

BAGGRUNDSNOTAT

Mini- teknologikatalog

SEPTEMBER 2025

Udarbejdet af:



PlanEnergi

For:



ENERGI PÅ TVÆRS

Et handlingsfællesskab under:



Analysen er finansieret af:



Region
Hovedstaden

Udarbejdet af:

Ea Energianalyse
Gammeltorv 8, 6 tv.
1457 København K
www.eaea.dk

Og

PlanEnergi
Jyllandsgade 1
9520 Skørping
www.planenergi.dk

For:



ENERGI PÅ TVÆRS

Et handlingsfællesskab under:



Analysen er finansieret af:



Region
Hovedstaden

Indholdsfortegnelse

Indholdsfortegnelse	3
1 Introduktion	4
2 Varmepumpeteknologi og kølemidler	5
2.1 Ammoniak (NH ₃).....	5
2.2 Kulbrinter	7
2.3 Kuldioxid (CO ₂).....	9
3 El-markeder	11
4 COP og Lorenz virkningsgrader	12
4.1 Systemkonfiguration og COP	13
5 Varmeeffekt og eloptag	15
6 Udeluft som varmekilde	16
6.1 Investering.....	16
6.2 Energioptagere	18
6.3 Højden på kølegården	21
6.4 Kondensvand	22
7 Referencer	23

1 Introduktion

Denne rapport udgør et bilag til projektets arbejdsmappe 1: *Forudsætninger for elektrificering*.

Rapporten giver et indblik i den tilgængelige varmepumpeteknologi og markedets løsninger.

Det grundlæggende arbejdsprincip for en varmepumpe samt fordele og ulemper ved forskellige varmekilder er beskrevet mange steder i litteraturen – blandt andet i Energistyrelsens Teknologikatalog (Danish Energy Agency, 2023), drejebog til store varmepumpeprojekter i fjernvarmesystemet (Energistyrelsen og Grøn Energi, 2017) samt tilhørende inspirationskataloger (Dansk Fjernvarme, 2022).

Beskrivelsen i denne rapport skal betragtes som et supplement til den grundlæggende viden, som ovenstående litteratur tilbyder. Hvor det er muligt, henvises der i dette dokument til allerede eksisterende kilder til viden og erfaringsopsamling.

Markedet for varmepumper til fjernvarmeproduktion har udviklet sig markant i de seneste år – og udviklingen fortsætter. Den dominerende varmekilde, der benyttes til varmepumper på landsplan, er udeluft. Af den årsag er det også her, branchen har udviklet sig mest, i kraft af de mange værdifulde erfaringer, der er og fortsat bliver gjort.

I det geografiske område for Region H er det dog ikke udeluft, der er den dominerende varmekilde for de eksisterende varmepumper. Dette kan skyldes, at andre gode varmekilder har været til rådighed, samt at egnede arealer til luft/vand-varmepumper kan være vanskelige at finde i tætbebyggede områder. På trods af disse forhold, er der dog stadig områder i Region H hvor der er et stort potentiale for denne varmekilde. Med ønsket om at denne rapport bidrager med supplerende viden til allerede eksisterende rapporter, og med håb om at viderebringe erfaringer fra resten af landet, findes der derfor i denne rapport et særskilt kapitel om erfaringer med drift og design af luft/vand-varmepumper.

For beskrivelse af varmepumpeteknologi med fokus på spildevands-, havvands-, og højtemperaturvarmepumper henvises særligt til teknologibeskrivelse og erfaringsindsamlinger udarbejdet af Niras i forbindelse med projektet "Fremtidens fjernvarme forsyning i hovedstadsområdet 2020", forkortet FFH50 (Niras, 2021).

2 Varmepumpeteknologi og kølemidler

Kølemidlet er det arbejdsmedie, som anvendes inde i varmepumpens maskineri, hvor det cirkuleres i et lukket kredsløb mellem varmepumpens forskellige komponenter, og transporterer varmen fra den kolde side (varmekilden, fx overskudsvarme) og den varme side (varmeaftagersiden, her fjernvarmevandet). Der findes ikke ét kølemiddel, der er det bedste til alle anvendelser, idet deres termodynamiske egenskaber varierer, ligesom der også er forskel på hvilke miljøpåvirkninger og sikkerhedsklassificeringer, de enkelte kølemidler har.

På det danske marked indenfor storskala varmepumper er der primært gjort erfaringer med *naturlige kølemidler*.

Ud over *naturlige kølemidler* tillader den danske lovgivning også brugen af nogle syntetiske *HFO kølemidler*, men disse har endnu ikke været anvendt i nævneværdigt omfang grundet tvivl om hvilken miljøpåvirkning de har på længere sigt, men også fordi de er væsentligt dyrere end de naturlige kølemidler.

Indenfor kategorien af naturlige kølemidler er disse tre dominerende:

1. Ammoniak (NH_3)
2. Kulbrinter (en bredere betegnelse for en række kølemidler: Propan, butan, isobutan, isopentan, m.fl.)
3. Kuldioxid (CO_2)

Alle de ovenstående kølemidler er naturligt forekommende i naturen, og udmærker sig ved at have den mindst mulige påvirkning af vores natur ved udslip til omgivelserne og klimaet i form af ingen eller meget lav drivhuseffekt (GWP).

På markedet for storskala-varmepumper er der en række aktører (primært danske), som har specialiseret sig i at arbejde med et bestemt af kølemidlerne, og særligt gennem den store udbygning af varmepumper indenfor fjernvarmeområdet er der opnået stor erfaring med alle teknologierne. En del af disse aktører producerer udelukkende fabriksbyggede varmepumpeunits, der sælges og installeres af entreprenører, mens andre opbygger anlægget "på pladsen". De komponenter, der anvendes i varmepumperne, adskiller sig på baggrund af kølemiddelvalget, ligesom anlægsopbygningen også vil variere.

De ovennævnte kølemidler har som nævnt forskellige fordele og ulemper, der bl.a. afhænger af de opstillede krav til varmepumpeanlægget. Særligt har fjernvarmevandets frem- og returtemperaturer stor indflydelse, hvor bl.a. høje fremløbstemperaturer har negativ indflydelse på varmepumpesystemer med ammoniak og kulbrinter, mens det særligt er høje returtemperaturer, der er negative for systemer med CO_2 .

2.1 Ammoniak (NH_3)

Ammoniak er kendt for særligt at være anvendt i store industrielle køleanlæg, herunder mejerier og slagterier. Kompressorerne er kerneteknologien i varmepumpeanlæggene, og på verdensplan er producenterne Johnson Controls (JCI)/Sabroe (USA/DK), GEA (DE) og Mayakawa/MyCom (JP). På det danske marked for store varmepumper er det særligt maskiner fra Johnson Controls (JCI)/Sabroe, der primært er blevet anvendt. Disse produceres på deres fabrik i Højbjerg syd for Aarhus. Mayakawa/Mycom

kompressorerne har været anvendt i en del luft/vand varmepumper, men er dog ikke set på markedet i nye anlæg inden for de sidste ca. 4 år.

Når ammoniak anvendes til f.eks. luft/vand-varmepumper vil disse anlæg typisk være pladsbyggede anlæg, hvor det er entreprenørens opgave at designe anlægget baseret på komponenter fra forskellige leverandører. Da kompressorerne til ammoniakanlæg har stor kapacitet pr. enhed, er disse anlæg kendetegnet ved et betydeligt mindre antal kompressorer, end der ses for luft/vand-varmepumper med kulbrinte- og CO₂-anlæg. Kompressorerne er den såkaldte åbne type, hvor kompressoren drives af en elmotor gennem en åben aksel med kobling.

For varmepumpeinstallationer med vand (eller anden væske) som medie i både kilde og aftager, kan der i stedet anvendes en fabriksbygget unit. Dette ses særligt for varmepumper der udnytter overskudsvarme fra industrier og datacentre. For andre varmekilder som spildevand, drikkevand og grundvand kan både pladsbyggede anlæg og fabriksbyggede units anvendes. Såfremt der bygges med fabriksbyggede units, vil dette være i kombination med en mellemkreds mellem varmepumpe og varmekilde. Eksempler på dette ses f.eks. for spildevandsvarmepumpen hos Kalundborg Forsyning og drikkevandsvarmepumpen hos Frederiksberg Forsyning. Eksempler på pladsbyggede ammoniak-anlæg er f.eks. HOFORs SVAF-varmepumpe beliggende i Sydhavnen samt spildevandsvarmepumpen på Bjergmarken renseanlæg hos FORS.

For ammoniak inddeles kompressorerne efter trykklasse. Trykklassen er et udtryk for hvor højt et kølemiddeltryk kompressoren kan præstere og arbejde under. Trykklassen sætter en begrænsning for hvor høj en fremløbstemperatur, der kan leveres på den varme side, og optimalt valg af trykklasse for de forskellige dele af varmepumpeanlægget og særligt højtrykskompressorerne (der leverer det sidste temperaturløft til den ønskede fremløbstemperatur) og deres antal, kan medføre en betydelig forskel i investeringen.

Fra procenten JCI/Sabroe leveres både stempel- og skruekompressorer til varmepumpanlæg med forskellige trykklasser. Stempelkompressorerne leveres i tre trykklasser, der benævnes henholdsvis SMC, HPC og HPX:

- SMC er de traditionelle kølekompressorer til 25 bar, der kan levere temperaturer op til ca. 52°C.
- HPC er en 50 bars kompressor, der kan levere en fremløbstemperatur op til ca. 72°C.
- HPX er en 60 bars kompressor, der kan levere en fremløbstemperatur op til ca. 90°C.

Skruekompressorerne, der alle betegnes SAB, leveres i trykklasserne 25, 28, 40 og 63 bar, hvor sidstnævnte kan levere fremløbstemperaturer på op til 95°C.

Ovenstående fremløbstemperaturer er dog også betinget af hvilket tryk og temperatur kompressoren modtager på den kolde side (sugegastemperatur og -tryk).

Baseret på de termodynamiske egenskaber er ammoniak det kølemiddel, der teoretisk kan opnå de højeste COP-værdier. Når der er tale om pladsbyggede anlæg, designet til den specifikke opgave ses der også højere COP i de tilbudte anlæg i praksis.

Et typisk pladsbygget luft/vand-varmepumpeanlæg vil være bygget op som to-trins anlæg, hvilket vil sige at kølemidlet bliver komprimeret i to-trin. Første kompressionstrin er som oftest en skruekompressor, mens andet kompressionstrin er en stempelkompressor. Der findes dog mange forskellige

anlægsopbygninger, da anlægget designes i hvert enkelt projekt efter kravspecifikationer og fjernvarmesystemets temperaturniveauer.

2.2 Kulbrinter

Kulbrinter er en fællesbetegnelse for de kølemidler, der består af kulbrinte-molekyler. Almindelig flæskogas er også kulbrinte, og består faktisk af en blanding af to af de meget brugte kølemidler: Propan og butan.

Det danske entreprenørfirma Solid Energy har i en del år leveret varmepumpeunits og komplette varmecentraler med forskellige kulbrinte-kølemidler til både luft/vand- og vand/vand-varmepumper. For ganske nylig er varmepumpeunitproducenten Fenagy (også et dansk firma) ligeledes begyndt at tilbyde varmepumper, der anvender kulbrinter som kølemiddel, dog kun til vand/vand-varmepumper.

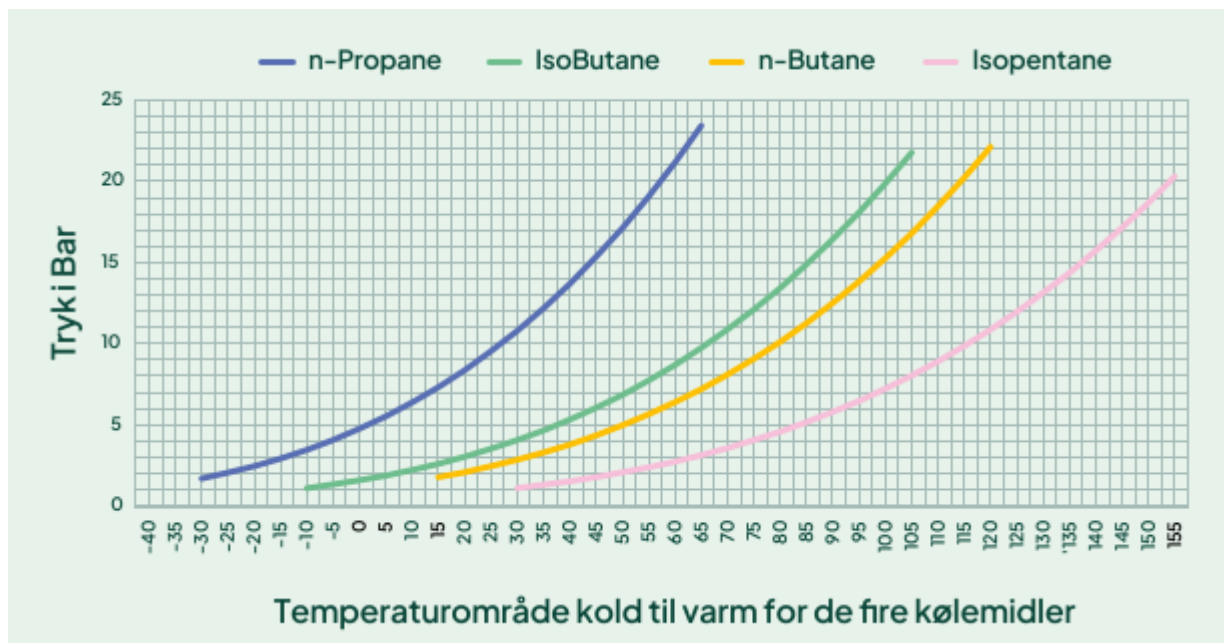
Virksomhederne indkøber komponenterne til varmepumperne fra forskellige leverandører, hvorefter de på deres fabrikker i Danmark sammenbygger disse til standardiserede varmepumpe-units. Hvad angår kompressorerne i varmepumperne, så benytter Solid Energy sig af producenten Frascold, mens Fenagy benytter producenten Bitzer.

Fælles for disse er, at det er semi-hermetiske kompressorer, der særligt er anvendt til køleanlæg i f.eks. supermarkeder. I disse maskiner er motor og kompressor sammenbygget som en fælles lukket tryksat enhed uden åbne akseltætninger til det omgivende maskinrum. Disse kompressorer har en mindre kapacitet pr. enhed, sammenlignet med de industrielle kompressorer til ammoniak. Det vil sige at der skal flere enheder til at give det samme mængde køling eller varme.

De enkelte kulbrinte-kølemidler har forskellige egenskaber og vælges ud fra den specifikke anvendelse, således at arbejdsstrykket for kølemiddelkredsen holdes passende lavt. Solid Energy har lavet Figur 1, der viser det mulige arbejdsområde for nogle forskellige kulbrinte-kølemidler.

Med henblik på at opnå den bedste COP ift. pris giver de forskellige egenskaber mulighed for at kombinere forskellige varmepumpeunitstyper i samme anlæg. Den mere velafprøvede måde at udnytte kulbrinter som kølemiddel, er at seriekoble flere units i et såkaldt kaskade-anlæg, der består af to separate kredsløb med hvert deres kølemiddel. Her laves der typisk en lav-temperatur varmepumpe med propan som kølemiddel (op til maksimalt 65°C jf. Figur 1), som afleverer sin varmeeffekt ved en mellemtemperatur til en højtemperatur-varmepumpe, der anvender f.eks. isobutan som kølemiddel, hvormed afgangstemperaturer på op til 90°C kan opnås.

Propan udnyttes i lavtemperaturkredsen, da dette kan optage energi effektivt ved de lave kildetemperaturer, men er samtidig ikke i stand til at lave en særlig høj fremløbstemperatur på den varme side uden trykket kommer ret højt op. Af Figur 1 fremgår det, at propan (i Solid Energys design) er begrænset til 65°C, mens isobutan, butan og isopentan begrænses ved henholdsvis 105°C, 120°C og 155°C. Ofte vil der også være en trinvis opvarmning af fjernvarmevandet, hvor en et-trins propan-varmepumpe laver den første opvarmning og kaskadeanlægget den endelige opvarmning til den ønskede fremløbstemperatur.



Figur 1: Arbejdsområde for 4 forskellige kulbrinte kølemidler. Kilde: Solid Energy.

Kulbrinte-kølemidler kategoriseres som meget brandfarlige, hvilket stiller ekstra krav til komponenter og design. Dette er håndteret ved at entreprenøren installerer varmepumpekedse i et lukket kabinet, hvori der holdes et lille undertryk med aftræk til omgivelserne. På den måde holdes en evt. lækage i kabinettet, hvor en gasalarm vil afbryde elforsyningen ved lækage. På den måde begrænses området med skærpede design- og sikkerhedskrav til kabinettet, og dermed ikke til det omgivende maskinrum. På Figur 2 ses eksempler på sådanne kabinetter fra henholdsvis Solid Energy og Fenagy.



Figur 2: Eksempler på varmepumpe-units fra Solid Energy (venstre) og Fenagy (højre).

Disse varmepumpeenheder kan placeres direkte i forlængelse af hinanden, såfremt den samlede varmepumpeinstallation skal levere en større kapacitet end hvad et enkelt modul kan levere.

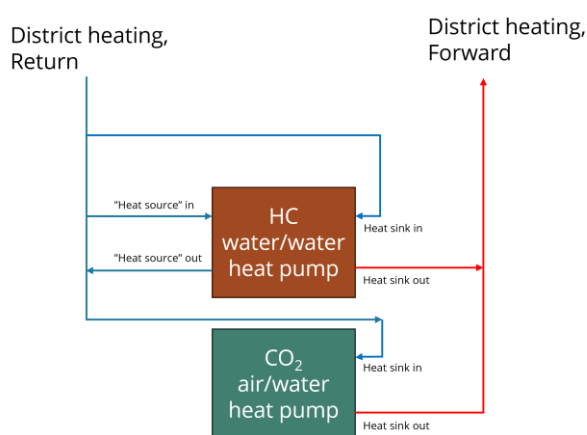
2.3 Kuldioxid (CO₂)

I de senere år har CO₂ som kølemiddel til varmepumper opnået en større udbredelse på det danske marked. Kølemidlet er bemærkelsesværdigt, da det hverken er giftigt eller brandfarligt. De danske firmaer Advansor og Fenagy leverer fabriksbyggede varmepumpeenheder, som bliver samlet i Danmark med komponenter fra forskellige leverandører. Fenagy har med deres CO₂-varmepumper primært fokus på luft/vand-varmepumper. Endvidere har Carrier (USA) leveret ganske få anlæg i Danmark, men de ser ikke længere ud til at være aktive ift. luft/vand-varmepumper.

De kompressorer som f.eks. Fenagy og Advansor benytter har en mindre kapacitet pr. enhed, sammenlignet med de industrielle kompressorer til ammoniak. Det vil sige, at der skal flere enheder til at give den samme mængde køling eller varme. For at øge kapaciteten i én enhed kan flere kompressorer installeres parallelt. Fenagys varmepumpeenheder fås i fire forskellige kapacitetsstørrelser mellem 600 kW og knap 3 MW varmeeffekt. Flere enheder installeres parallelt, hvis den samlede varmepumpekapacitet skal overstige, hvad en enkelt enhed kan levere. Styringen af de enkelte enheder skal varetages af et overordnet SRO-system.

CO₂-varmepumpesystemer til fjernvarme anvender typisk to-trinskompression, for at opnå en højere effektivitet. Effektiviteten af CO₂-varmepumpesystemer er derudover tæt knyttet til returtemperaturen i fjernvarmenettet. Ved høje temperaturdifferenser på fjernvarmesiden, kan der opnås fremløbstemperaturer op til 85°C. En lav returtemperatur sikrer en tilstrækkelig afkøling af kølemidlet i gaskøleren. Ved returtemperaturer over 42°C er CO₂ sjældent det mest effektive valg, og ved temperaturer over 45°C vil systemet have udfordringer ift. driften og ikke have en særlig høj COP.

Denne udfordring kan dog eksempelvis løses ved at kombinere CO₂-varmepumpen med en enhed, der anvender kulbrinter som kølemiddel, og som installeres i returledningen på fjernvarmenettet for at nedkøle vandet, før det ledes ind i CO₂-enheden, som vist i Figur 3.



Figur 3 : Eksempel på kombination af en kulbrinte-varmepumpe (brun boks) og en CO₂-varmepumpe (grøn boks) (kilde: Fenagy).

For varmepumper til udnyttelse af havvand som varmekilde er MAN Energy Solutions ligeledes kommet ind på markedet med en CO₂-varmepumpe, der anvender turbokompressorer. Komponenterne og anlægsopbygningen fra MAN Energy Solutions er designet efter en meget stor varmekapacitet med få kompressorenheder, og adskiller sig grundlæggende fra de ovennævnte units der anvendes til

luft/vand-varmepumper. Teknologikataloget fra Energistyrelsen (Danish Energy Agency, 2023) er i juni 2022 opdateret med et afsnit om havvandsvarmepumper, hvor teknologien til disse er beskrevet. I det internationale fjernvarmemagasin "Hot | Cool" (Nielsen, Decorvet, & Mølbak, 2025) er de første driftserfaringer fra varmepumpen i Esbjerg beskrevet.

3 El-markeder

Hvilke el-markeder de enkelte varmepumpeanlæg kan deltage i, afhænger primært af hvor hurtigt anlæggene kan reagere. Den nedenstående tabel giver et groft overblik over dette.

Der er her set på elspotmarkedet samt på deltagelse i markedet for manuelle reserver (manual frequency restoration reserve, mFRR) og markedet for automatiske reserver (automatic frequency restoration reserve, aFRR). I DK2 (Østdanmark) kræver mFRR fuld aktivering inden for 12,5 minutter, mens aFRR skal fuldt aktiveres inden for 5 minutter.

Kølemiddel	Producent	El-marked		
		Spot	mFRR	aFRR
Ammoniak	JCI m.fl.	Ja	Nej	Nej
Kulbrinter	Solid Energy	Ja	Ja	Måske
CO ₂	Fenagy	Ja	Ja	Måske

I tabellen betyder "Ja" at anlægget umiddelbart kan deltage i det pågældende marked, "Nej" betyder at anlægget ikke kan deltage i det pågældende marked, og "Måske" betyder, at anlægget sandsynligvis kan deltage i det pågældende marked, men at dette skal afklares med Energinet.

For CO₂-havvandsvarmepumpen i Esbjerg fra MAN Energy Solutions afventes der fortsat test af varmepumpens reguleringsevne.

4 COP og Lorenz virkningsgrader

Varmepumper er en effektiv måde at omsætte el til varme på, idet varmepumpen kan trække energi ud af en lavtemperatur-varmekilde (f.eks. udeluft eller kølevand fra et datacenter) og løfte denne energi til den ønskede temperatur. Med andre ord får man mere varmeenergi leveret, end der tilføres i form af el-energi. Forholdet mellem den leverede energi (f.eks. fjernvarme ved fremløbstemperaturen) og den forbrugte el kaldes COP (udtales med hvert enkelt bogstav: C-O-P), som er en forkortelse for *Coefficient Of Performance*. COP angiver forholdet mellem den leverede varme (eller køling) og varmepumpeanlæggets elforbrug – altså "hvad man får" i forhold til "hvad det koster".

Desværre findes der en teoretisk maksimal grænse for, hvor høj COP'en kan blive. Denne grænse afhænger udelukkende af temperaturen på både indløb og udløb fra varmekilden og varmeaftageren (i dette tilfælde fjernvarmenettet). Den teoretisk maksimale COP kaldes *Lorenz COP*. I Energistyrelsens teknologikatalog (Danish Energy Agency, 2023) beskrives det i kapitlet om varmepumper, hvordan denne beregnes.

I praksis ligger COP-værdien for nutidige varmepumpeanlæg typisk mellem 40% og 55% af den maksimale Lorenz COP. Denne procentsats benævnes *Lorenz-virkningsgraden*.

Den faktiske COP-værdi for varmepumpen vil variere som funktion af varmepumpens fordampertemperatur, samt fjernvarmens retur- og fremløbstemperaturer.

I sammenligningen mellem ammoniak og CO₂ som kølemidler i varmepumpeanlæg findes en række tommelfingerregler:

- **Fordampertemperatur:** Varmepumpernes fordampertemperatur er dikteret af udløbstemperatur på varmekilden. Jo lavere udløbstemperatur på varmekilden, desto lavere fordampertemperatur. Varmepumper med ammoniak er mere sensitiv end CO₂ overfor en ændring i fordampertemperaturen. En ændring på 1 K i fordampertemperatur medfører 3% ændring i COP for ammoniak og 1% ændring i COP for CO₂.
- **Returtemperatur på fjernvarmevandet:** En lavere returtemperatur på fjernvarmevandet vil have en positiv effekt på COP for varmepumper med ammoniak, men ikke med nogen signifikant ændring i COP for en enkelt grads variation. For varmepumper med CO₂ vil en ændring på 1 K i returtemperatur medføre en ændring på 1,5% for COP.
- **Fremløbstemperatur på fjernvarmevandet:** For varmepumper med ammoniak har fremløbstemperaturen stor indflydelse, da denne er den bestemmende faktor for kondenseringstrykket i varmepumpen. For en ændring på 1 K i kondenseringstemperaturen/fremløbstemperaturen ændres COP med 1%. For varmepumper med CO₂ er fremløbstemperaturen af mindre betydning, grundet en transkritisk kølemiddelproces.

Fra ovenstående tommelfingerregler kan udledes at COP-værdien for en varmepumpe vil variere hen over året, såfremt varmekilden og/eller fjernvarmenettet ændrer temperaturniveauer. Det kan ligeledes udledes at COP-værdierne for henholdsvis ammoniak og CO₂ ikke vil variere i samme grad, da disse påvirkes forskelligt af de ydre omstændigheder/sætpunkter.

Lorenz-virkningsgraden for et varmepumpeanlæg er som udgangspunkt mindre følsomt overfor temperaturvariationer i varmekilde og fjernvarmenet. Dette skyldes at trenden for den maksimale Lorenz

COP overordnet set følger de samme trends som COP-værdierne, og dermed kan forholdet mellem disse (det vil sige Lorenz virkningsgraden) være nogenlunde konstant. Såfremt der opleves store temperaturvariationer, som f.eks. varierende udelufttemperaturer eller store sæson-forskelle på fjernvarmens fremløb- og returtemperaturer, vil Lorenz virkningsgraden dog også svinge i værdi. Her ses det typisk at Lorenz virkningsgraden er laveste om sommeren og højst om vinteren.

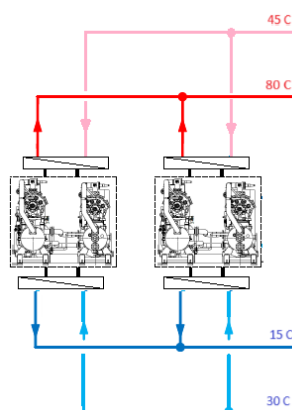
Erfaringstal for luft/vand-varmepumper viser at Lorenz virkningsgraderne kan svinge mellem 5%-point og 12%-point som følge af årsvariationer i temperaturniveauerne.

4.1 Systemkonfiguration og COP

COP for det samlede system afhænger ikke kun af selve varmepumpeuniten, men også af hvordan varmepumpen kobles til det eksisterende fjernvarmesystem.

Et varmepumpesystem, der består af flere varmepumpe-units, kan sammenkobles i en parallel og/eller seriel konfiguration på både varmekildeside og varmetaftagerside.

I en parallel konfiguration, på begge sider af varmepumpen, vil alle enheder have samme afkøling og opvarmning af henholdsvis kilde og varmetaftager. De enkelte varmepumpeenheder arbejder som "stand alone"-enheder, der alle kan nedkøle varmekilden til rette temperatur og samtidig levere den nødvendige fremløbstemperatur til varmetaftageren. En principskitse for en parallel systemkonfiguration ses på Figur 4.

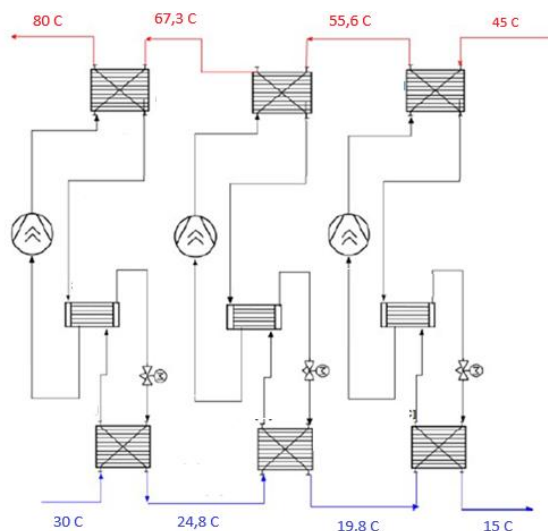


Figur 4: Principskitse for opbygningen af en parallel systemkonfiguration for to varmepumpeenheder, der begge køler varmekilden fra 30 til 15°C, samtidig med at de opvarmer fjernvarmevandet fra 45 til 80°C.

Et parallelt system er robust over for udfald og nedbrud, da en enkelt varmepumpeenhed kan tages ud af drift, uden at påvirke de resterende enheder. Dette kan også være en fordel i forbindelse med service, hvor varmepumperne kan være ude på skift, uden at hele varmeproduktionen ophører.

I den serielle konfiguration vil vandet (for enten kilde, varmetaftager eller begge sider) løbe igennem flere varmepumpeenheder, og gradvist opnå den ønskede afkøling eller opvarmning. Denne konfiguration vil normalt kun være aktuel, såfremt der er et relativt stort temperaturspænd mellem indløb og udløb på vandet (på varmepumpernes kolde sider, varme sider eller begge sider). På Figur 5 er der vist tre varmepumpeenheder, som sidder i seriel konfiguration for både kilde og varmetaftager.

En seriel konfiguration kan være sårbar overfor udfald af en enkelt varmepumpeenhed, da dette kan påvirke fremløbstemperaturen til varmeanftageren eller den afkølede temperatur på kilden. Dette kan dog imødekommes ved at designe en del eller alle varmepumpeenheder til at kunne klare det fulde temperaturspænd.



Figur 5: Principskitse for seriel systemkonfiguration af tre varmepumpeenheder, der i forening afkøler varmekilden en overskudsvarmekilde fra 30 til 15°C (fordelt på 3 trin), samtidig med at de opvarmer fjernvarmevandet fra 45 til 80°C (ligeledes fordelt på 3 trin).

Fordelen ved at lave en seriel konfiguration er, at det samlede varmepumpesystem kan opnå en højere COP. Generelt afhænger COP-værdien for en varmepumpe af temperaturforskellen mellem fordampertemperaturen (energikilden) og kondenserings-temperaturen (varmeanftagersiden).

I en parallel konfiguration vil alle varmepumpeenheder opleve den samme fordampers- og kondenserings-temperatur, da alle maskiner har samme temperatursæt på kilde og varmeanftager.

For en seriel konfiguration, hvor både kilde og varmeanftager er forbundet i seriel, vil hver enkelt varmepumpe opleve en mindre temperaturforskel mellem fordampertemperatur og kondenserings-temperatur. Dette medfører, at den samlede COP for alle tre varmepumper bliver højere sammenlignet med en parallel konfiguration.

Når effektiviteten af det samlede system vurderes, skal der også tages højde for det pumpearbejde, der ydes i vandkredsene for både kilde og varmeanftager. Her vil en seriel systemkonfiguration have et større pumpearbejde end en parallel systemkonfiguration. Dette gør at forskellen i COP mellem de to løsninger bliver lidt mindre.

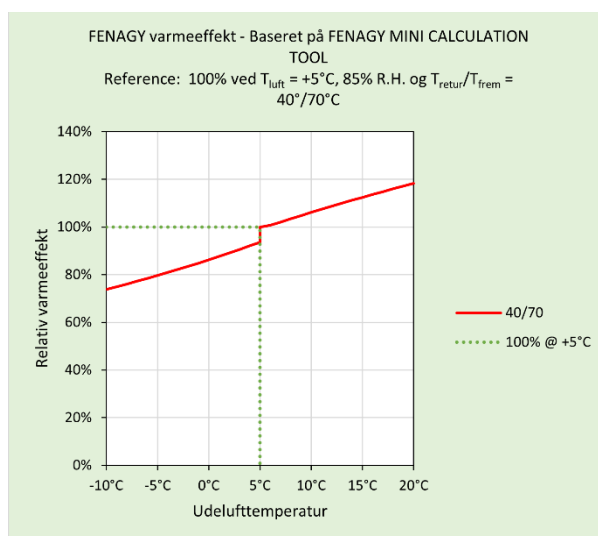
Forbedringen i COP, der kan opnås for en seriel konfiguration frem for en parallel konfiguration, bør undersøges fra case til case, da forbedringen, der kan opnås, er stærkt afhængig af de enkelte kompressors effektivitet og øvrige begrænsninger under de givne temperatur- og trykforhold.

For varmepumper der udnytter luft som varmekilde er der i sagens natur tale om en parallelt koblet varmekilde.

5 Varmeeffekt og eloptag

Den afgivet varmeeffekt fra en given specifik varmepumpe vil variere med temperaturniveauerne for både varmetafter og varmekilde. Variationen vil afhænge varmepumpeanlægget, da der kan være forskellige begrænsninger, som kommer i spil.

På Figur 6 er der vist et eksempel på hvordan varmeeffekt for en luft/vand-varmepumpe kan variere som funktion af udelufttemperaturen. Her ses det, at varmeeffekten fra varmepumpen kan variere med ca. $\pm 20\%$ ved ± 15 K temperaturvarians fra et udgangspunkt på $+5^\circ\text{C}$. Springet i varmeeffekt ved $+5^\circ\text{C}$ indikerer, at der under $+5^\circ\text{C}$ skal påregnes afrimning af varmepumpens fordampere i kølegården (også kaldet energioptagere). Grafen er baseret på udregninger med et beregningsværktøj fra Fenagy.



Figur 6 Eksempel på en varmepumpes afgivet varmeeffekt ved varierende udelufttemperatur. Grafen er baseret på et beregningsværktøj fra Fenagy for en varmepumpe med CO_2 som kølemiddel.

Den optagede eleffekt fra varmepumpeanlægget vil i nogen udstrækning følge ovenstående tendens som varmeeffekten. Dog vil den procentvise variation ikke være i samme størrelsesorden, da variationen i varmepumpens COP vil have en modsatrettet effekt.

Den nødvendige eleffekt, som skal tilsluttes, kan som overslag regnes som 45% af den dimensionerende varmeeffekt ved -1°C .

Både varmepumpens varmeeffekt og eloptag kan være begrænset af de valgte komponenter til systemet, og den variation vil derfor være specifik for det enkelte anlæg.

6 Udeluft som varmekilde

I dette kapitel introduceres udeluft som varmekilde for varmepumper til fjernvarmeproduktion.

Kapitlet angiver et prisestimat for en 5 MW varmepumpe, og præsenterer efterfølgende en række tekniske forhold for energioptagerne og kølegården.

6.1 Investering

Det kan være vanskeligt at give et generelt prisestimat for varmepumper, da en del poster i budgettet vil være projekt-specifikke. I nedenstående tabel er der givet et overslag for en 5 MW varmepumpe. De efterfølgende underafsnit redegør for antagelserne bag.

Pris estimat for 5 MW luft/vand-varmepumpe	
Varmepumpeanlæg med alle tilhørende komponenter inkl. installation og opstart	37,5 mio. DKK
Teknikbygning	7 mio. DKK
Eksterne forbindelser herunder: - Elkabel - Fjernvarmerør - SRO-opkobling	1 mio. DKK
Net-tilslutningsbidrag	4,4 mio. DKK
Grundkøb	0,63 mio. DKK
Sum for ovenstående	50,5 mio. DKK
Rådgivere	10 %
Uforudsete	10 %
Samlet sum	60 mio. DKK

6.1.1 Teknikbygning

Der er relativt stor variation på hvor mange kvadratmeter bygning, der er nødvendig pr. MW varmepumpe. En del af denne variation kan skyldes variation i footprintet for de enkelte varmepumpe teknologier, bygherres ønsker om plads til service og endelig hvorvidt bygningen har været opført i en entreprise for sig forud for varmepumpeentreprisen. Sidstnævnte mulighed skyldes ofte at der er lang sagsbehandlingstid på opførelse af bygninger, og at denne proces derfor med fordel kan opstartes før resten af varmepumpeprojektet. I disse tilfælde kan det vise sig svært at få opført bygningen med et passende antal kvadrater. Når der kigges på erfaringstal for etablerede projekter, skal man også være opmærksom på at en del projekter udføres i eksisterende byggeri. Her vil pladsen pr. MW ikke nødvendigvis afspejle det optimale antal kvadratmeter.

Det gennemsnitlige areal til teknikbygninger, fra projekter gennemført af PlanEnergi, er mellem 65 m² og 95 m² pr. MW varmepumpe.

Baseret på erfaringstal for PlanEnergis gennemførte projekter estimeres en kvadratmeterpris for teknikbygningen til 17.500 kr./m² (2024-pris).

Et prisestimat for en bygning til en 5 MW varmepumpe beregnes som 400 m² bygning.

6.1.2 Eksterne forbindelser

Varmepumpeanlægget har en række forbindelser ud fra bygningen, som normalvis behandles på projektspecifikt niveau. Som meget generelle overslagspriser kan følgende benyttes:

- 6.000 kr./meter fjernvarmeledning
- 1.000-1.500 kr./meter elkabel
- 100.000-500.000 kr. for integration i eksisterende SRO-anlæg.

For en 5 MW varmepumpe med 100 meter forbindelse ud fra bygningen, samt integration af SRO i et eksisterende værk, prisestimeres ovenstående til et samlet beløb på 1 mio. kr.

6.1.3 Tilslutningsbidrag

Tilslutningsbidraget til netselskabet afhænger af kundekategori og hvor meget effekt, der skal tilsluttes.

For 1 MW el kan tilslutningsbidraget opgøres til følgende med gældende takster fra Radiuselnet pr. 1. januar 2025.

Kundekategori	Tilsluttet strøm/effekt	Standard tilslutningsbidrag [kr.]
A-høj	1,053 MVA	736.842 kr.
A-Lav	1,053 MVA	1.347.368 kr.
B-høj	1.519 A	1.990.339 kr.
B-Lav	1.519 A	2.066.306 kr.
Erhverv C	1.519 A	2.157.467 kr.

Figur 7: Tilslutningsbidrag for 1 MW el for forskellige kundekategorier.

For tilslutning af en 5 MW varmepumpe estimeres 2,25 MW el med tilslutning på B-høj.

Som tommelfingerregel for kundekategorier kan det antages at:

- Mindre end 1 MW el: B-lav
- 1 MW-4 MW el: B-høj (usikkerhed på ±1 MW)
- 4 MW- ca. 20 MW el: A-lav
- Mere end 20 MW el: A-høj

Det er dog kun estimerer baseret på erfaringer fra gennemførte projekter. Det vil altid være det lokale netselskab, der anviser tilslutningspunkt og dermed kundekategori.

På trods af at tilslutningsbidraget falder jo højere op i elsystemet der tilsluttes, kommer dette også med en merinvestering for bygherre i form af ejerskab over transformere og kabler.

Ovenstående er baseret på den nuværende struktur for tilslutningsbidrag. I arbejdsplan 3 "Begrænsninger og muligheder i elnettet" for nærværende projekt, redegøres der for fremtidig udvikling af tilslutningsbidraget.

6.1.4 Grundkøb

Kvadratmeter-prisen for en grund til et varmepumpeanlæg afhænger selvfølgelig meget af lokationen, og det er derfor vanskeligt at give et præcist prisestimat for dette.

For luft/vand-varmepumper er der større arealkrav grundet den tilhørende kølegård. Baseret på PlanEnergis gennemførte projekter påregnes der ca. 350 m²/ MW varmepumpe, den første MW indregnes med 700 m².

For en 5 MW varmepumpe estimeres et samlet arealbehov på 2.100 m².

Med en kvadratmeter-pris på eksempelvis 300 kr./m² estimeres der en pris på 630.000 kr.

6.2 Energioptagere

For luft/vand-varmepumper omtales varmepumpens fordampere oftest som energioptagere. Disse energioptagere er grundlæggende ens uanset kølemiddel: Udeluften trækkes med ventilatorer gennem en vandret køleflade, bestående af rør med lameller ("kølefiner") på luftsiden. I mindre varmepumpeanlæg med begrænset plads er der nogle gange anvendt såkaldte V-kølere, hvor kølefladerne er parvist skrånstillede med ventilatorer i toppen. På Figur 8 ses en kølegård for energioptagere inkl. støjskærm. Til venstre for kølegården ses bygningen for den resterende del af varmepumpeanlægget.



Figur 8: Kølegård med tilhørende bygning for varmepumpeanlægget. Kilde: Viborg Varme a.m.b.a., Industrivej.

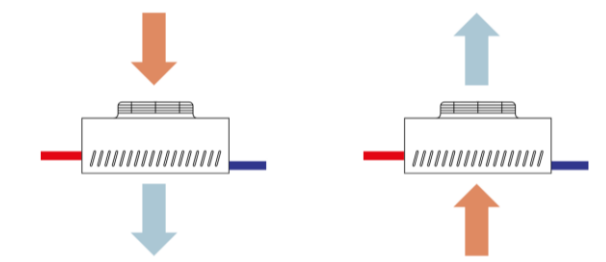
Varmepumpens kølemiddel fordampes som oftest direkte i rørene i energioptagerne. Der er dog eksempler på et par mindre anlæg, der er blevet etableret med en mellemkreds med f.eks. glykolvæske, der bliver pumpet gennem energioptagerne. Denne opbygning fører dog til både højere elforbrug til pumpearbejde og dårligere COP.

Ved drift nær og under frysepunktet vil der opbygges rim på luftsiden af energioptagerne, hvorfor der fra tid til anden skal foretages automatiske afrimninger af disse. Under afrimningen tages den pågældende energioptager ud af drift og varmes op med enten varmt kølemiddel direkte fra varmepumpen, eller med et indirekte system, baseret på varm glykolvæske opvarmet med fjernvarmevand ved retur-

temperaturen. Der er mange parametre, der påvirker energiforbruget til afrimning og den dermed relaterede reduktion af COP ifm. afrimning, og de forskellige aktører optimerer fortsat på dette.

6.2.1 Luftretning

Luftretningen gennem energioptagerne kan være både nedadgående og opadgående, som illustreret på Figur 9 til henholdsvis venstre og højre.



Figur 9: Luftretning gennem energioptager. Venstre: nedadgående. Højre: opadgående.

Blandt varmepumpeentreprenørerne på markedet findes både fortalere for den ene og den anden luftretning. En sammenligning af begge luftretninger præsenteres i nedenstående tabel. Indtil videre findes der ingen klar anbefaling på baggrund af erfaringer fra det danske marked. Dette hænger til dels også sammen med, at det er meget vanskeligt at måle effektiviteten af en kølegård. Energibalancen for den optagede effekt i kølegården måles ikke direkte, hvilket gør det udfordrende at vurdere effekten af forskellige tiltag.

Problemstilling	Nedadgående luftretning ↓	Opadgående luftretning ↑
Tendens til isdannelse på ventilator	Ventilatorer og gitre er mindre tilbøjelige til at isdanne sammenlignet med opadgående luftretning. Der kan dog opstå problemer ved kraftigt snefald.	Ventilatorer og gitre er mere udsatte for isdannelse på grund af den afkølede opadgående luftstrøm.
Luftcirkulation ved lav vindhastighed	Ved lav vindhastighed fremmer den nedadgående luftretning indtag af frisk luft, da den afkølede luft forbliver nede og ikke returnerer til ventilatorens indtag.	Opadgående luftstrøm kan medføre, at noget af den afkølede luft vender tilbage til ventilatorens indtag.
Luftcirkulation ved moderat/høj vind	Ved højere vindhastigheder bortføres den kolde luft af vinden, hvilket gør ydelsen sammenlignelig med opadgående luftstrøm.	Ydelsen er tilsvarende den ved nedadgående luftstrøm ved moderat til høj vindhastighed.

Kondensvandets afløb fra energioptageren	Kondensvand følger naturligt den nedadgående luftstrøm og bliver ikke hindret.	Kondensvand kan blive holdt tilbage af den opadgående luftstrøm.
Energi og effektivitet	Varmeafgivelsen fra ventilatorerne overføres til luften, som derefter blæses hen over fordamperne, hvilket muliggør effektiv overførsel til kølemidlet.	Varmeafgivelsen fra ventilatorerne forsvinder.
Isdannelse på jorden	Kan medføre isdannelse på jorden pga. nedadgående kold luft og kondensvand.	Mindre risiko for isdannelse på jorden, da afkølet luft ledes opad og væk fra overfladen.
Luftfordeling	Ujævn luftfordeling og lufthastighed gennem fordamperen. Dette ses især ved rimdannelse. Se Figur 10.	Rimdannelse kan ske som tynde is-plader på undersiden af fordamperen. Disse vil dog pga. tyngdekraften løbende falde ned. Se Figur 11.



Figur 10: Undersiden af en fordamper med nedadgående luftstrøm, som viser isdannelse langs kanterne og under ventilatoren. Dette er et tegn på en dårlig luftfordeling.



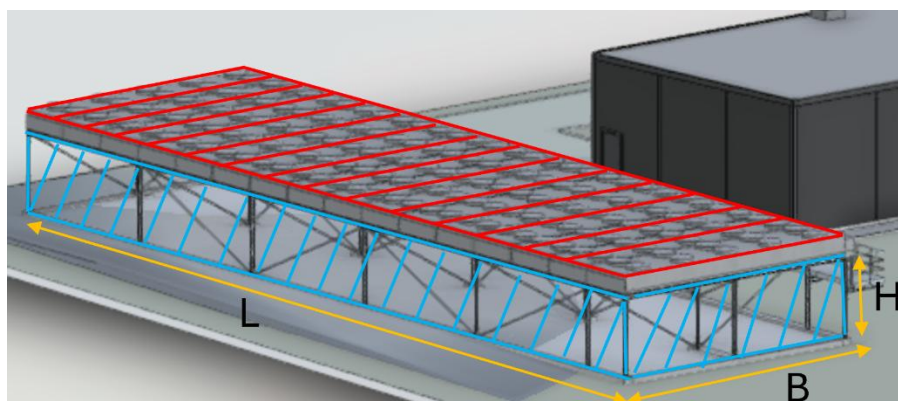
Figur 11: Undersiden af en fordampner med opadgående luftstrøm viser opbygning af isplader. Isen falder løbende ned ved hjælp af tyngdekraften.

6.3 Højden på kølegården

Højden på kølegården vil påvirke graden af recirkulation, der opstår. Recirkulation har en negativ indvirkning på varmepumpens effektivitet, da lufttemperaturen, der passerer gennem energioptagere, vil være lavere end udetemperaturen. En lavere lufttemperatur over energioptagerne medfører et lavere fordampningstryk, hvilket øger kompressorens elforbrug og dermed forringet COP.

En tommelfingerregel for fastsættelse af højden på kølegården formuleres således: Arealet langs alle sider af kølegården bør svare til 70 % af kølegårdens grundareal.

Eksempel:



Figur 12: Illustration af hvordan højden på en kølegård kan estimeres.

En kølegård har en bredde på $B = 12,2$ m og en længde på $L = 38,6$ m.

Kølegårdsareal, A skraveret med rød på Figur 12:

$$A = B * L = 12.2 * 38.6 = 470 \text{ m}^2$$

Den anbefalede højde:
$$H = \frac{0.7 * A}{2 * L + 2 * B} = \frac{0.7 * 470}{2 * 38.6 + 2 * 12.2} = 3,2 \text{ m}$$

6.4 Kondensvand

For alle luft/vand-varmepumper gælder det, at der opstår kondensvand (svarende til regnvand), når udeluften nedkøles. På store luft/vand-varmepumpeanlæg er kondensvandsmængden betydelig, og bortledningen af vandet kræver en del opmærksomhed. Der er mange måder at håndtere kondensvandet på:

- Naturlig nedsivning.
- Udledning til regnvandsledning eller spildevandsledning – kan være forbundet med store omkostninger.
- Udledning til å-løb eller lign.

For alle de ovenstående muligheder kan det være nødvendigt at kombinere disse med et forsinkelsesbassin, som kan reducere flowet til bestemmelsesstedet.

Da kondensvandet er kalkfrit, er der også set eksempler på anvendelse til spædevand for fjernvarmesystemer.

Hvis/når der skal søges udledningstilladelse til kondensvandet bliver der af kommunen ofte efterspurgt en analyse af hvilke stoffer kondensvandet indeholder. Af den årsag har PlanEnergi fået udarbejdet en analyserapport af kondensvand fra tre forskellige varmepumpeanlæg. Prøverne blev udtaget i en periode, hvor anlæggene producerede store mængder kondensvand, og hvor en højere grad af afsmitning fra energiotagerne derfor kunne forventes. Analysen viser, at koncentrationerne generelt ligger på niveau med, eller under, koncentrationerne set i overfladeafstrømning fra regnvand – med undtagelse af koncentrationer af Zn (zink) og Cu (kobber). Målingerne for Cu ligger dog betydeligt lavere end dem, der findes fra kobbertage, hvilket indikerer, at der ikke udledes væsentlige mængder Cu fra installationerne. For Zn ligger målingerne inden for det spænd, der kendes fra zinktag og tagrender.

7 Referencer

- Danish Energy Agency. (2023). *Technology Data - Generation of Electricity and District heating*.
- Dansk Fjernvarme. (2022). *Inspirationskatalog for store varmepumper*.
- Energistyrelsen og Grøn Energi. (2017). *Drejebog til store varmepumpeprojekter i fjernvarmesystemet*.
- Nielsen, C. A., Decorvet, R., & Mølbak, T. (2025). FIRST OPERATIONAL EXPERIENCE FROM A MEGA PROJECT IN ESBJERG, DK. *Hot|Cool, special collection, edition 1*, 15-19.

