 150	50 - 450		
	26 FlexiGen P	ORC (kombinert m/VP)	Demonstrasjon	50 - 220	60-250		11.700 - 16.200
	28 GEN4 (Ener-G-rotors)	ORC	Demonstrasjon	65 - 150	40 - 60		
	29 GMK	ORC	Kommersielt	120 - 350	35-60 / 0.5 - 5.0 MW	9 - 21 %	
	30 Infinity Turbine	ORC	Markedsintro	80 - 140	1) 10 til 2) 400	5 - 12 %	1) 28.500, 2)11.400
	31 Aqylon	Turbomaskin (for ORC)	Demonstrasjon	100 - 300	0,05 - 5 MW		
	33 TAS Energy	ORC	Kommersielt	> 88	1 - 15 MW		
34 Stirling DK (REKA)	Stirling	Demonstrasjon	700	10 - 100			
4 Maxxtec/Adoratec	ORC (CHP)	Kommersielt	300 - 350	300 - 2500	15 - 18 %		
6 ORMAT	ORC	Kommersielt	100 - 300	0,25 - 25 MW		10.260 - 11.400	
8 Enertime	ORC	Markedsintro	150 - 200	1 MW		13.100	
15 Tecteg	Termoelektrisk (TEG)	Demonstrasjon	200 - 800	0,1 - 10	1 - 6 %		
18 ABB ORC	ORC	Kommersiell	> 150	> 0,5 MW			
22 Devetec	ORC (stempelmaskin, CHP)	Markedsintro	280 - 500	100 - 400	> 12 %	~34.000	
27 GE: Orogen™	ORC	Kommersielt	450 - 550 (avgass)	5 - 16MW			
32 SIEMENS	ORC	Kommersielt	> 300				
35 Termo-Gen AB	Termoelektrisk (TEG)	Eksperimentell utvikling	200 - 800	50 - 300 W			
36 Triogen	ORC	Kommersielt	> 350	100 - 1000	13 - 18 %		

● 60-140° C    ● > 140° C  
● Tilstøtende teknologier

\* Virkningsgradene er oppgitt ved optimale driftsforhold, gitt som prosentandel kraftproduksjon (brutto) av tilført termisk energi. Vil i stor grad være avhengig av temperaturnivå på varm og kald side, termisk energi fra prosessen etc.  
 \*\* Kostnadene er ment til å gi en indikasjon på forventet prisområde (øvre og nedre pris) for den kraftproduserende enheten alene.

Figur 5.1: Innsamlet informasjon om teknologileverandørene. Manglende utfylte felter skyldes manglende tilgang på informasjon. Kommentarer til figur er gitt i avsnitt 5.1. Nummereringen 1-17 er ut ifra rekkefølgen på teknologileverandørene presentert med caser i rapporten. Disse utvalgte teknologileverandørene er plassert i grafen som illustrasjon. Numrene 18-36 er vilkårlig.



Figur 5.2: Sammenligning av modenheten ved teknologileverandørene gjennomgått i rapporten, angitt som piler. Punktens plassering i grafens vertikale retning har ingen betydning - kun plassering horisontalt.

## 5.1 Tolkning av resultater

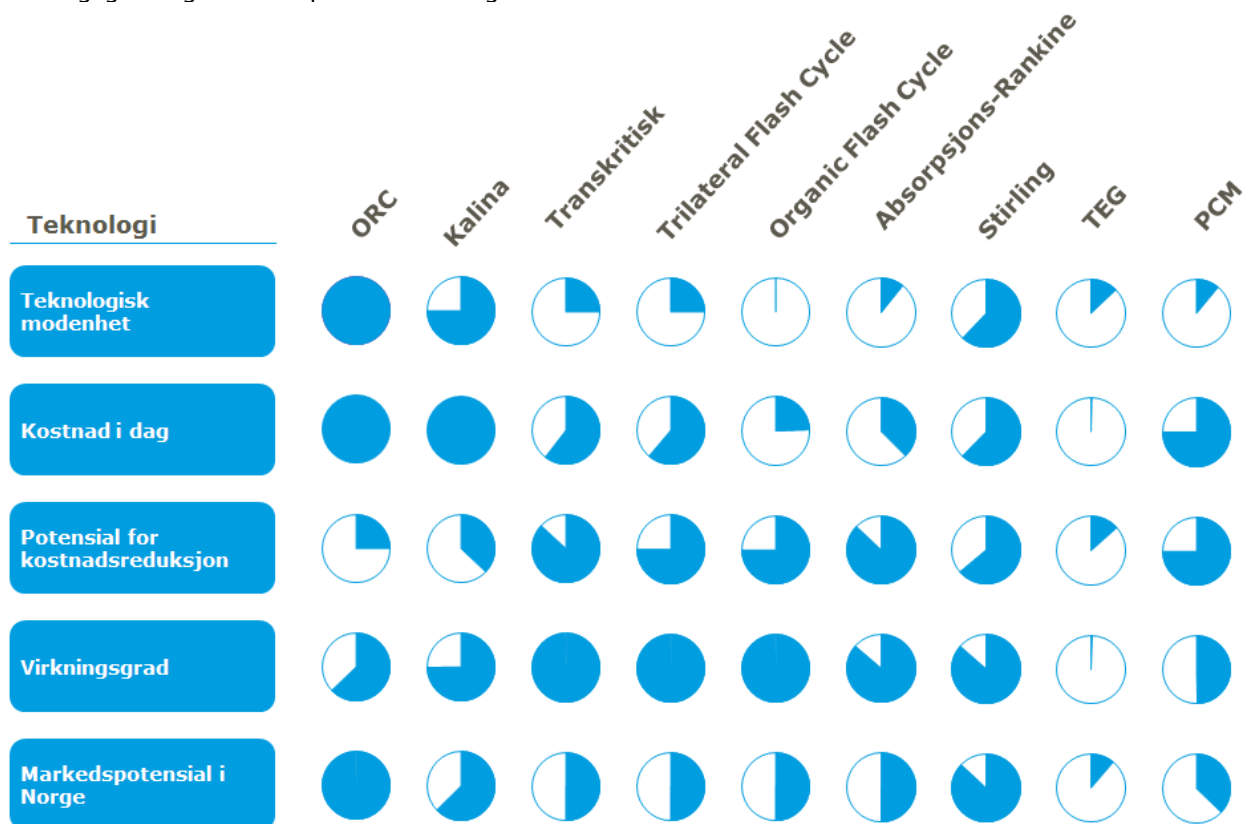
For å sammenligne teknologiene på en rettferdig måte har man gjennom arbeidet med sammenstillingen forsøkt å avgrense dataene til å gjelde den kraftproduserende prosessen alene. For eksempel, har man så langt som mulig utelukket prosjektspesifikke kostnader og fokusert på teknologidata fra leverandører hvor prosessen er optimalisert for kraftproduksjon.

Andre momenter det er viktig å ha som bakteppe ved vurdering av teknologiene er:

- De presenterte leverandørene representerer ikke alle, men blant de mest betydningsfulle innenfor sin teknologi.
- Enkelte leverandører leverer flere tjenester/produkter enn det som er oppgitt i denne rapporten
- Vurderinger rundt modenhet baserer seg på antall solgte enheter (i kommersiell fase), antall demonstrasjoner/piloter (demonstrasjon/pilot-fase). Bak ligger også en kvalitativ vurdering av nyhetsaker og annet materiell omkring teknologien som helhet, tilgang på kapital og ressurser, team og et helhetsinntrykk av teknologileverandøren.
- Størrelsen på anlegget er kun gitt i kW<sub>el</sub> eller MW<sub>el</sub>. Leverandørene er ofte ikke tydelig på om det er netto eller brutto elektrisk effekt, men det er grunn til å tro at det er brutto som er oppgitt i de aller fleste tilfeller.
- Virkningsgradene oppgitt er ved optimale driftsforhold, gitt som prosentandel kraftproduksjon (brutto) av tilført termisk energi.
- Kostnadene er ment til å gi en indikasjon på forventet prisområde (øvre og nedre pris) for den kraftproduserende enheten alene. Prisene er svært varierende avhengig av type varmekilde, størrelse på anlegg, temperaturer etc. Det oppfordres til å ta direkte kontakt med leverandørene for å få bedre kostnadsestimater.
- Alle kostnader gitt i utenlandsk valuta er konvertert til norsk valuta med satsene 5,7 NOK/USD, 8,1 NOK/euro og 0,90 NOK/SEK.

## 5.2 Oppsummering

Figur 5.3 sammenligner teknologiene innenfor modenhet, kostnad og potensial for kostnadsreduksjon, virkningsgrad og markedspotensial i Norge.



Figur 5.3: Sammenligning av vurderte teknologier innenfor modenhet, kostnad og potensial for kostnadsreduksjon, virkningsgrad og markedspotensial i Norge.

Videre følger en begrunnelse for vurderingene og score gitt i Figur 5.3.



MODEN



UMODEN

### 5.2.1 Teknologisk modenhet

ORC og Kalina er en videreutvikling av den konvensjonelle og høyst kommersielle damp-Rankinesyklusen, og er blant annet derfor den mest modne av kraftgjennvinnende teknologier fra lavtemperatur varmekilder i dag. Bestanddelene i begge teknologiene er velutprøvde. Kalina har likevel færre aktører som driver teknologiutviklingen, mye grunnet ugunstig rettighetsstrategi fra teknologi-eieren, og har sett i forhold til ORC få anlegg. ORC derimot har hatt en eksplosiv økning i antall installerte anlegg de siste 10 årene, og har svært mange aktører som driver teknologiutviklingen videre.

Generelt er mindre (<300 kW) lavtemperatur anlegg å anse som en ganske umoden teknologi. ORC og Stirling er de mest modne teknologiene innenfor dette applikasjonsområdet.

Transkritisk Rankine og Trilateral Flash Cycle er i utgangspunktet en avart av Rankine med en annen turbin-løsning (to-fase-ekspander). Det er mye forskning og utvikling på dette feltet – hvorav noen få teknologileverandører har demonstrasjonsanlegg. Teknologien er derfor vurdert til å ha en viss modenhet. Organic Flash Cycle bygger på tilsvarende prinsipp som TFC, men har foreløpig ikke blitt tatt videre fra FoU-stadiet.

Absorpsjons-Rankine er å anse som en relativt ny teknologi, med kun én teknologileverandør som benytter deler av prosessen. Absorpsjon til bruk i termodynamiske prosesser er dog ikke nytt, med både absorpsjonskjøling og –varmepumpe som høyst aktuelle teknologier i dag (også rettet mot spillvarme i industri). Modenheten er likevel vurdert som lav.

Termoelektriske generatorer (TEG) er kommersielt tilgjengelig i dag for applikasjoner med relativt høye temperaturer og lav effekt. Piezoelektriske generatorer kan være en bedre egnet teknologi rettet mot lavere temperaturer, men dette er foreløpig ikke demonstrert. TEG-aktører er både rettet mot det industrielle og private markedet, som kan bidra til synergier og mange leverandører. Likevel er TEG å anse som umoden teknologi.

Bruk av Phase Change Material til kraftproduksjon ikke veldig utbredt eller kjent konsept, og er ansett som en umoden teknologi. Teknologien kan være interessant for svært lave temperaturer.

### 5.2.2 Kostnad i dag (2014)



LAV KOSTNAD



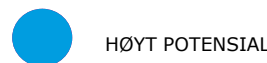
HØY KOSTNAD

Kalina fremstår som den billigste teknologien ser man på den spesifikke investeringskostnaden (rundt 8.550-11.400 NOK/kW<sub>el</sub>). Dette skyldes at Kalina kun bygges i stor skala, med de stordriftsfordelene som er assosiert med det. ORC er noe dyrere sammenlignet med Kalina, men er å betrakte som teknologien med lavest kostnad for små til middels store anlegg. Kostnaden er rundt 8-9.000 NOK/kW<sub>el</sub> for svært store anlegg, rundt 16.000-18.000 NOK/kW<sub>el</sub> ned mot 0,5 MW. Under 0,5 MW er det svært varierende. Komplexiteten og størrelsen på anlegget er, sammenlignet med valget mellom Kalina og ORC som teknologi, det mest avgjørende for installasjonskostnaden. En ORC-leverandør som leverer middels store anlegg antar rundt 74 øre/kWh (LCOE *Levelized Cost of Energy*). Andre er betraktelig billigere og ligger på 17-57 øre/kWh. En internasjonal studie viser 31-71 øre/kWh [25].

Grunnet manglende data for teknologiene transkritisk, TFC og OFC er det vanskelig å gi et eksakt bilde av kostnadene. Transkritisk og TFC er som nevnt tidligere basert på kommersielt tilgjengelige og serieproduserte komponenter, bortsett fra ekspanderen. Det er derfor grunn til å tro at kostnaden ligger omtrent midt på skalaen. OFC vil være noe dyrere enn dette. Stirling har foreløpig en relativt høy spesifikk kostnad sammenlignet med ORC og Kalina, men vil være konkurransedyktig på pris ved mindre anlegg.

TEG, som består av sjeldne jordarter, er svært dyre materialer. Dette gjør teknologien til den klart dyreste.

### 5.2.3 Potensial for kostnadsreduksjon – kort sikt



HØYT POTENSIAL



LAVT POTENSIAL

Flere av de kostbare teknologiene i dag har av naturlige årsaker gode forutsetninger for kostnadsreduksjon. ORC og Kalina, som har velutprøvde komponenter med mange tilbydere og stor konkurranse har åpenbart mindre mulighet for kostnadsreduksjon.

To-fase-ekspandere er på demonstrasjonsstadiet i dag og, og vil på sikt redusere kostnaden forbundet med TFC og OFC. På lengere sikt vil transkritisk Rankine Cycle bli mer kostnadseffektiv grunnet materialer med gode styrkeegenskaper og forskning på spesielt bruk av CO<sub>2</sub> som arbeidsmedium.

Absorpsjons-Rankine Cycle har gode forutsetninger for kostnadsreduksjon grunnet lave trykk og temperaturer i prosessen (og dermed lav kostnad for komponentene).

#### 5.2.4 Virkningsgrad

Virkningsgraden påvirkes av svært mange faktorer, og kan også oppgis på mange måter. Det er derfor vanskelig, om ikke umulig, å sammenligne på en god måte. Typiske tap i prosessene oppstår i varmeveksling, overhetingen og i turbinen (bortsett fra i TEG og PCM). Prosesser som reduserer disse tapene i størst grad får i teorien høyest virkningsgrad. Ut ifra et teoretisk ståsted bør teknologier som transkritisk Rankine (både over og under kritisk punkt) og TFC/OFC oppnå en høyere virkningsgrad enn Kalina og ORC.



#### 5.2.5 Markedspotensial i Norge på kort sikt

ORC har best potensiale for å ta markedsandeler innenfor lav-temperatur spillvarme (60-140 °C tilsvarende ~6 TWh i Norge). Stirling vil være aktuelle for mindre anlegg innenfor samme temperaturområdet og høyere. Varmekilder basert på biogass og biomasse vil også være et viktig applikasjonsområde for denne teknologien. Kalina-teknologien har også et stort potensiale, men utviklingen begrenses av lisensbetingelser. Det er derfor lite sannsynlig at Kalina-prosesser er aktuelle for Norge på kort sikt.



Andre teknologier er vanskelig å forutse, men vil ha betraktelig lavere markedspotensiale på kort sikt.

## 6. TEKNOLOGIUTVIKLING

### 6.1 Teknologier aktuelle for Norge i dag

Spillvarmepotensialet i Norge er stort og flere teknologier for å utnytte den er moden. For å realisere noe av potensialet i Norge vil man i de aller fleste tilfeller være avhengig av en tredjepart (for eksempel Enova) som kan bidra finansielt. Denne utfordringen eksisterer også utenfor Norge, hvor mange av anleggene er subsidiert enten i form av feed-in-tariffer (BOT-kontrakter, i Tyskland blant annet) eller investeringsstøtte. Mange av prosjektene oppnår da en tilbakebetalingstid på 2-3 år.

Gjennom arbeidet med denne studien har Rambøll også erfart at flere teknologileverandører er skeptiske til det norske markedet. Hovedårsaken til dette er den lave energiprisen. Mange er ikke kjent med mulig investeringsstøtte og el-sertifikater, og er heller tiltrukket av deres hjemmemarked med høyere energipris, i blant annet Tyskland, Frankrike og USA.

En del av det praktisk og nyttbare potensialet i Norge er realisert [1]; deriblant fjernvarme i de områder hvor man får avsetning på varmen, med betraktelig høyere lønnsomhet sammenlignet med mindre effektive kraftproduserende prosesser. Energieffektivisering i form prosessintegrasjon vil også i mange tilfeller være mest lønnsomt. Kraftproduserende teknologier vil først og fremst være aktuelt dersom fjernvarme eller prosessintegrasjon ikke er et alternativ. Et annet applikasjonsområde som kan være aktuelt er absorpsjonskjøling – en kostnadseffektiv metode for produksjon av kjøling fra varmekilder (på temperaturer over 150 °C).

Aktuelle kraftproduserende teknologier for Norge vil avhenge av;

- Teknologiens kostnad
- Teknologimodenhet
- Leverandørens gjennomføringsevne
- Teknologiens tilpasningsevne til aktuelle norske varmekilder og industriprosesser, herunder;
  - o Varmekildens temperatur, energimengde og effekt
  - o Behovet for elektrisitet på anlegg
  - o Fysisk plass tilgjengelig på anlegg
  - o Behovet for tilbakeført varme i prosessen

ORC er den mest modne og kommersielle teknologien, spesielt for lave til middels temperaturer, og er i dette temperaturområdet den mest aktuelle teknologien i norsk industri. Kostnaden er relativt lav, og er ventet å synke ytterligere som følge av hard konkurranse i markedet. Det som tidligere har begrenset teknologien; den fysiske store størrelsen og det høye termiske effektbehov, er i dag ikke et like stort problem. Mange store teknologileverandører tilsier gode evner til å gjennomføre ORC-prosjekter.

Stirling er å anse som en meget aktuell teknologi i Norge i dag for varmekilder med lav termiske effekt (under 1 MW) med middels temperaturer.

### 6.2 Teknologeutvikling de seneste 5 årene

Den økte miljøbevissthet og stigende energipriser i Europa og USA har gitt grunnlag for økt konkurranse blant leverandører av fornybare energiteknologier, og gjort det attraktivt å utnytte en eventuell spillvarme til el-produksjon.

Subsidier og andre politiske virkemidler som følge av klimamålsetninger, herunder økt fornybarandel og energieffektivitet har dratt teknologeutviklingen. Fokuset på utfasing av kull til fordel for bioenergi, i Tyskland og andre land med kullkraftverk, har satt fokuset på andre alternative CHP-teknologier, spesielt i mindre skala hvor ORC og Stirling er teknologier som kan øke den totale energiutnyttelsen.

Det økte fokuset på utnyttelse av fornybare energikilder som havvarme, bioenergi, solvarme og geotermisk energi har i stor grad drevet teknologeutviklingen av kraftproduserende teknologier. Flere av teknologileverandørene gjennomgått i rapporten er rettet mot disse applikasjonsområdene. Disse primærenergikildene er enorme. Teknologier som utnytter dette kostnadseffektivt til enten kraft eller varme har store markedspotensialer.

Økt interesse for varmepumper og kjøleprosesser, som bygger på mange av de samme termodynamiske prosessene i denne rapporten, har også gitt sitt bidrag til teknologeutviklingen de seneste årene. Deriblant grunnforskning på varmemedier har vært sentral i de fleste teknologier basert på varmepumpende prosesser. ORC, transkritisk Rankine (bruk av CO<sub>2</sub>) og Kalina (NH<sub>3</sub>) drar nytte av denne type grunnforskning.

Teknologiutviklingen vil på sikt også drives av U-land med behovet for mindre varme- og kraftproduserende enheter.

Spillvarmestudien i 2009 identifiserte fire områder hvor det var behov for teknologiutvikling. I dag er teknologistatusen og utfordringene noe forandret;

Behov identifisert i 2009	Dagens status (2014)
1) Kraftproduksjon fra spillvarmekilder ned mot 60-70 °C	ORC er kommersiell og moden teknologi i dag ned mot 70-80 °C.
2) Lavtrykk dampturbiner i Norge	Ukjent status i dag.
3) Varmepumper for høy temperatur	Norske Single-Phase Power er blant aktørene som leverer høy-temperatur-varmepumper. De har levert flere enheter. Transkritisk og superkritiske varmepumper basert på CO <sub>2</sub> er under eksperimentell utvikling.
4) Kraftproduksjon fra varmekilder med temperatur lavere enn 60-70 °C.	Fremdeles er det få kommersielle aktører som leverer tilfredsstillende virkningsgrader i dette området.

### 6.3 Aktuelle teknologier i fremtiden

Kraftgjenvinning av spillvarme i MW-klassen (stor-skala) vil fremover realiseres med bruk av turbiner. Det er ikke en tilfeldig at både Siemens og GE er involvert i ORC-prosjekter. Man vil fremover utvide antallet forskjellige arbeidsmedier slik at valget av medium bedre kan *tunes* mot en gitt applikasjon. Det er sannsynlig at det skjer en videreutvikling av fler-komponent-medier (å la Kalina eller lignende) til spesielle anvendelser.

Motorer (herunder spesielt Stirling) har deres fordel ovenfor mindre anleggsstørrelser av én grunn: turbiner er relativt dårlig i mindre skala (tapene i turbinen reduseres ikke nødvendigvis proporsjonalt med størrelsen). Utviklingen innenfor fortrenningsmaskiner, som skrue og scroll, er ventet å øke fremover. Dette vil gi klare fordeler for konsepter basert på to-fase-ekspansjon.



## REFERANSER

- [1] G. Sollesnes and H. E. Helgerud, "Potensialstudie for utnyttelse av spillvarme fra norsk industri," 2009.
- [2] A. Rettig, M. Lagler, T. Lamare, S. Li, V. Mahadea, S. Mccallion, and J. Chernushevich, "Application of Organic Rankine Cycles (ORC)," in *World Engineers' Convention*, 2011, pp. 1–10.
- [3] S. Quoilin, M. Van Den Broek, S. Declaye, P. Dewallef, and V. Lemort, "Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 168–186, Jun. 2013.
- [4] "Samtaler med Peter Lundström 22/9 2014 per telefon."
- [5] P. Arvay, M. R. Muller, and V. Ramdeen, "Economic Implementation of the Organic Rankine Cycle in Industry," pp. 12–22, 2011.
- [6] "Trends in power generation from waste heat in cement plants," 2014. [Online]. Available: [http://www.zkg.de/en/artikel/zkg\\_2011-05\\_Trends\\_in\\_power\\_generation\\_from\\_waste\\_heat\\_in\\_cement\\_plants\\_1185560.html](http://www.zkg.de/en/artikel/zkg_2011-05_Trends_in_power_generation_from_waste_heat_in_cement_plants_1185560.html). [Accessed: 01-Oct-2014].
- [7] University of Liege, "Enertime webpage," 2012. [Online]. Available: <http://www.cycle-organique-rankine.com/market-markers.php>. [Accessed: 15-Sep-2014].
- [8] P. Feulner, D. I. Vlaskos, and D. C. Michos, "SNAME Presentation; Waste Heat Recovery in Marine Propulsion Systems," no. February, pp. 1–91, 2014.
- [9] Wasabi Energy, "Presentation: Corporate Overview & Update," no. September, 2011.
- [10] K. Jesionek and J. Duda, "WHR and CHP Processes in Cement Industry , New Techniques Based on Kalina ' s Cycle," pp. 71–78, 2012.
- [11] H. Chen, D. Y. Goswami, and E. K. Stefanakos, "A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 9, pp. 3059–3067, Dec. 2010.
- [12] T. Ho, S. S. Mao, and R. Greif, "Comparison of the Organic Flash Cycle (OFC) to other advanced vapor cycles for intermediate and high temperature waste heat reclamation and solar thermal energy," *Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 213–223, Jun. 2012.
- [13] "Samtale med Eli Ringdalen, prosjektleder i ROMA-prosjekt 22/9."
- [14] "Echogen Prototype." [Online]. Available: <http://powerelectronics.com/electromechanical/better-way-recycle-waste-heat>. [Accessed: 08-Oct-2014].
- [15] H. A. Ajimotokan, I. Sher, C. Biliyok, and H. Yeung, "Trilateral Flash Cycle for Recovery of power from a finite low-grade heat so.pdf," in *European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, 2014.
- [16] A. Collier and University of California Berkeley, "Thermal Efficiency from Organic Flash Cycle Market Assessment Report," 2012.
- [17] T. Robbins and S. Garimella, "Low-Grade Waste Heat Recovery for Power Production using an Absorption-Rankine Cycle," 2010.
- [18] J. Karthäuser and T. Öström, "Patent: WO2012128715A1," 2012.
- [19] "Stirling-engine Wikipedia." [Online]. Available: <http://da.wikipedia.org/wiki/Stirlingmotor>. [Accessed: 07-Oct-2014].
- [20] U.S. Department of Energy, "Engineering Scoping Study of Thermoelectric Generator Systems for Industrial Waste Heat Recovery," no. November, 2006.
- [21] H. Kaibe, T. Kajihara, S. Fujimoto, K. Makino, and H. Hachiuma, "Recovery of Plant Waste Heat by a Thermoelectric Generating System Thermo-Module," vol. 57, no. 164, pp. 26–30, 2011.
- [22] A. Svensson, "Samtale med Exencotech."
- [23] M. T. Johansson, "Electricity generation from low temperature industrial excess heat – an opportunity for the steel industry," no. Iea 2010, pp. 1–18.
- [24] "Nyhetsartikkel om ToCircle." [Online]. Available: [http://www.tocircle.com/upload/files/tocircle\\_kretslopet\\_2012.pdf](http://www.tocircle.com/upload/files/tocircle_kretslopet_2012.pdf). [Accessed: 14-Oct-2014].
- [25] Combined Heat and Power Partnership, "Waste Heat to Power Systems," pp. 1–9, 2009.
- [26] "DN-artikkel." [Online]. Available: <http://www.dn.no/nyheter/2014/06/03/Energi/jakter-milliardmarked>. [Accessed: 05-Oct-2014].
- [27] Viking Heat Engine, "General presentation: CraftEngine," vol. 2013.
- [28] Wikipedia, "PCM, artikkel i Wikipedia." [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change\\_material](http://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change_material). [Accessed: 07-Oct-2014].