

Energimyndighetens titel på projektet – svenska <b>Effektivt utnyttjande av industriell spillvärme genom låg temp värmedrivna kraftcykler – en integrerad ansats för Svensk industri</b>	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska <b>Efficient utilization of industrial waste heat by low temperature heat driven power cycles – an integrated approach for Swedish Industry</b>	
Universitet/högskola/företag <b>KTH</b>	Avdelning/institution <b>Inst Energiteknik, Avd tillämpad termodynamik och kylteknik</b>
Adress <b>SE 100 44 Stockholm</b>	
Namn på projektledare <b>Björn Palm</b>	
Namn på ev övriga projektdeltagare <b>Mina Shahrooz</b>	
Nyckelord: 5-7 st <b>Organic rankine, ORC, lågtemperatur elgenerering, energieffektivisering, värmeåtervinning, spillvärme, industri</b>	

## Förord

Denna rapport sammanfattar projektet *Effektivt utnyttjande av industriell spillvärme genom låg temp värmedrivna kraftcykler – en integrerad ansats för Svensk industri* som genomförts på Institutionen för Energiteknik, KTH. Projektet är helt finansierat av Energimyndigheten, men har genomförts med benäget bistånd från industrin, främst i form av avsatt tid för intervjuer och samtal. Vi vill speciellt tacka följande personer för deras positiva medverkan:

- Henrik Öhman, Atlas Copco
- Joachim Karthäuser, Heat Power and Climeon
- Bodil Wilhelmsson och Marcus Timgren, Cementa

Projektet har huvudsakligen genomförts av doktoranden Mina Shahrooz, under handledning av senior personal från Inst Energiteknik. Vi vill också nämna att en grupp studenter varit involverade i analysen av möjligheten att utnyttja ORC i vissa industrier. Dessa är: Lorenzo Centonze, I Wayan Sudiasa, Jimmy Lidén, Siddharth Suresh Sumathi, Christopher Pourier. De står som författare till den rapport som bifogas som bilaga 2.

Stockholm den 18 februari, 2023



Björn Palm, projektledare

## Innehållsförteckning

Sammanfattning .....	4
Summary .....	4
Inledning/Bakgrund .....	6
Genomförande .....	9
Resultat .....	11
Diskussion.....	12
Publikationslista.....	13
Referenser, källor.....	13
Bilagor .....	13

## Sammanfattning

Inom industrin finns stora mängder spillvärme som inte utnyttjas idag. Med ökande priser på energi är det sannolikt att det i framtiden kommer att vara ekonomiskt fördelaktigt att ta tillvara denna spillvärme även om det krävs en hög investeringskostnad för att möjliggöra detta. En metod för att tillvarata spillvärme av låg temperatur är att använda den för att driva elproducerande kraftprocesser, oftast s.k. Organic Rankine Cycles, ORC. Dessa processer fungerar i princip på samma sätt som ångkraftcykler, men använder andra arbetsmedier än vatten. Detta projekt syftar till att undersöka möjligheterna att använda ORC för att tillvarata spillvärme i svensk industri och omvandla delar av spillvärmens till elektrisk energi. Projektet har drivits till en del i nära samarbete med experter på ORC och på industriella processer från industrin. I projektet undersöks möjligheterna inom tre industribranscher: Pappersindustrin, stålindustrin och cementindustrin. Tillsammans står dessa för en mycket stor del av energianvändningen i svensk industri.

En speciell fråga som behandlats på djupet i projektet är valet av arbetsmedium i ORC-processer. Arbetsmediet måste väljas bland annat med hänsyn till temperaturnivåerna för värmekälla och värmesänka. I många fall har HFC-medier (hydro-fluoro-karboner) med hög växthuseffekt (GWP) använts. För att få lämpliga egenskaper finns möjlighet att använda blandningar av olika medier. På detta sätt kan zeotropa blandningar skapas där temperaturglidningen vid kokning och kondensation i ORC-processen motsvarar temperaturändringen vid värmeupptag/avgivning i värmekälla och –sänka, vilket ökar effektiviteten. Inom ramen för projektet har 25 rena, naturliga medier och 104 binära blandningar av naturliga medier analyserats för drift av ORC med värmekällor i temperaturområdet 125-300°C och olika kondenseringstemperaturer. Resultaten visar i korthet att det med vissa blandningar går att uppnå högre exergetisk verkningsgrad än med blandningens rena medier. En metod presenteras också för att identifiera de blandningar som ger högre energieffektivitet.

## Summary

Within industry there are large amounts of waste heat that are not used today. With increasing energy prices, it is likely that in the future it will be economically beneficial to make use of this waste heat, even if a high investment cost is required to make this possible. One method of recovering low-temperature waste heat is to use it to drive electricity-producing power processes, usually so-called Organic Rankine Cycles, ORC. These processes basically work in the same way as steam power cycles, but use other working media than water. This project aims to investigate the possibilities of using ORC to recover waste heat in Swedish industry and convert parts of the waste heat into electrical energy. The project has been run to some parts in close collaboration with experts on ORC and on industrial processes from industry. The project examines the possibilities within three industrial sectors: the paper industry, the steel industry and the cement industry in Sweden. Together, these account for a very large part of the energy use in Swedish industry.

A special issue treated in depth in the project is the choice of working fluids in ORC processes. The working fluid must be chosen, among other things, with regard to the temperature levels of the heat source and sink. In many cases, HFCs (hydro-fluorocarbons) with high global warming potential (GWP) have been used. In order to obtain suitable properties, it is possible to use mixtures of different fluids. In this way, zeotropic mixtures can be created where the temperature shift during boiling and condensation in the ORC process corresponds to the temperature change during heat absorption/release in the heat source and sink, which increases the efficiency. Within the scope of the project, 25 pure, natural fluids and 104 binary mixtures of natural fluids have been analyzed for the operation of ORCs with heat sources in the temperature range 125-300°C and different condensing temperatures. The results show in brief that with certain mixtures it is possible to achieve a higher exergetic efficiency than with the pure media of the mixture. A method is also presented to identify the mixtures that provide higher energy efficiency.

## Inledning/Bakgrund

Utnyttjande av spillvärme från industriella processer kan ske på olika sätt. Om resursen är nära ett fjärrvärmesystem, och temperaturen är tillräckligt hög, är det naturligt att koppla samman dessa system och det finns många bra exempel där detta görs effektivt med god ekonomi. Ett annat sätt är att använda någon form av värmepump för att höja temperaturen på tillgänglig spillvärme från till exempel ett datacenter eller en stormarknad till en önskad nivå. Det finns flera pågående initiativ i denna riktning: till exempel EU-projektet REWARDHEAT (<https://www.euroheat.org/our-projects/rewardheat-renewable-waste-heat-recovery-competitive-district-heating-cooling-nätverk/>) där oanvända låggradiga värmefflöden i städer utforskas. Andra exempel med utvecklade affärsmodeller och många exempel är ”Öppen fjärrvärme” i Stockholm Exergis nät (<https://www.oppenfjarrvarme.se/>).

Tyvär ligger en stor del av den tillgängliga spillvärmens i Sverige inte inom räckhåll för lämpliga slutanvändare och andra lösningar måste sökas för att utnyttja värmen på ett ekonomiskt sätt. Den föreslagna metoden i detta projekt är att använda en lågtemperatur-kraftcykel för att producera kraft som kan användas internt i processer eller exporteras till elnätet vilket innebär nya möjligheter för sektorskoppling och flexibilitet.

Flera system av detta slag, ofta kallade Organic Rankine Cycles (ORC) har introducerats på marknaden av till exempel Opcon, Againity och Climeon i Sverige samt av Ormat och Turboden internationellt, det senare främst för geotermiska tillämpningar. De flesta system använder idag arbetsmedier utan effekt på ozonskiktet (ODP=0) men med hög global uppvärmningspotential (GWP) som HFC134a eller HFC245fa. Typiska konstruktioner använder tubpannor som värmeväxlare vilket innebär att stora mängder av dessa medier behövs. Det finns därför ett behov av att hitta både alternativa arbetsmedier och bättre alternativ för värmeväxlarna. Medierna ska helst vara så kallade naturliga arbetsmedier, rena eller blandningar, och kunna ersätta arbetsmedier med hög GWP samtidigt som energieffektiviteten för processen bibehålls, eller till och med ökar.

En applikation där spillvärme är tillgänglig för användning kännetecknas typiskt av pinch-temperaturen (minsta differensen mellan arbetsmediet och värmekällan/sänkan) samt av massflödet och tillhörande värmekapacitet hos värmekällan eller värmesänkan. En av designutmaningarna för denna typ av cykler är alltså att välja inte bara det bästa arbetsmediet från en termodynamisk synvinkel (högst termisk verkningsgrad) men också i vilken utsträckning den tillgängliga värmekällans energiinnehåll bör utnyttjas, dvs till vilken temperatur värmekällan ska kylas. En hög temperatur på värmekällan, 200C, med ett begränsat massflöde, kommer oundvikligen att kräva ett annat arbetsmedium än en mer måttligt tempererad värmekälla av 120C och också förutsätta en annan användning och ge en annan optimal design. Om temperaturrestriktioner gäller även för den kalla sidan så måste detta beaktas också. I de flesta applikationer utnyttjas inte värmen efter cykeln, men i det här projektet kommer vi att eftersträva applikationer där denna värme, vid låg temperatur, även kan användas,

till exempel för växthusuppvärmning eller förvärmning av ventilationsluft. Generellt sett är systemintegration en av de viktigaste framgångsfaktorerna för att få bra ekonomi för denna typ av system och de tre tillämpningar som studerats har utvecklats med detta i åtanke.

Kraftcykler med låg temperatur har funnits i många år. Tidiga försök använde ozonnedbrytande arbetsmedier som CFC-114 och 113 för låg- och högttemperatursystem. Utvecklingen i Sverige startade tidigt vid Svenska Rotormaskiner, SRM på 60- och 70-talet (senare omvandlat till OPCON) och produkten POWER BOX utvecklades (1). Tillämpningar av tekniken har varit av olika slag till exempel som en sk bottoming cycle för stora dieselmotorer i projekt där småskaliga cykler integreras i moderna dieselmotorer som ett effektivt sätt att höja motorns totala effektivitet med flera procent. Projekt pågår som involverar stora lastbilstillverkare som Scania. OPCON Power Box installerades till exempel i Eskilstuna för utnyttjande av spillvärme i rökgaser från en bioenergianläggning. Ett annat färskt exempel är utvecklingen av Aginity (2).

Andra vanliga tillämpningar av tekniken över hela världen är för geotermisk kraftproduktion i områden där en hög termisk gradient är tillgänglig i marken. Många stora installationer har gjorts i Italien och Belgien till exempel med väletablerade tillverkare som Turboden (3) och Ormat (4). Senare har den svenska tillverkaren Climeon (5) etablerat liknande projekt på Island och i Japan med användning av värme från varma källor. Andra nya tillämpningar är att använda värme från fartygsmotorer för att producera kraft ombord på kryssningsfartyg. Det bör noteras att institutionen för Energiteknik, KTH var värd för Climeon under de första årens utveckling och bistod med plats i laboratoriet, tekniker och expertis.

KTH, Institutionen för Energiteknik har varit verksamma inom området i många år. Forskningspublikationer som speciellt bör nämnas är avhandlingen av Dr Henrik Öhman (6) med titeln *Low temperature difference power systems and implications of multiphase screw expanders in Organic Rankine Cycles* som publicerades 2016. En annan tidigare publikation är en avhandling av Dr. Yang Chen (7) med titeln *Thermodynamic Cycles using Carbon Dioxide as Working Fluid: CO<sub>2</sub>: Transcritical power cycle study*. Den senare studien fokuserade på innovativa cykler som använder CO<sub>2</sub> som arbetsmedium i olika applikationer. På senare tid har Mina Shahrooz (8) aktivt deltagit i projekten COPRO och HIGHEFF i nära samarbete med SINTEF Energiforskning och NTNU i Trondheim. COPRO-projektet, var främst inriktat mot återvinning av industriell spillvärme i temperaturintervallet 125-250°C, ett temperaturintervall där lönsamheten för energiåtervinning är en utmaning. COPRO syftade till att utveckla effektiv och konkurrenskraftig teknik specifikt för detta ändamål baserat på Rankine-cyklar med blandningar av naturliga arbetsmedier och resultatet är därför högst aktuellt nu när F-gaser och PFAS-ämnen ska fasas ut. Projektet HIGHEFF är ett bredare projekt som syftar till att öka energi-effektiviteten i norsk industri i bredare skala. Resultat från COPRO-projektet vidareutvecklades inom HIGHEFF-projektet och Mina Shahrooz finansierades av detta som doktorand fram till slutet av 2020.

Detta forskningsprojekt bygger alltså direkt på resultat och erfarenheter som tidigare erhållits inom projekten COPRO, utfört i nära samarbete med NTNU och

Sintef i Trondheim, och HIGHEFF med ett stort antal partners och finansierat av det norska forskningsrådet. Institutionen har även haft ett nära samarbete med OPCON (Power Box) och Climeon (värmekraftsystem).

## Genomförande

Målet med projektet har varit att förse industrin och akademien med aktuell och kunskap om hur lågtemperatur kraftcykler (ORC) kan bidra till ökad energieffektivitet och minskade utsläpp inom svensk industri.

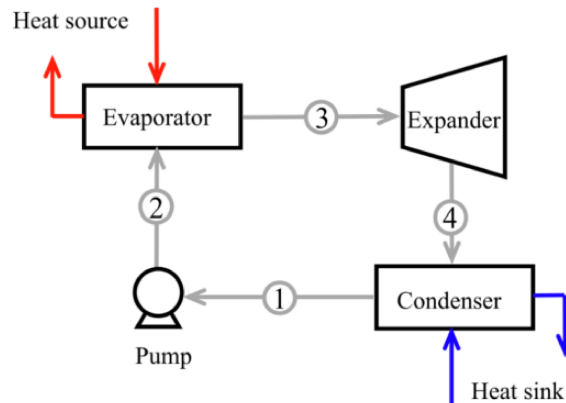
Som nämnts i ansökan har projektet använt, sammanfattat och kommunicerat även resultat som erhållits från tidigare forskning som genomförs i projekten COPRO och HIGHEFF men nu anpassats för typisk svensk industri. Detta innebär att kunskapssammanställningar och informationsspridning har varit en central del av detta projekt.

Ett ytterligare mål med projektet har varit att bidra till att upprätthålla och ytterligare fördjupa kompetensen vid avdelningen för Energiteknik vid KTH inom området lågtemperatur-värmedrivna kraftcykler.

Projektet har genomförts i två tydliga etapper:

- Analys och optimering av naturliga köldmedier för ORC-processen
- Undersökning av lämpliga tillämpningar av ORC i svensk industri.

Den första etappen kan ses som en direkt fortsättning av arbetet som utfördes inom projekten COPRO och HIGHEFF som nämnts ovan. Etappen innebar först en litteratursökning och sammanställning rörande forskning och tillämpning av ORC-cykler, speciellt rörande val av arbetsmedium, samt exergianalys av processen. En datormodell utformades därefter för att, utifrån ämnesdata för arbetsmedierna, interaktionsparametrar, temperaturnivåer och flöden för värmekälla och värmesänka mm. beräkna exergibalanser och irreversibiliteter för varje komponent i systemet, och för systemet som helhet. Totalt undersöktes 25 rena arbetsmedier och 104 binära blandningar. Endast naturliga medier undersöktes och de antagna värmekällorna hade temperaturer mellan 125 och 300°C. I samtliga fall förutsattes att processerna genomfördes under den kritiska temperaturen. Två typer av jämförelser genomfördes: a) Binära blandningar jämfördes med de rena komponenterna och b) Binära blandningar jämfördes med de bästa rena medierna. En detaljerad beskrivning av genomförandet av denna etapp finns i publikation 1, Shahrooz et al., 2022, som bifogas rapporten. Denna etapp innefattar WP3, Optimering, samt WP4, Kommunikation, i ansökan. De viktigaste resultaten finns redovisade nedan.



**Figur 1: Grundläggande utformning av ORC-processen.**

Den andra etappen av arbetet har undersökt möjligheten att tillämpa ORC-cykler i svensk industri. Huvudsyftet har varit att svara på om det är lönsamt eller inte att investera i ett ORC-system för de tre olika industribranscher som studerats, pappers- och massa-, cement- och stålindustrin (med fokus på HYBRIT-processen). Fokus har främst legat på att beakta den tekniska utvecklingen och med anledning av senaste årets geopolitiska händelser även inkludera den kraftiga höjningen av elpriset som skett under projektets gång.

De tre industribranscherna valdes då de är de mest energiintensiva industrierna i Sverige. Valet innebär en avvikelse jämfört med vad som angavs i ansökan, där cementindustrin inte nämns, men istället samlokalisering av växthus med tänkbara spillvärmekällor nämndes som ett tredje område vid sidan av stål- och pappers/massaindustrin. En första analys visade att cementindustrin hade större förutsättningar för tillämpning av ORC. Studien inleddes med undersökning av allmänna frågor, som möjligheter och hinder som kan påverka den framtida ORC-marknaden, undersökning av den nuvarande ORC-marknaden, och hur olika prisscenarier påverkar de ekonomiska förutsättningarna för att investera i ORC. Därefter fokuserade studien på de tre utvalda branscherna. Metodiken har bestått av en inledande litteraturgenomgång av nuvarande användning av ORC i de olika branscherna, därefter har intervjuer genomförts för att få mer insikter i ORC-marknaden och ORC-system, slutligen skapades ett simuleringsverktyg som användes för att undersöka potentialen, främst vilka effektivitetsvinster som kan erhållas beroende på temperaturen på spillvärmekällorna, samt uppskattning av investeringskostnaderna i de olika tillämningsarna. Baserat på simuleringen och kontakten med industrin skapades en modell för att bestämma hur mycket el som kan produceras och förslag på implementering. Simuleringen gav också insikter om vad som är huvudparametrarna som påverkar systemets lönsamhet, och en känslighetsanalys gjordes för att fastställa vilka parametrar som bör beaktas när man bedömer potentialen i var och en av branscherna.

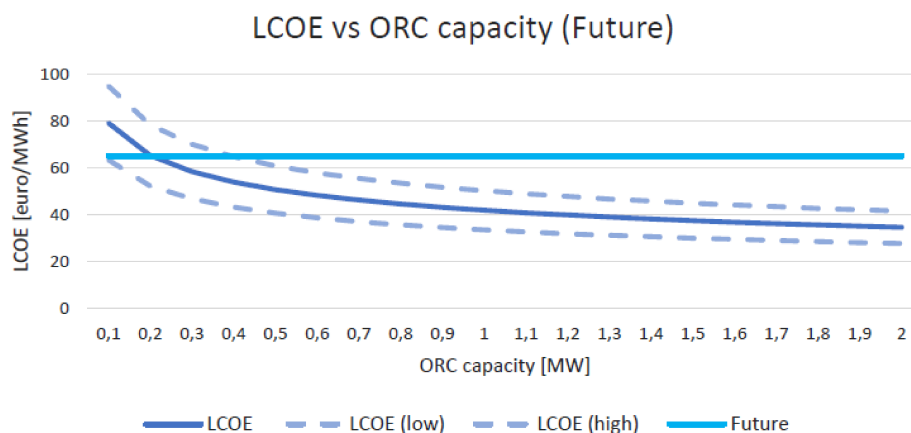
De historiska elpriserna granskades också, liksom framtidsscenarier för elpriset specificerade av Energimyndigheten och scenarier som framkommit vid intervjuerna. En detaljerad redogörelse för genomförandet finns i en intern rapport, se bilaga 2. Denna etapp motsvarar WP1, 2 och 4 i ansökan.

## Resultat

Resultaten från Etapp 1 visar att de analyserade arbetsmedierna kan uppdelas beroende på beteenden. I vissa fall ger blandningar en energieffektivitet som faller mellan prestanda för dess rena beståndsdelar för tryck/temperaturintervall i förångaren och att använda blandningar ger ingen fördel. Vissa blandningar kan dock ge prestandahöjning i ett specifikt arbetsområde. Resultaten visar att det maximalt tillåtna förångartrycket spelar en viktig roll för prestandan vid jämförelse av zeotropa blandningar med deras rena beståndsdelar. Blandningar som överträffar dess rena beståndsdelar analyserades ytterligare och en screeningmetod utvecklades för att kartlägga och identifiera de binära blandningarna med prestandaökning i form av hög absolut exergieffektivitet. Denna metod är baserad på de viktigaste termofysikaliska egenskaperna hos medierna, inklusive kritisk temperatur och normal kokpunkt, såväl som arbetsförhållanden, dvs temperatur för värmekälla och värmesänka, samt minsta temperaturdifferens i värmeväxlarna.

Allmänt kan sägas att det bara är i undantagsfall där blandningar kunnat visas ge bättre prestanda än rena medier. Det bör också noteras att blandningar kan ge upphov till masstransport-motstånd vid förångning och kondensation, vilket kan leda till högre temperaturdifferenser i förångare och kondensor och därmed lägre energi/exergieffektivitet. Dessa effekter beror på utförandet av värmeväxlarna och har inte tagits med i modellen. För mer detaljer om resultaten hänvisas till artikeln i bilaga 1.

Slutsatserna från Etapp 2 kan sammanfattas som följer: Om elpriserna förblir på nuvarande nivå (2022/23) så skulle det nästan alltid vara ekonomiskt fördelaktigt att investera i ORC. Denna slutsats förutsätter, förutom fortsatt höga elpriser, att investeringen kan skrivas av under hela sin tekniska livslängd. Lönsamheten kommer också att bero på kapaciteten för ORC: Större anläggningar har större förutsättningar att bli lönsamma (se fig. 2), men kräver tillgång till större mängder spillvärme. Lönsamheten beror också på temperaturnivåerna på spillvärmen. Bilaga 2 innehåller en mer detaljerad analys samt en känslighetsanalys.



**Figur 2: Elpris (Levelized Cost of Electricity) som funktion av storleken för ORC jämfört med ett scenario med ett framtida elpris av 650 €/MWh**

## Diskussion

Det finns relativt stor tillgång på spillvärme av tillräckligt höga temperaturer i svensk basindustri, värme som skulle kunna användas för att driva ORC. Ett generellt problem med energiomvandling av värme med låga temperaturer är att energieffektiviteten blir låg. Energieffektiviteten för en kraftcykel begränsas av Carnotcykelns verkningsgrad, ingen process mellan två konstanta temperaturer kan ge högre verkningsgrad. Som exempel kan vi anta att spillvärme (värmekälla) finns tillgängligt vid 100°C och att värmen kan avges till en omgivning (värmesänka) med temperaturen 20°C. För att få måttlig storlek på värmeväxlarna mellan källa/sänka och arbetsmediet i cykeln behöver temperaturdifferensen vara minst 10°C. Cykeln kan alltså i detta fall som bäst arbeta mellan 90 och 30°C. En reversibel Carnotprocess mellan dessa temperaturer skulle ge en termisk verkningsgrad av ca 16%. Verkliga processer har betydligt lägre verkningsgrad och med de aktuella temperaturerna kan verkningsgraden i praktiken kanske bli 10 – 12%. Investeringskostnaden blir också hög eftersom stora värmeväxlare (som ger små temperaturdifferenser) på både kalla och varma sidan är viktigt för att få upp verkningsgraden. För en lönsam investering krävs därmed lång avskrivningstid, låg ränta och högt pris på den elenergi som elen från ORC ersätter. I nuvarande geopolitiska läge är det mycket svårt att ställa prognoser för framtida elpriser. Det är dock inte sannolikt att priserna återgår till nivåerna före 2021, dvs innan Ryssland började strypa exporten av gas till EU. Det är sannolikt att elenergi inom EU i framtiden kommer att genereras från vind, sol och (i vissa länder) kärnkraft. Med stor andel flödande energi uppstår också behovet av energilagring vilket också innebär en kostnad. Elpriset kommer därmed sannolikt att bli mer volatilt och på en högre nivå än före 2021. Däremot är det sannolikt att priserna sjunker jämfört med de mycket höga nivåer som förekommit under andra halvan av 2022. I ljuset av den stora osäkerheten vad gäller elpriset är det svårt att säkert säga om ORC kommer att vara en lönsam investering. I vissa tillämpningar, med god tillgång till gratis spillvärme vid hög temperatur är förutsättningarna bättre, speciellt i södra Sverige, (elområde 3 och 4) där elpriset är högst. Alternativ användning av spillvärmens, antingen inom processen eller som t.ex. fjärrvärme, behöver också utredas i varje enskilt fall.

## Publikationslista

Shahrooz, M., Lundqvist, P., Nekså, P., 2022, *Performance of binary zeotropic mixtures in organic Rankine cycles (ORCs)*, Energy Conversion and Management, 266, (2022), 115783, Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115783>

Centonze, L., Sudiasa, I. W, Lidén, J., Sumathi, S. S., Pourier, C., 2022, *Organic Rankine Cycles for low-temperature industrial waste heat utilization*, Intern rapport, KTH, Inst Energiteknik.

## Referenser, källor

1. <https://rotor.se/powerbox/opcon-powerbox-orc>
2. <http://www.energikontorsyndost.se/a/sveriges-forsta-orc-pa-fjarrvarmeanlaggning-invigd>
3. <https://www.turboden.com/>
4. <https://www.ormat.com/en/home/a/main/>
5. <https://climeon.com/>
6. Low temperature difference power systems and implications of multi-phase screw expanders in Organic Rankine Cycles, Öhman, Henrik, KTH, School of Industrial Engineering and Management (ITM), Energy Technology, Applied Thermodynamics and Refrigeration.
7. Thermodynamic Cycles using Carbon Dioxide as Working Fluid: CO<sub>2</sub> transcritical power cycle study, Yang, Chen, KTH, School of Industrial Engineering and Management (ITM), Energy Technology, Applied Thermodynamics and Refrigeration.
8. Shahrooz, Mina, 2018, In: Refrigeration Science and Technology, International Institute of Refrigeration, 2018, Vol. 2018, p. 1373-1380

## Bilagor

- Administrativ bilaga enligt mall
- De två publikationer som nämns i publikationslistan ovan bifogas som separata dokument.