



DynamicDemand - Hirtshals

Retrofitløsning til fleksibilitet i kølehuse



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Resume

Notatet beskriver et videnbroprojekt om intelligent styring af køleanlæg ved Hirtshals Stevedore. Hovedformålet er at undersøge potentialet for at implementere en retrofit-løsning, hvorved eksisterende styring og system kan opgraderes til at understøtte fleksibel drift og energioptimering. Kølehusets evne til at udnytte sin fleksibilitet forekommer ved at udnytte den termiske masse i bygningsdele og de indfrosne varer, hvorved køleeffekten kan optimeres i forhold til elpriser og nettariffer, og derved reducere driftsomkostninger. Historiske data fra det undersøgte køleanlæg viser en spredt men lineær sammenhæng mellem energiforbrug og udetemperatur, hvilket kan benyttes til fremtidige behovsprogner.

Baseret på historiske data og indsigt i systemet er potentialet for økonomiske gevinster analyseret. Der er undersøgt to scenarier: et med den nuværende, faste elpris og et med variabel elpris. Resultaterne viser, at der kan opnås besparelser ved at optimere driften, især efter 2025, når betingelserne for den faste elpris ændres. Desuden undersøger projektet mulighederne for om frysehuset har potentialet for at kunne levere systemydelse til elnettet, især aFRR. Dette kræver nogle tekniske tilpasninger i kølesystemet for at opfylde markedsbetingelserne og de tekniske krav.

Afslutningsvis fremhæver projektet vigtigheden af energieffektivisering gennem justeringer i temperaturstyring og vandforbrug, samt potentialet for at reducere mekanisk slid, hvilket kan forlænge anlæggets levetid og øge den økonomiske rentabilitet.

DynamicDemand - Hirtshals

Retrofitløsning til fleksibilitet i kølehuse



Udarbejdet af

Teknologisk Institut
Gregersensvej 1
2630 Taastrup
Grønne Energisystemer

Udarbejdet sammen med

Hirtshals Stevedore
H. Jespersen/PL Service ApS
Greenport North
Port of Hirtshals

Forsidebillede:

Skråfoto 2023, Dataforsyningen.dk

Januar 2025

1. Indledning og formål

Som led i den grønne omstilling gennemgår det danske elsystem en stor transformation grundet øget elektrificering og større andel af vedvarende energi. For at sikre et stabilt elnet med høj forsyningssikkerhed bør flere aktører forbruge energi fleksibelt. For de enkelte virksomheder kan dette betyde en optimering af driftsøkonomi og at de bidrager til den grønne omstilling. Mange virksomheder står dog over for udfordringer med ældre styringssystemer, som begrænser mulighederne for fleksibel drift og energibesparelser. Mange virksomheder har potentialet for fleksibel styring, men mangler de nødvendige systemer til automatisk at håndtere fleksibilitetssignaler og integrere dem i driftsstrategien. Den nuværende styring kan ikke integrere moderne strategier, der reagerer på elpriser, hvilket fører til traditionel drift uden hensyntagen til markedsbetingelserne. For at udnytte potentialet for fleksibelt energiforbrug kræves systemindsigt og adgang til fleksibel styring, der muliggør tilpasning af forbruget i forhold til de svingende elpriser.

Formålet med dette notat er at beskrive potentialet for intelligent styring af køleanlæg i frysehus praksisnært ved at anvende Hirtshals Stevedore (herefter Stevedore) som case. Projektet fokuserer på at identificere mulighederne for en retrofit-løsning, hvor den eksisterende styring kan opgraderes til at understøtte en mere intelligent styring. Dette skal medvirke til at forbedre driftsfleksibiliteten, optimere energiforbruget og reducere både omkostninger og CO₂-aftryk. Projektet søger at definere en implementerbar løsning for intelligent styring, der muliggør fleksibel drift af anlægget i fremtiden.

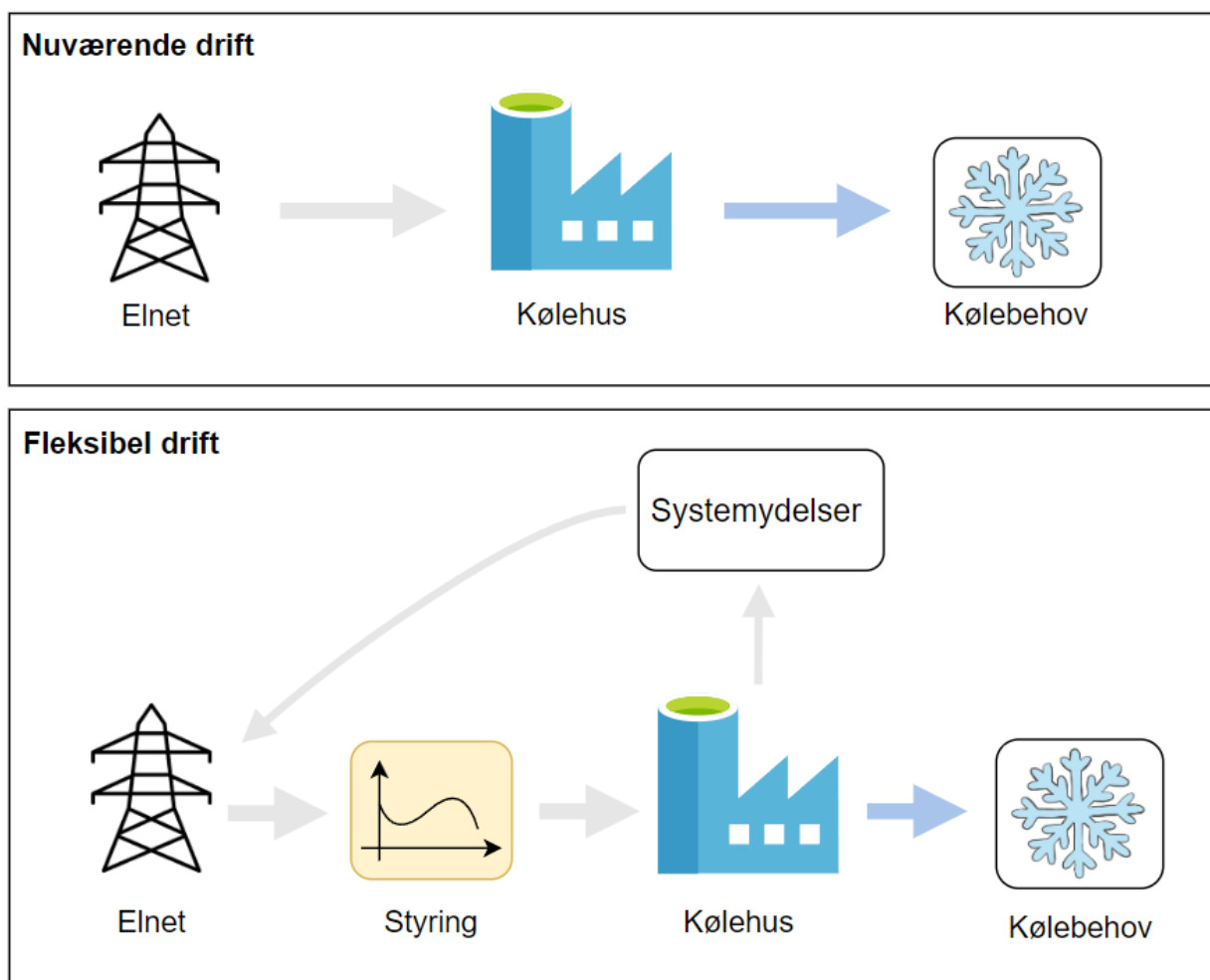
Projektets udførsel er støttet af Energy Cluster Denmark som videnbroprojekt.

2. Frysehuses potentiale til at tilbyde fleksibilitet

Frysehuses primære formål er at opbevare letfordærlige varer under kontrollerede temperaturforhold for at sikre deres holdbarhed og kvalitet. Dette sikres ved, at temperaturen altid skal holdes under $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ vha. kølesystemer, som regulerer temperaturen. Disse systemer kan omfatte kompressorer, fordampere og kondensatorer sammen med kølemidler som f.eks. ammoniak.

Eftersom nogle frysehusene har en stor termisk masse i de indefrosne varer, så er systemet relativt trægt overfor ændringer, hvilket betyder, at temperaturen i rummene ikke vil falde markant, hvis kølingen udsættes i en kortere eller længere periode. Ved at udnytte denne træghed, er der mulighed for at opnå besparelser i driftsudgifter til el, hvis køleprocessen optimeres efter, hvornår det er mest rentabelt at køle med anlægget. Foruden direkte driftsbesparelser for kølehuset, kan der også være potentiale i at byde sit kølesystem ind i markedet for systemydelser, og dermed potentielt opnå yderligere besparelser herigennem. Dette er uddybet i kapitel 5.

Figur 1 illustrerer forskellen mellem den nuværende drift, hvor formålet er at levere køl, og en fremtidig, fleksibel drift, hvor det primære formål stadig er at levere køl, men systemet driftes mere intelligent vha. styring, ud fra parametre som elpris, tariffer, udetemperatur mv., og med en potentiel mulighed for at levere systemydelser, hvis køleanlægget er kompatibelt med kravene hertil.

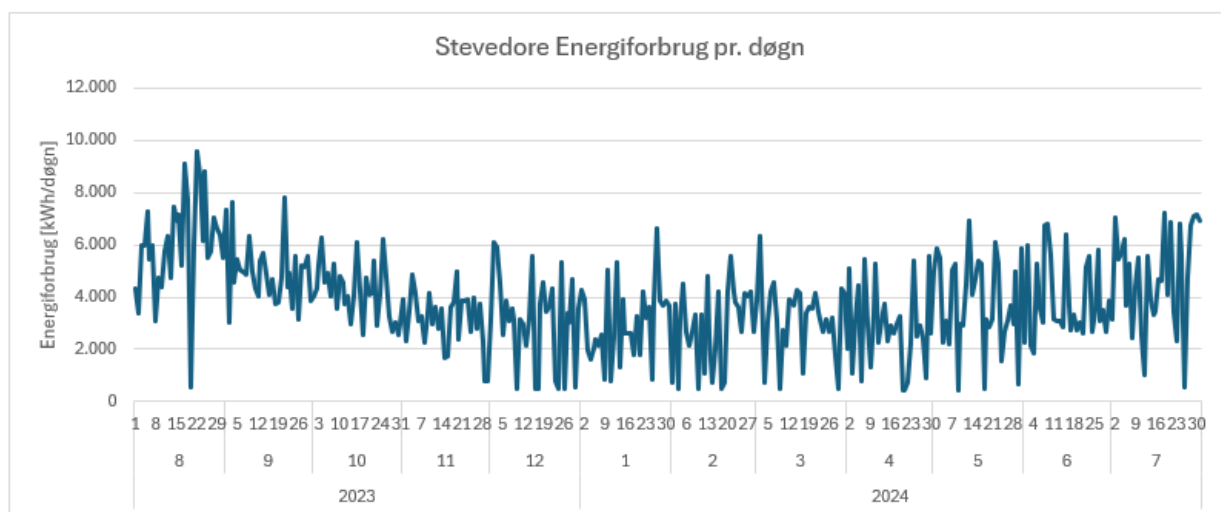


Figur 1: Illustration af kølesystemet i drift med og uden intelligent styring.

3. Case-baseret fleksibilitetspotentiale

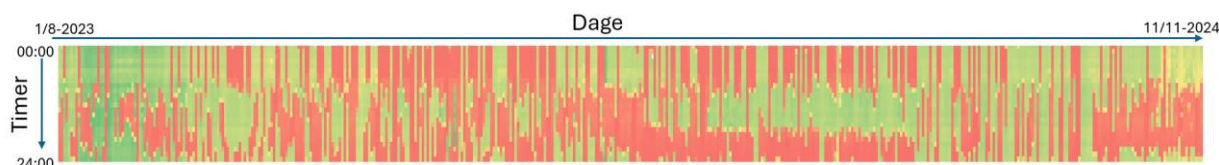
Stevedore driver store køle- og frostlagre på Hirtshals Havn til både vareoplagring og godstransit af køle- og frostvarer. På en af deres lokationer findes lager kun til frost, hvor det tilknyttede køleanlæg består af et ammoniaksystem, inkluderende to kompressorer, pumper, fordampere mv. Kompressorerne har hver en nominel elektrisk effekt på ca. 300 kW. Køleeffekten fra den ene kompressor justeres med en glider, der mekanisk ændrer på kompressorens trykbidrag. Den anden kompressor har en tilsvarende glider, men reguleres gennem en frekvensomformer, hvor køleeffekten justeres via denne og opnår en bedre mekanisk udnyttelse. Anlæggene opererer i et temperaturspænd på -18 til -25, °C, for at overholde gældende fødevarerlovgivning. Køleanlægget starter derfor, når temperaturen nærmer sig -18 °C, og køler indtil lagertemperaturen når ca. -22 °C.

Som grundlag for at identificere fleksibilitetspotentialet, anvendes historiske data i perioden 1/8-2023-31/7-2024. 1/8-2023 vælges som startpunkt for at sikre, at driftsdataene afspejler en tilstrækkelig stabil driftsperiode for frostlageret. Stevedore har i denne periode et elforbrug til køl på ca. 1.400 MWh/år. Elforbruget til køling i den undersøgte periode er illustreret i Figur 2.



Figur 2: Energiforbrug pr. døgn til køleanlæg i perioden 1/8-23 til 31/7-24.

De seneste års udvikling i elprisen har skabt opmærksomhed på de økonomiske konsekvenser af at drifte store elforbrugende enheder uden hensyntagen til elprisen. Dette gør sig tilsvarende gældende for frysehuset, der manuelt har flyttet på forbruget for at kompensere for udsving i priserne. Visualiseringen i Figur 3 viser mønsteret i forbruget fra 1/8-2023 til 11/11-2024.

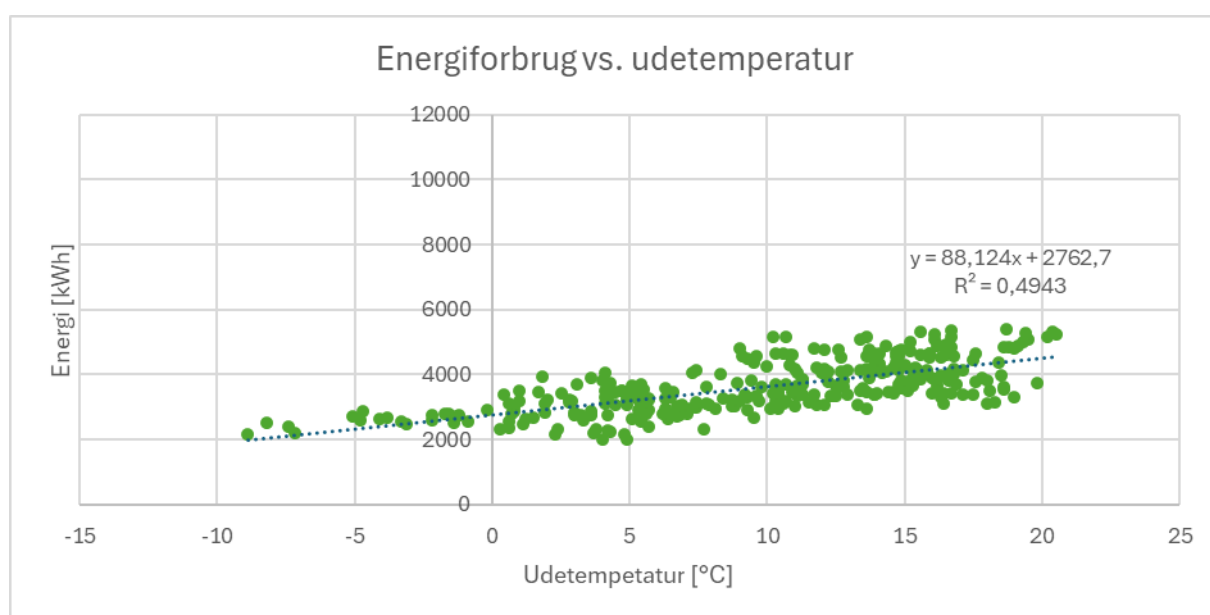


Figur 3: Heatmap for energiforbrug pr. time pr. dag for kølesystemet. Grøn angiver højt energiforbrug mens rød angiver lavt energiforbrug

På figuren ses et skifte fra en tilfældig til en mere systematisk driftsprofil, hvor der slutningen af perioden konsekvent undgås køling i dagtimerne. Skiftet skyldes opmærksomhed på elpriserne samt overgangen til inddelte nettatariffer. Ved at kunne flytte kølebehovet uden for timerne med høje tariffer, opnås

økonomiske driftsbesparelser. Udover besparelserne, giver den seneste driftsperiode en eftervist indsigt i fleksibilitetspotentialet, da systemet allerede har været anvendt fleksibelt med respekt for temperaturgrænsebetingelserne.

Kortlægning af energibehovet er essentiel til automatisk at kunne drifte systemet fleksibelt. Anvendes virkelige driftsdata for energiforbruget i en tilstrækkelig opløsning, kan anvendelsesmønstret vise hvilken drift, der kan tilfredsstille grænsebetingelser, så som temperaturgrænser i frysehuset. Samtidig giver det en indikation af udnyttelsesgraden af den installerede kølekapacitet. Koblingen mellem de virkelige driftsdata og udetemperaturer kan danne den nødvendige kortlægning systemets energibehov til en given temperatur. Systemet forventes at have en stigning i energibehov som konsekvens af en stigende udetemperatur. På Figur 4 ses sammenhængen mellem udetemperatur og energiforbruget til køling i systemet.



Figur 4: Sammenhæng mellem udetemperatur og energiforbrug til køling.

Der ses en lineær sammenhæng mellem energiforbrug til køling og udetemperatur, hvilket betyder, at systemet påvirkes af udetemperaturen, hvorved behovet for køling stiger, når udetemperaturen stiger. Der forekommer en spredning på grafen, der sandsynligvis skyldes mønstret for varer, der transporteres ind og ud af frysehuset, ændringer i drift for køleanlægget, driftsstop mm. Spredningen forventes at kunne mindskes ved kontinuerlig drift i en længere periode. Integreres sammenhængen i en intelligent styring, kan den anvendes sammen med fremskrivninger af udetemperaturen, som grundlæggende forventning til kølebehov for de følgende driftsdøgn.

4. Karakterisering af mulige driftsbesparelser ved fleksibel drift

De potentielle driftsbesparelser er undersøgt i to driftsscenarier ift. den nuværende drift (reference). I referencen er kølebehovet baseret på sammenhængen mellem udetemperatur og effektforbrug som angivet i Figur 4 og er afregnet efter en fast elpris samt tariffer til netselskabet og Energinet. Stevedore har i dag en fast elpris, som ligger under gennemsnitsprisen på el i 2023, og har denne indtil udgangen af 2025, hvorefter prisen forventes at være nærmere gennemsnitselprisen. Referencen anvendes til sammenligningsgrundlag for at kunne klarlægge, om alternativerne vil medføre en ændring i driftsomkostninger.

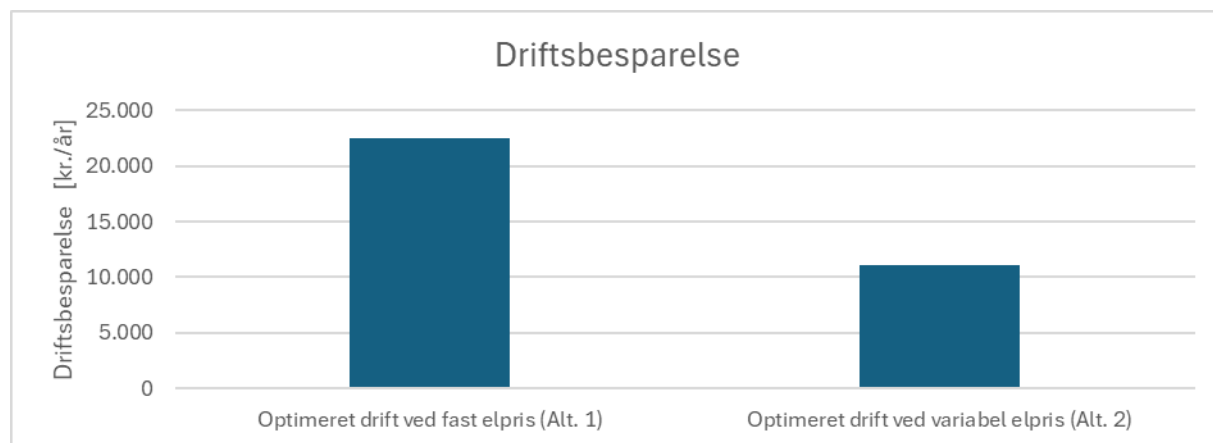
Fleksibilitetspotentialer for Stevedore undersøges for to driftsscenarier: Alternativ 1 og Alternativ 2.

I Alternativ 1 (Alt. 1) undersøges effekten ved optimalt at forskyde køleanlæggets drift med udnyttelse af den termiske masse, mens øvrige faktorer som tariffer og elpris forbliver uændrede i forhold til referencen. I Alternativ 2 (Alt. 2) anvendes metodikken som Alt. 1, men med variable elpriser (elspot) i stedet for faste elpriser. Beregningerne er foretaget som marginalberegninger i driftsudgifter for alternativerne ift. driftsudgifter i referencen. Der er ikke medtaget udgifter til drift og vedligehold for anlæggene, diverse udgifter til forsyningselskabet og Energinet som f.eks. abonnementer og gebyrer. Derudover er det kun energi direkte relateret til køling, som er undersøgt: der er dermed ikke undersøgt mulige optimeringer i elforbrug til f.eks. lys, porte, mv.

De undersøgte scenarier er dermed:

Reference	Nuværende drift baseret på historiske data + fast elpris
Alternativ 1	Optimering af drift + fast elpris
Alternativ 2	Optimering af drift + varierende elpris (elspot-afregning)

Resultatet for de marginale driftsbesparelser for alternativerne ift. referencen er præsenteret i Figur 5.



Figur 5: Marginale driftsbesparelser for Alt. 1 og Alt. 2 ift. reference.

Havde driften af anlægget været optimeret efter tariffer (og elpris i Alt. 2), så ville det have medført en besparelse på mellem ca. 22.000 kr. for Alt. 1 og ca. 11.000 kr. i Alt. 2 i den undersøgte periode. Derudover fortæller resultatet, at valget om en fastpris på elektricitet ift. en variabel elpris, har været en fordel for Stevedore, da den gennemsnitlige elpris på elspot i den undersøgte periode er højere end den faste

elpris. Årsagen til, at besparelsen ved fleksible drift (Alt. 2) er relativt lav, skyldes primært, at operatøren af køleanlægget manuelt har forsøgt at optimere driften af kølesystemet i referenceperioden, hvilket dermed indgår i datagrundlaget i beregningerne.

4.1. Følsomhedsberegning med fremtidig elpris

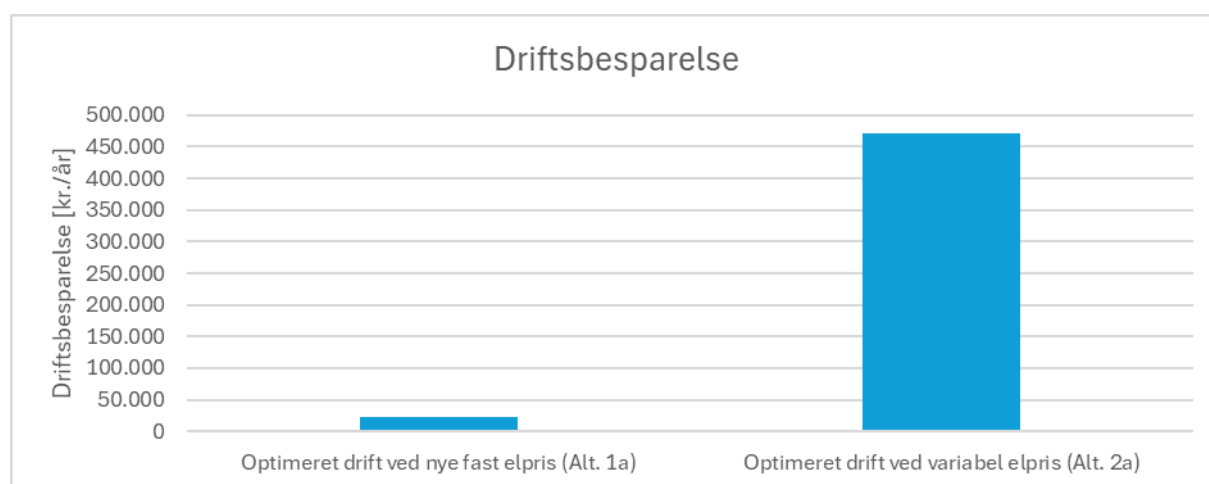
Den forestående stigning i den faste elpris har en indvirkning på de fremtidige driftsomkostninger. Der udføres derfor en følsomhedsberegning for at undersøge, om udnyttelsen af den termiske masse til at drive systemet mere fleksibelt er mere rentabelt ved hhv. den nye, faste elpris og variabel elpris.

Alle ydre forudsætninger fastholdt som i de første beregninger, for at kunne sammenligne driften, hvorved:

- energiforbrug er uændret.
- udetemperaturer er uændrede.
- timetariffer er svarende til B-lav i 1/8-2023 til 1/8-2024 jf. Nord Energi Nets tariffer.
- Elspotpriser

Følgende scenarier er medregnet for at kunne beregne den marginale driftsbesparelse ved en fremtidig, højere elpris:

Reference	Som forrige reference dog med højere fast elpris.
Alternativ 1a	Optimering af drift + højere fast elpris
Alternativ 2a	Optimering af drift + varierende elpris (elspot-afregning)



Figur 6: Marginale driftsbesparelser for Alt. 1a og Alt. 2a ift. referencedrift med ny, fast elpris.

Resultatet af de potentielle marginalbesparelser i følsomhedsberegningerne er vist i Figur 6. Her ses det, at hvis Stevedore fortsætter med fastprisaftalen, vil besparelsen igen være ca. 22.000 kr./år. Årsagen til, at driftsbesparelsen er den samme, som i beregningerne i Figur 5 er, at tarifudgifterne pr. time er ens, hvormed det kun er udgifter til el, som er højere i den nye beregning. Under forudsætning af, at elspotpriserne i fremtiden er magen til de i beregningerne anvendte priser, så ville en optimeret drift af køleanlægget ift. elspotpriser kunne resultere i en marginal driftsbesparelse på ca. 470.000 kr./år ift. referencen med fastpris.

5. Kølehuse som leverandører af systemydelser til frekvensmarkedet

I elnettet er balancering af produktion og forbrug afgørende for at sikre et stabilt og sikkert elnet. Når der opstår en ubalance i elnettet, kan det skyldes enten for meget eller for lidt strømproduktion i forhold til forbruget. Denne ubalance påvirker netfrekvensen, og det kan få alvorlige konsekvenser, hvis den ikke holdes stabilt i nærheden af 50 Hz. Som ansvarlig for transmissionssystemet i Danmark er Energinet pålagt at sikre, at balancen mellem produktion og forbrug altid er opretholdt. For at sikre dette, indkøber Energinet en række ydelser, som modvirker ubalancen og sikrer elforsyningsikkerheden. Disse ydelser kaldes systemydelser. For virksomheder som forbruger strøm fra elnettet, kan systemydelseerne dermed betyde, at de kan tilbyde at drifte deres anlæg fleksibelt ud fra behovet i det overordnede elnet, og dermed skabe indtægt på at gøre systemets drift tilgængelig for Energinet.

Danmark er opdelt i to prisområder svarende til to synkronområder. Vestdanmark hører til DK1, mens Østdanmark hører til DK2. Eftersom Hirtshals er i DK1, fokuseres der i notatet på systemydelser i dette område.

I DK1 er der overordnet set tre forskellige ydelser, som Energinet kan indkøbe:

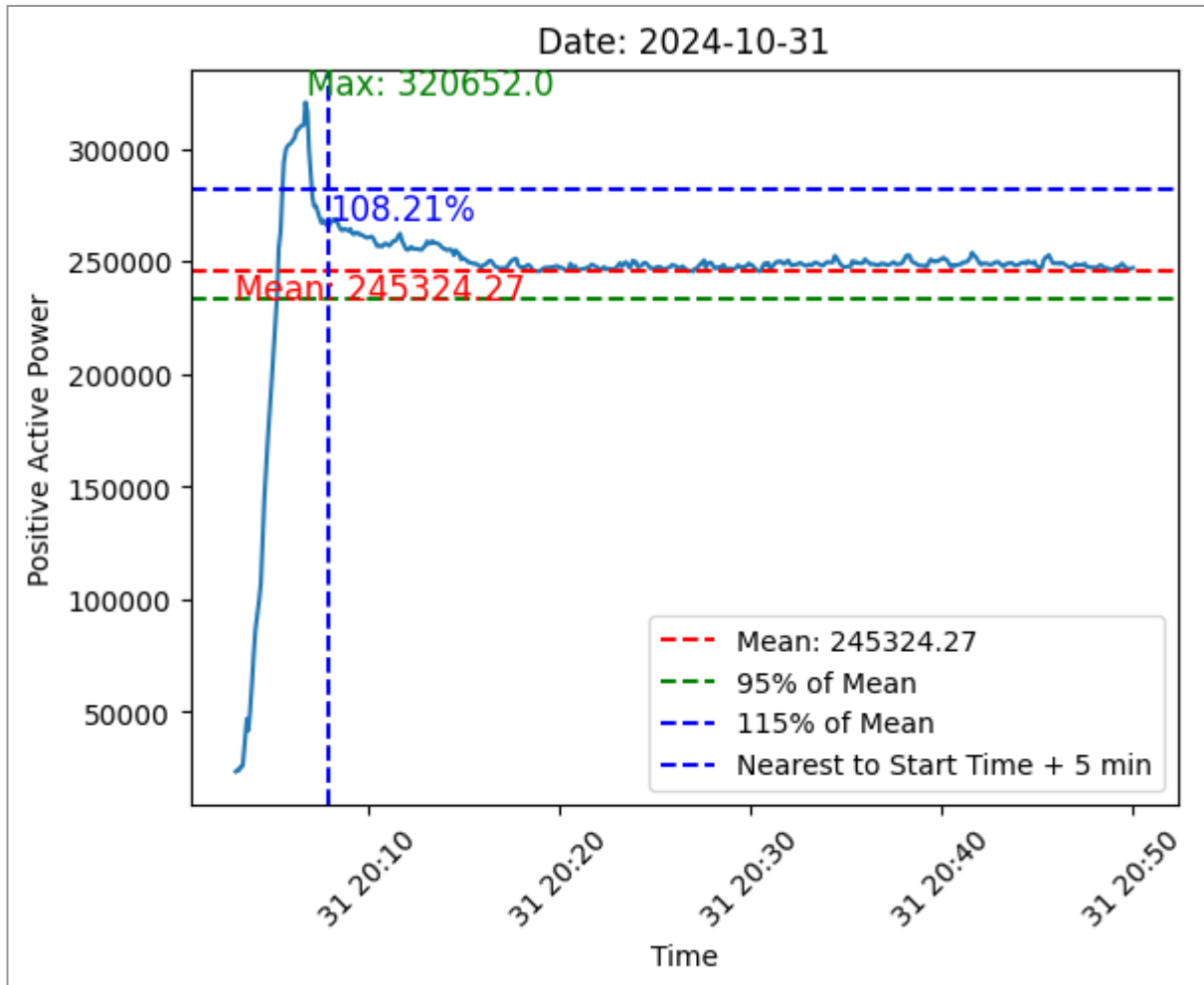
1. FCR: frequency containment reserve, som er den hurtigste reserve.
2. aFRR: automatisk frekvens reserve, som overtager efter FCR.
3. mFRR: manuel frekvens reserve, som overtager efter aFRR.

Hver af systemydelseerne har specifikke krav til teknisk opsætning, responstid, minimum leveringstid, budstørrelse mv., som betyder, at alle anlæg ikke nødvendigvis kan byde ind på alle systemydelser. Ift. FCR er der krav om symmetri i produktet (op- og nedregulering), hvilket ikke er kompatibelt med køleanlæggene. Derudover er der krav om hurtig responstid, hvilket anlægget ved Stevedore ikke kan tilfredsstille. Derfor fokuserer dette notat fremadrettet på muligheden for aFRR og evt. mFRR.

For at kunne levere systemydelser på aFRR, skal anlægget kunne levere ydelsen (op- eller nedregulering af effektforbrug afhængigt af ydelsen) inden for 5 minutter fra modtagelse af aktiveringssignal fra Energinet. Budstørrelsen er minimum 1 MW, dog kan mindre anlæg puljes med andre anlæg af en balance ansvarlig, og dermed bydes ind samlet og komme op på minimum 1 MW. For at blive godkendt til aFRR skal anlægget gennemføre en prækvalificeringstest, for at eftervise at kunne efterleve kravet til responstid og leveringstid.

5.1. Målinger på fysisk system

Baseret på data og viden indsamlet gennem projektet, kan systemdynamikken på kølekompressoren kortlægges. Det ses af Figur 7, at steady state for køleanlægget kan opnås inden for 5 minutter. For at overholde kravene for aFRR leverancer, må effekten maksimalt afvige -5% til +15 % af setpunktet. I den nuværende konfiguration af systemet kan dette ikke overholdes, hvilket ses i Figur 7.



Figur 7: Elektriske dynamik ved opstart af kølesystem.

Ved at ændre på indstillingerne for frekvensomformereren og dermed begrænse effekttrækket, som kan tillades under opstart, kan anlægget sandsynligvis efterleve kravene. Da systemydelse på aFRR skal aktiveres automatisk på baggrund af et signal sendt af Energinet, er der behov for tilpasning af styresystemet. Yderligere kortlægning og behandling af dette er dog ikke inkluderet i nærværende projekt.

6. Afledte indsigter i systemet

I løbet af projektet er der opnået væsentlige indsigter i kølesystemet ved Stevedore, hvilket har resulteret i identifikation af flere mulige optimeringsparametre, der kan resultere driftsbesparelser selv ved mindre justeringer. Disse ændringer fokuserer primært på energieffektivisering og forbedring af systemets drift.

En af de centrale indsigter handler om energieffektivisering i relation til temperatur og vandforbrug. Ved at kunne variere temperaturen i køletårnet i forhold til udetemperaturen kan man opnå et lavere effekttræk på køleanlægget, hvilket resulterer i reduceret energiforbrug. Dette skyldes, at køleanlægget arbejder mere effektivt, når dets kondenseringstemperatur er tættere på den omgivende lufttemperatur; dvs. så lav som praktisk muligt. Derudover kan optimering af vandforbrug i køleprocesserne også bidrage til energieffektivisering. Ved at genbruge kondensvand eller optimere kølevandskredsløb kan man reducere den samlede mængde vand, der kræves, hvilket både sparer energi og ressourcer.

Vandkvaliteten observeres løbende for at sikre, at der ikke forekommer aflejringer fra anlægget i vandet, samt at det kemiske indhold ikke overstiger grænseværdier. Hvis vandet har været stillestående i en længere periode, og ikke er nået at blive opblandet med nyt vand ved opstart, kan det medføre en unødigt udledning af vand. Det kan potentielt mindskes, ved at indføre en forsinkelse på vandkvalitetsmålingen, så målingen foretages efter en kortere driftsperiode og vandet dermed er opblandet, og kvaliteten dermed mere retvisende.

En anden central indsigt vedrører potentialet for at anvende frekvensomformerer til at mindske spidsbelastningen i systemet. Ved at sikre en fladere rampe ved start og stop af kompressorerne forventes et mindsket slid på systemet, hvilket kan forlænge levetiden for hele anlægget. Mindre mekanisk stress betyder også færre vedligeholdelsesomkostninger og mindre risiko for nedetid, hvilket er kritisk i et frysehus, hvor driftssikkerhed er essentiel.

7. Konklusion

Projektet omkring intelligent styring af køleanlæg i frysehuse har fremhævet muligheder for at forbedre driftsfleksibiliteten og reducere energiforbruget. Projektet har vist, at der er potentiale for økonomiske besparelser gennem en mere fleksibel drift af køleanlæggene ved Stevedore, hvor parametre som udetemperatur, temperatur i kølerummene, spotpris og tariffer bør indgå i styringen.

Selvom de umiddelbare besparelser ved at skifte fra en fast elpris til en variabel elpris i den nuværende kontekst er begrænsede, forventes en væsentlig stigning i potentialet for besparelser, når elprisen for virksomheden stiger efter 2025. I dette scenarie kan en optimeret drift efter elspotpriser og tariffer resultere i betydelige besparelser afhængigt af udviklingen i fremtidens elpriser. Ydermere har projektet identificeret, at disse køleanlæg potentielt kan deltage i leveringen af systemydelser til elnettet, særligt aFRR, forudsat at visse tekniske tilpasninger foretages. Dette kan åbne for nye indtægtsmuligheder i fremtiden.

Afledte indsigter fra projektet understreger vigtigheden af energieffektivisering gennem temperaturstyring og vandforbrug samt potentialet for at reducere mekanisk slid og muliggøre leverance af systemydelser til Energinet ved brug af frekvensomformere. Disse justeringer kan ikke kun medføre yderligere besparelser, men også potentielt forlænge anlæggets levetid.

8. Outlook

For at kunne tilbyde sin fleksibilitet ind på aFRR-markedet, kan virksomheden kontakte balanceansvarlige mhp. At kunne indgå i en eksisterende portefølje af lignende driftsprofiler, eller danne en af frysehuse i DK1, for at kunne opfylde kravet om minimumbudstørrelse på 1 MW på aFRR-markedet. Fordelen ved at gå sammen med andre frysehuse er, at systemdynamikken ofte er sammenlignelig og at bud og betaling for leveret fleksibilitet til aFRR er mere retfærdig. Ved dannelse af en portefølje bør frysehuse tilslutte sig en balanceansvarlig, som kan håndtere koordinering af samlingen af anlæg og sikre, at de opfylder de tekniske og operationelle krav for deltagelse i markedet.

Derudover er anbefalingen at uddybe mulighederne i energioptimeringspotentialerne, som kan give her og nu gevinster med minimale indsats. Dette indebærer at undersøge de tekniske muligheder for justering af temperaturen i køletårnet til at følge udetemperaturen, samt potentielle ændringer i aggressivitet af vandet. Yderligere at indføre en træghed i styringen på vandkvalitetsmålekredsen, for derved at sikre opblanding og potentielt mindske unødigt udledning af vand. Dette bør gennemføres med leverandøren af vandbehandlingsanlægget for at sikre mod korrosion.

På længere sigt kan Stevedore genbesøge vurderingen om et skifte til variabel pris er mere konkurrencedygtig ift. fast pris ved fleksible styring. Derudover er anbefalingen, at de vurderer styresystemets restlevetid ift. investering i nyt styringssystem.



**TEKNOLOGISK
INSTITUT**