

Højtemperaturvarmepumper til dekarbonisering af industriel procesvarme

En ny techno-økonomisk analyse sammenligner teknologier til grøn procesvarme i Europa og konkluderer, at højtemperaturvarmepumper giver den laveste varmepris i langt de fleste scenarier – også sammenlignet med hydrogen, biomasse og elkedler

Af Wiebke Brix Markussen, faglig leder, Center for Køle- og Varmepumpeteknik, Teknologisk Institut, og Thomas Enghave Olsen, marketingspecialist, Danvak

Industriell procesvarme udgør omkring 66 procent af det samlede energiforbrug i europæisk industri og er ansvarlig for cirka 20 procent af EU's samlede CO₂-udledninger. Over 80 procent af denne varme produceres fortsat ved afbrænding af fossile brændsler, primært naturgas. Trods årtiers klimapolitik er CO₂-udledningerne fra industriel procesvarme i Europa stort set uændrede siden 2000, og sektoren betragtes ofte som svær at omstille. Spørgsmålet om, hvilke teknologier der mest omkostningseffektivt kan erstatte fossil varme, er derfor afgørende – både for klimamålsætningerne og for industriens konkurrenceevne. En ny undersøgelse, publiceret i Cell Reports Sustainability af Markussen et al. (2025), bidrager med en systematisk techno-økonomisk analyse (TEA) af fire centrale teknologier til



Foto: Teknologisk Institut

En ny undersøgelse, publiceret i Cell Reports Sustainability af Markussen et al. (2025), bidrager med en systematisk techno-økonomisk analyse (TEA) af fire centrale teknologier til dekarbonisering af lav- og mellemtemperatur procesvarme (op til 150°C) under europæiske rammevilkår.

dekarbonisering af lav- og mellemtemperatur procesvarme (op til 150°C) under europæiske rammevilkår.

Metode og afgrænsning

Studiet anvender en top-down tilgang, hvor de samlede levetidsomkostninger for ▶

NATURLIG VARMEPUMPE

• op til +80 °C vand

- adaptiv ydelse
- +60 °C varmt vand ved luft -20 °C
- reversibel funktion køl og varme
- ned til -10 °C fremløb i kølfunktion
- integreret pumpestation og buffertank
- GWP 3
- EUROVENT certificeret

Tlf. +45 53500966 - info@groenkoeling - groenkoeling.dk



Populær kending i nye klæder

Termix VVX i nyt, funktionelt design





Termix VVX har længe været en bestseller takket være sin fleksibilitet og de mange nyttige kvaliteter. Og nu har vi givet den brugervenlige fjernvarmeunit med den intelligente Termix TPV-regulator en opgradering, der gør den endnu bedre – og endnu flottere.

Den redesignede Termix VVX har blandt andet aftagelig frontplade og ramme samt separat cover for ECL og målerdisplay. Funktionaliteten og brugervenligheden har tillige fået et løft i form af forbedret ledningsfastgørelse og -føring, ligesom vi har integreret en sekundær snavssamler i unitten.

Læs mere på termix.dk eller ring på 97 14 14 44

Termix VVX

Opdateret design med brugervenlige fordele:

-  Separat cover for ECL og målerdisplay
-  Aftagelig frontplade og ramme
-  Forbedret ledningsfastgørelse og -føring
-  Integreret sekundær snavssamler

Den redesignede Termix VVX med TPV-regulator passer direkte ved udskiftning af Termix VVX. Unitten overholder alle normkrav.



Aftagelig ramme giver nem adgang til komponenter



Foto: Teknologisk Institut.

Analysen viser, at højtemperaturvarmepumper i næsten alle scenarier opnår den laveste LCOH blandt de undersøgte teknologier. Hydrogenkedler er konsekvent den dyreste løsning.

► **Fortsat**

hver teknologi opgøres som levelized cost of heat (LCOH). LCOH beregnes på baggrund af investeringsomkostninger (CAPEX), drifts- og vedligeholdelsesomkostninger (OPEX), brændsels- eller elpris samt eventuelle omkostninger til varmekilde og lagring, fordelt over anlæggets levetid på 20 år.

Følgende teknologier indgår i sammenligningen:

- Højtemperaturvarmepumper (HTHP) – med og uden omkostning til varmekilde.
- Elkedler.
- Hydrogenkedler – baseret på grønt hydrogen fra elektrolyse.
- Biomassekedler.
- Naturgaskedler – som referenceteknologi, med og uden CO₂-afgift.

For varmepumper og elkedler er scenarier med termisk energilagring (TES) også undersøgt, hvor anlægget kan udnytte perioder med lave elpriser til at producere og lagre varme. For hydrogen er der, ud over et referencescenarie, også opstillet et best-case-scenarie med optimeret elektrolysedrift og antagelse om gratis og ubegrænset hydrogenlagring.

Analysen er primært gennemført for 2030, men inkluderer også fremskrivninger til 2050. Den antager en årlig industriel varmeefterspørgsel på 36.000 MWh, fordelt jævnt over enten 4000 eller 8000 driftstimer. Elpriser er varieret mellem 70 og 130 €/MWh, mens gas- og biomassepriser er fastsat til henholdsvis 39,3 og 43,6 €/MWh.

Varmepumpens ydelse er modelleret med en varmeaftagertemperatur på 150°C, en

varmekilde på 80°C (afkølet til 60°C) og en Lorenz-virkningsgrad på 0,5, hvilket resulterer i en COP på 2,8. Denne virkningsgrad er i overensstemmelse med data fra IEA HPT Annex 58 for varmepumper ved det relevante temperaturløft.

Resultater for 2030

Analysen viser, at højtemperaturvarmepumper i næsten alle scenarier opnår den laveste LCOH blandt de undersøgte teknologier. Hydrogenkedler er konsekvent den dyreste løsning.

Varmepumper med gratis varmekilde (for eksempel overskudsvarme fra industrielle processer) opnår en LCOH op til 40 procent lavere end naturgaskedler med CO₂-afgift, 30-60 procent lavere end hydrogenkedler og op til 37 procent lavere end biomassekedler. Selv varmepumper med en



Intervent A/S

“meget mere end installationer”

Ventilationsanlæg | Køleanlæg | Vvs-anlæg | Service på anlæg
www.intervent.dk | Tlf. 43 43 47 83 | intervent@intervent.dk

varmekildepris er konkurrencedygtige i størstedelen af de undersøgte scenarier. Elkedler nærmer sig varmepumpens økonomi ved lave elpriser, men overstiger den i de fleste tilfælde. Elkedlen opnår kun en lavere LCOH end varmepumpen med gratis varmekilde ved elpriser under cirka 12 €/MWh ved 8000 driftstimer.

Brændselsprisen er den dominerende omkostningskomponent for alle teknologier undtagen varmepumper og biomassekedler, hvor investeringsomkostningerne udgør en væsentlig andel – særligt ved lavere driftstimer.

Betydningen af termisk lagring

Når varmepumper eller elkedler kombineres med daglig termisk energilagring, kan driften forskydes til timer med lave elpriser. Det påvirker LCOH i varierende grad:

- Varmepumper opnår en LCOH-reduktion på 3-5 procent ved 8000 driftstimer og op til 11-15 procent ved 4000 driftstimer.
- Elkedler opnår de største besparelser: op til 27 procent ved høje elpriser og 4000 driftstimer.

For varmepumperne er termisk energilagring særlig værdifuld for anlæg med færre driftstimer.

Hydrogen: Fortsat ukonkurrencedygtigt

Selv i et best-case-scenarie, hvor elektrolysen kun kører i de timer på året med de billigste elpriser og hydrogenlagring samtidig antages gratis og ubegrænset, forbliver hydrogenkedlens LCOH højere end eler på niveau med varmepumper og elkedler med lagring. Ved en gennemsnitlig elpris på 130 €/MWh blev den optimale driftsandel for elektrolysen fundet til 24 procent af årets timer, med en resulterende hydrogenpris på 3,1 €/kg. Ved 70 €/MWh var den optimale driftsandel 32 procent og hydrogenprisen 2,2 €/kg.

Det skal desuden bemærkes, at beregningen af hydrogenprisen ikke inkluderer transport- eller distributionsomkostninger, som i praksis kan udgøre en væsentlig del af den samlede brændselspris. Prisen for investering i selve hydrogenkedlen er samtidig sat lig med prisen for en konventionel gaskedel, hvilket må anses for en optimistisk antagelse.

Perspektiver for 2050

I 2050-scenarierne antages lavere investeringsomkostninger for varmepumper, termisk lagring og elektrolyseanlæg samt

lidt højere virkningsgrader. For varmepumper øges Lorenz-virkningsgraden til 0,6, og investeringsomkostningen for en HTHP reduceres til niveauet for en nuværende standard, industriel varmepumpe til 80°C.

Under disse forudsætninger falder LCOH for varmepumper med 18-23 procent sammenlignet med 2030-scenarierne ved en elpris på 70 €/MWh. Den største reduktion ses for varmepumper med lagring og færre driftstimer. Hydrogenkedlens LCOH falder ligeledes med cirka 15 procent, men forbliver 2-3 gange højere end varmepumpens. Kun i best-case-scenariet med gratis hydrogenlagring og optimeret elektrolysedrift nærmer hydrogenkedlen sig LCOH-niveauet for varmepumper med varmekildepris.

Usikkerheder og begrænsninger

Som ved enhver TEA er resultaterne forbundet med usikkerheder. Investeringsomkostninger for nye teknologier som højtemperaturvarmepumper kan ændre sig i takt med, at markedet modnes. Elpriser er i sagens natur vanskelige at forudsige, som energiprisikrisen i 2022-2023 demonstrerede. Hydrogenpriser er særligt

klimatek

ventilationsmateriel



JALOUSISPJÆLD

Spjæld type JS-A fremhæver sig ved sin korte byggelængde på 125 mm. Temperaturområde fra -30°C til +100°C.

Spjæld type JS-A MICRO anvendes hvor der er krav om en meget lille byggedybde – eksempelvis montage på bagside af dør o.l. Meget kort byggelængde på 50 mm.

Spjæld type JS kan også fås med rund tilslutning i begge ender. Temperaturområde fra -50°C til +225°C.

Spjældene fremstilles i galvaniseret stål, rustfrit stål og aluminium.

Kort leveringstid!!

Se vores øvrige produkter på hjemmesiden eller ring og forhør nærmere.

JALOUSIRISTE

Vi leverer i alle faconer, dimensioner, materialer og farver – du bestemmer.

Vi leverer den rigtige løsning til den rigtige pris! Det være sig: Jalousiriste – Facaderiste – Hærværkssikrede riste – Sandfangsriste – Akustiske riste m.v.

Ristene fremstilles i materialerne: Søvandsbestandigt aluminium, ekstruderet aluminium, rustfrit stål, galvaniseret stål eller kobber.

Kort leveringstid!!

klimatek a-s
Fabriksvej 16, V. Lyby • 7800 Skive • Tlf. 97 53 63 22 • Fax 97 53 63 80
info@klimatek.dk • www.klimatek.dk

► Fortsat

usikre, da de afhænger af både elpriser, elektrolysens virkningsgrad og transport- og lagringsomkostninger. Studiet anvender forenklede antagelser om flade varmeprofiler og ideel lagringseffektivitet (ingen varmetab). Forskerne bemærker dog, at tidligere studier har vist, at varmetab fra termisk lagring ved temperaturer under 200°C

Politiske implikationer

Selv om de økonomiske resultater taler tydeligt for varmepumper, understreger undersøgelsen, at markedskræfterne alene næppe vil drive omstillingen hurtigt nok. Forskerne henviser til andres studier, der har identificeret flere barrierer som høje up-front investeringer, vidensmangel om nye teknologiers modenhed og integrationsmuligheder samt usikre rammevilkår.

går konsekvent hydrogenkedler og er i de fleste scenarier også billigere end elkedler og biomassekedler. Kombinationen af varmepumper med overskudsvarme og termisk lagring styrker yderligere den økonomiske fordel.

Hydrogen, trods stor politisk bevågenhed, fremstår som en væsentligt dyrere løsning – selv under de mest optimistiske forudsætninger. Resultaterne tyder på, at hydrogen til lav- og mellemtemperatur pro-



Foto: Teknologisk Institut, Bent Fagel Madsen

Studiet leverer et stærkt evidensbaseret argument for, at højtemperaturvarmepumper er den mest lovende og omkostningseffektive teknologi til dekarbonisering af lav- og mellemtemperatur industriel varme i Europa.

kun påvirker LCOH marginalt (op til cirka 3 procent). Ligeledes er elprisen afhængighed af industrikundens samlede forbrug ikke inddraget, hvilket kan have betydning for den faktiske pris i specifikke tilfælde.

Trods disse usikkerheder konkluderer forfatterne, at det overordnede billede er robust: Varmepumper giver den laveste LCOH for procesvarme op til mindst 150°C under europæiske vilkår.

Forfatterne anbefaler målrettede politiske virkemidler, herunder:

- Tilskud til termisk lagring og varmepumpeinvesteringer.
- Regulering, der fremmer udnyttelse af overskudsvarme og fleksibel drift.
- Pilotprogrammer og garanterede pris-mekanismer, der reducerer investeringsrisikoen.
- Udbygning af elnetinfrastruktur til industriel elektrificering.

Konklusion

Studiet leverer et stærkt evidensbaseret argument for, at højtemperaturvarmepumper er den mest lovende og omkostningseffektive teknologi til dekarbonisering af lav- og mellemtemperatur industriel varme i Europa. Teknologien over-

cesvarme snarere bør betragtes som en nicheløsning end et bredt alternativ til direkte elektrificering.

For virksomheder, der står over for investeringsbeslutninger, og for politiske beslutningstagere, der skal prioritere støtteinstrumenter og regulering, bidrager undersøgelsen med et klart og velunderbygget beslutningsgrundlag ■

Kilde:

Markussen, W.B., Rosenow, J., Christensen, M.H., Zühlsdorf, B. & Elmegaard, B. (2025). Techno-economic analysis of technologies for decarbonizing low- and medium-temperature industrial heat. Cell Reports Sustainability, 2, 100560.

Kursus:
Grundlæggende
køle- og
varmepumpe-
teknologi:

