



UiT Norges arktiske universitet

Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi – master Integrert Bygningsteknologi

LCC-analyse for varmepumpeanlegg

Jostein Karlsen Hjertnes

Masteroppgave i Integrert Bygningsteknologi, BYG-3900, mai 2021

MASTEROPPGAVE

for

Jostein Karlsen Hjertnes

(Studentnummer 167076)

Vår 2021

LCC-analyse av varmepumpeanlegg

(LCC analysis of heat pump systems)

Bakgrunn

Det er anslått at bygg i Norge utgjør ca 40 % av energibruken i Norge. Av den grunn har det blitt innført politiske og forskriftsmessige krav, som stiller strengere krav til energieffektive løsninger i bygninger. Det prioriteres derfor store ressurser i byggebransjen for å tilrettelegg for energieffektive løsninger i bygninger. Som følge av dette, har varmepumpemarked i Norge hatt en økende vekst i antall installerte varmepumper. Ulike varmepumpe-løsninger representere ulike fordeler og ulemper, avhengig av bygningstype og klimasted. Det er derfor av interesse å undersøke hvilke varmepumpe løsninger som er kostnadseffektive med hensyn til klimasted.

Oppgave

Oppgaven skal presentere livssyklus-kostnader (LCC), for to ulike varmepumpe løsninger. Oppgaven skal vurdere hvilken varmepumpe-løsning, som er best økonomisk egnet i Sør-Norge - vestkyst klima.

Oppgaven skal primært omfatte to ulike løsninger for varmepumpe:

- Væske til vann varmepumpe
- Luft til vann varmepumpe

Begrensning av oppgaven:

Ingen spesielle.

Arbeidet skal omfatte (men ikke nødvendigvis avgrenses til):

1. Innledende arbeid/litteraturstudium med avgrensninger og definisjoner.
2. Analyse av suksesskriterier for å lykkes med luft som varmekilde mht. avriming, støy, korrosjon, vær og vind.
3. Kartlegging av service- og vedlikeholdsbehov i ulike VP-installasjoner.
4. Økonomisk analyse, LCC beregninger, inkludert service og vedlikehold.
5. Case studie:

- Forprosjekt med to alternativer (teoretisk studie)
 - Flerbrukshall (Jondal)
6. Hva er oppgavens faglige og samfunnsmessige relevans? Har oppgaven relevans i forhold til FNs bærekraftsmål.
 7. Det skal utarbeides en engelskspråklig vitenskapelig artikkel/paper basert på besvarelsen, maks 10 sider. (Artikkelen kan sees på som er kortversjon av hele besvarelsen.)

Samarbeidspartner

Oppgaven gjennomføres i samarbeid med Norconsult AS

Generelt

Senest 14 dager etter at oppgaveteksten er utlevert skal resultatene fra det innledende arbeid være ferdigstilt og levert i form av en forstudierapport. Forstudierapporten skal godkjennes av veileder før kandidaten har anledning til å fortsette på resten av hovedoppgaven. Det innledende arbeid skal være en naturlig forberedelse og klargjøring av det videre arbeid i hovedoppgaven og skal inneholde:

- Generell analyse av oppgavens problemstillinger.
- Definisjon i forhold til begrensinger og omfang av oppgaven.
- Klargjøring/beskrivelse av de arbeidsoppgaver som må gjennomføres for løsning av oppgaven med definisjoner av arbeidsoppgavens innhold og omfang.
- En tidsplan for framdriften av prosjektet.

Sluttrapporten skal være vitenskapelig oppbygget med tanke på litteraturstudie, arbeidsmetodikk, kildehenvisninger etc. Alle beregninger og valgte løsninger må dokumenteres og argumenteres for. Besvarelsen redigeres som en forskningsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, referanser, innholdsfortegnelse etc. Påstander skal begrunnes ved bevis, referanser eller logisk argumentasjonsrekker. I tillegg til norsk tittel skal det være en engelsk tittel på oppgaven. Oppgaveteksten skal være en del av besvarelsen (plasseres foran Forord).

Materiell som er utviklet i forbindelse med oppgaven, så som programvare/kildegoder eller fysisk utstyr, er å betrakte som en del av besvarelsen. Dokumentasjon for korrekt bruk av dette skal så langt som mulig også vedlegges besvarelsen.

Dersom oppgaven utføres i samarbeid med en ekstern aktør, skal kandidaten rette seg etter de retningslinjer som gjelder hos denne, samt etter eventuelle andre pålegg fra ledelsen i den aktuelle bedriften. Kandidaten har ikke anledning til å foreta inngrep i den eksterne aktørs informasjonssystemer, produksjonsutstyr o.l. Dersom dette skulle være aktuelt i forbindelse med gjennomføring av oppgaven, skal spesiell tillatelse innhentes fra ledelsen.

Eventuelle reiseutgifter, kopierings- og telefonutgifter må bæres av studenten selv med mindre andre avtaler foreligger.

Hvis kandidaten, mens arbeidet med oppgaven pågår, støter på vanskeligheter som ikke var forutsatt ved oppgavens utforming, og som eventuelt vil kunne kreve endringer i eller utelatelse av enkelte spørsmål fra oppgaven, skal dette umiddelbart tas opp med UiT ved veileder.

Besvarelsen leveres digitalt i WISEflow.

| | |
|---|---|
| Utleveringsdato: | 11.01.2021 |
| Innleveringsdato: | 15.05.2021 |
| Kontaktopplysninger samarbeidsbedrift: | Norconsult AS Jørgen Knutsen Telefon: 47833213 E-post: jorgen.knutsen@norconsult.com |
| Veileder UiT - IVT: | Førsteamanuensis Raymond Riise Telefon: 76 96 62 97 E-post: raymond.riise@uit.no |

UiT – Norges Arktiske Universitet
Institutt for bygg, energi og materialteknologi

Raymond Riise
Faglig ansvarlig/veileder

Forord

Denne rapporten er utarbeidet som en avsluttende del på studiet i Integrrert bygningsteknologi ved UiT Norges arktiske universitet. Masteroppgaven er skrevet våren 2021 og utgjør 30 studiepoeng.

Jeg vil rette en takke til min hovedveileder Raymond Riise, førsteamanuensis ved Institutt for bygg, energi og materialteknologi for god veiledning og tilgjengelighet gjennom hele arbeidet. Videre ønsker jeg å takke Jørgen Knutsen ansatt hos Norconsult for gode råd og veiledning.

Jeg ønsker å takk alle som har lest igjennom oppgaven min og har gitt meg konstruktiv tilbakemelding. Avslutningsvis vil jeg takke min samboer Ingrid, som har gitt meg støtte og oppmuntring gjennom denne prosessen.

Sammendrag

EU har som mål å redusere klimagassutslippene med minimum 40 prosent innen 2030 sammenlignet med 1990. Dette har medført til en rekke endringer i byggebransjen, som blant annet utvikling av bygg med vesentlig lavere energibehov enn tidligere. Samtidig har det termiske energiforsyningssystemet fått mer fokus. Deriblant identifiseres varmepumper som nøkkelteknologi for å nå kravene til EUs energieffektiviseringsdirektiv [1].

Blant varmepumpeløsningene har væske/vann med energibrønner hatt en betydelig vekst, noe som skyldes ambisjoner om spare energi og følgelig penger [2]. Men løsningen er forbundet med høye investeringskostnader. Derimot er luft/vann varmepumper en konkurende løsning med hensyn til økonomi og energi. De klimatiske forholdene spiller en viktig rolle med tanke på hvilken varmepumpeløsning som er energi- og kostnadseffektiv.

Casestudiet har kartlagt energi- og effektbehov for en boligblokk lokalisert på Sør-Vestlandet (Bergen). Romoppvarming og tappevannsbehovet er lagt til grunn for dimensjonering av varmepumpealternativene. Basert på resultatene for varmepumpenes årsvarmefaktor og varmelytelse ved ulike driftsforhold gjennom en fyringssesong, er det utarbeidet lønnsomhetsberegninger. Resultatene fra casestudiet for varmepumpesystemene er blitt benyttet til å beregne hvilke av varmepumpealternativene som er energi- og kostnadseffektivt.

Basert på de forutsetningene og antagelsen som er lagt til grunn for beregningene, viser lønnsomhetsberegningen av luft/vann-varmepumpeløsningen å være den mest energieffektive løsningen og samtidig den kostnadseffektive løsningen for boligblokken.

Varmepumpeløsningen oppnår høyest årsvarmefaktor, samt lavest årskostnad. Basert på livssyklus-kostnadene har luft/vann-varmepumpen fått en årskostnad på 80948 kr og netto nåverdi 6 017 kr.

Abstract

The EU aims to reduce greenhouse gas emissions by a minimum of 40 percent by year 2030 compared to 1990. This has led to several changes in the construction industry, including the development of buildings with significantly lower need for energy than before. At the same time, the thermal energy supply systems has received more focus. Heat pumps are identified as key technology to accommodate the requirements from the EU Energy Efficiency Directive [1]

Among the heat pumps solutions, the ground source heat pump (GSHP) have had a significant growth, which is due to ambitions to save energy and money [2]. Although the ground source - heat pump is associated with high investment costs. On the other hand, air/water - heat pumps are a competitive solution in terms of economy and energy. The climatic conditions plays an important role in terms of which heat pump solution is energy and cost-efficient.

The case study has mapped the energy and power needs for an apartment block of flats located in the southwest of Norway (Bergen). The results from the case study for the heat pump systems have been utilized to calculate which of the heat pump alternatives are energy and cost-efficient.

Based on the assumptions for the calculations, the profitability calculation of the air/water-heat pump solution shows to be the most energy-efficient solution and at the same time the cost-effective solution for the apartment block. The heat pump solution achieves the highest annual heating factor, as well as the lowest annual cost. Based on the life cycle costs, the air/water- heat pump has an annual cost of NOK 80,948 and a net present value of NOK 6,017

Innholdsfortegnelse

| | |
|---|----------|
| Forord..... | i |
| Sammendrag..... | ii |
| Abstract | iii |
| Figurliste..... | vii |
| Tabelliste..... | viii |
| Nomenklatur/Symboloversikt..... | ix |
| 1 Innledning..... | 1 |
| 1.1 <i>Formål og problemstilling</i> | 2 |
| 1.2 <i>Avgrensning og antagelser</i> | 2 |
| 2 Teori..... | 3 |
| 2.1 <i>Varmepumpe</i> | 3 |
| 2.1.1 Arbeidsmediet og faseendring | 4 |
| 2.1.2 Effektfaktor..... | 5 |
| 2.1.3 Årsvarmefaktor..... | 5 |
| 2.1.4 Systemvirkningsgrad | 6 |
| 2.2 <i>Dimensjonering av varmpumpe</i> | 6 |
| 2.2.1 Energi- og effektbehov | 6 |
| 2.2.2 Grunnlast & spisslast..... | 8 |
| 2.2.3 Spisslastkilder | 8 |
| 2.3 <i>Varmedistribusjonssystemer</i> | 9 |
| 2.3.1 Energifleksibelt system | 9 |
| 2.3.2 Varmegivere..... | 10 |
| 2.3.3 Romoppvarming og varmtvannsberedning..... | 10 |
| 2.4 <i>Varmepumpeløsninger</i> | 11 |
| 2.4.1 Luft/vann-varmpumpe | 12 |
| 2.4.2 Væske/vann- varmpumpe | 12 |
| 2.5 <i>Grunnvarme</i> | 14 |
| 2.5.1 Lukket system | 14 |
| 2.5.2 Åpent system | 15 |
| 2.5.3 Termisk responstest | 15 |
| 2.6 <i>Arbeidsmedier</i> | 16 |
| 2.6.1 Klassifisering og benevnelse av arbeidsmedium..... | 16 |
| 2.6.2 Naturlige og syntetiske arbeidsmedier | 17 |
| 2.6.3 F-gassforordning..... | 17 |
| 2.6.4 Sikkerhetsklasser | 18 |
| 2.6.5 Arbeidsmedienes egenskaper | 18 |
| 2.6.6 Temperatur begrensning | 20 |
| 2.7 <i>Livssyklus-kostnader</i> | 21 |
| 2.7.1 Netto nåverdi for kostnader i analyseperioden | 21 |
| 2.7.2 Kalkulasjon av levetidskostnad (K) og årskostnad (ÅK)..... | 22 |
| 2.7.3 Lønnsomhetsvurdering..... | 23 |
| 2.8 <i>Tilskuddsordninger</i> | 23 |
| 2.9 <i>Klima</i> | 23 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3 | Metode | 26 |
| 3.1 | <i>Litteraturstudie</i> | 26 |
| 3.2 | <i>Simuleringsverktøy</i> | 26 |
| 3.2.1 | SIMIEN | 27 |
| 3.2.2 | CoolPack | 27 |
| 4 | Litteraturstudiet | 28 |
| 4.1 | <i>Akustikk</i> | 28 |
| 4.1.1 | Krav til akustikk | 28 |
| 4.1.2 | Persepsjon av lyd | 28 |
| 4.1.3 | Varmepumpe som støykilde | 29 |
| 4.1.4 | Støy ved avrimingsyklus | 29 |
| 4.1.5 | Kompressor støy | 30 |
| 4.1.6 | Akustiske strategier | 32 |
| 4.1.7 | Oppsummering | 34 |
| 4.2 | <i>Frost og avriming</i> | 35 |
| 4.2.1 | Isdannelse | 35 |
| 4.2.2 | Avrimingsmetoder: passive og aktive metoder | 35 |
| 4.2.3 | Optimalisering av utendørs enhet | 35 |
| 4.2.4 | Overflatebehandling | 36 |
| 4.2.5 | Styring og deteksjon | 38 |
| 4.2.6 | Elektrisk avriming | 38 |
| 4.2.7 | Varmgassavriming | 39 |
| 4.2.8 | Termisk energilagring PCM | 40 |
| 4.2.9 | Oppsummering | 43 |
| 4.3 | <i>Korrosjon</i> | 44 |
| 4.3.1 | Årsak og konsekvens | 44 |
| 4.3.2 | Beleggets effekt på varmeytelse | 44 |
| 4.3.3 | Korrosjonsformer | 45 |
| 4.3.4 | Pourbaix diagram | 46 |
| 4.3.5 | Overflatebehandling | 46 |
| 4.3.6 | Materialer og metallenes egenskaper | 47 |
| 4.3.7 | Arbeidsmedium | 48 |
| 4.3.8 | Oppsummering | 49 |
| 4.4 | <i>Kartlegging av service- og vedlikeholdsbehov i ulike VP-installasjoner.</i> | 49 |
| 4.4.1 | Forvaltning og drift | 49 |
| 4.4.2 | Varmepumpeløsning | 50 |
| 4.4.3 | Kostnader knyttet til drift og vedlikehold | 50 |
| 5 | Casestudie | 51 |
| 5.1 | <i>Boligblokk</i> | 51 |
| 5.1.1 | Energi og effektbehov | 53 |
| 5.1.2 | Systembeskrivelse | 54 |
| 5.1.3 | Avgrensning | 54 |
| 5.2 | <i>Varmepumpe alternativ</i> | 54 |
| 5.3 | <i>Alternativ 1: Luft/vann- varmpumpe</i> | 55 |
| 5.3.1 | Årsvarmefaktor og energidekningsgrad | 55 |
| 5.3.2 | Tappevann | 56 |
| 5.4 | <i>Alternativ 2: væske/vann- varmpumpe</i> | 56 |
| 5.4.1 | Årsvarmefaktor og energidekningsgrad | 56 |
| 5.4.2 | Systembeskrivelse | 57 |
| 5.4.3 | Varmeuttak | 57 |
| 6 | Økonomisk analyse | 58 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 6.1 | <i>Forutsetninger og antagelser</i> | 58 |
| 6.2 | <i>Investeringskostnader</i> | 59 |
| 6.2.1 | Borekostnader..... | 59 |
| 6.2.2 | Forventet drift og vedlikeholdskostnader..... | 59 |
| 6.2.3 | Tilskuddsordning..... | 59 |
| 6.2.4 | Forutsetning og forenklinger..... | 59 |
| 6.3 | <i>Økonomisk analyse</i> | 60 |
| 6.3.1 | Lønnsomhet..... | 60 |
| 6.3.2 | Årskostnad..... | 61 |
| 6.3.3 | Sensitivitetsanalyse..... | 62 |
| 7 | Diskusjon | 63 |
| 7.1 | <i>Luft/vann-varmepumpe</i> | 63 |
| 7.1.1 | Årsvarmefaktor..... | 63 |
| 7.1.2 | Økonomi..... | 63 |
| 7.1.3 | Andre forhold..... | 64 |
| 7.2 | <i>Væske/vann-varmepumpe</i> | 64 |
| 7.2.1 | Energibrønn og årsvarmefaktor..... | 64 |
| 7.2.2 | Økonomi..... | 65 |
| 7.2.3 | Diskusjon av andre forhold..... | 65 |
| 8 | Konklusjon | 65 |
| 8.1 | <i>Litteraturstudiet</i> | 65 |
| 8.2 | <i>Casestudiet</i> | 66 |
| 9 | Litteraturliste | 67 |
| Vedlegg A | SIMIEN | 74 |
| Vedlegg B | Coolpack | 1 |
| Vedlegg C | Kostnader | 2 |
| Vedlegg D | Excel | 4 |

Figurliste

| | |
|---|----|
| Figur 1. Prinsipiell skisse av varmepumpe og illustrerer komponentens virkemåte [6]..... | 3 |
| Figur 2. Trykk (P)/ Entalpi (H) diagram. Illustrere arbeidsmediet faseendring [6]..... | 4 |
| Figur 3. Sammenheng mellom varmepumpens COP og prosentvis energisparing sammenlignet med elektriske oppvarmingssystemer [6]..... | 6 |
| Figur 4. Prinsipiell effekt-varighetskurve for oppvarmingsbehovet for en bygning [6]..... | 8 |
| Figur 5. Prinsipiell utforming av væske/vann-varmepumpe med vekselventil og separat akkumulatortank for både romoppvarming og varmtvannsberedning [7]. | 11 |
| Figur 6. Prinsipielt eksempel av design av et væske/vann varmepumpeanlegg [17]. | 13 |
| Figur 7. Bergvarmepumpe med ulik utforming av kollektorslanger [6]. | 14 |
| Figur 8. Benevnelse av arbeidsmediet tetrafluoretan. | 16 |
| Figur 10. Temperaturbegrensning til ulike arbeidsmedier [9]..... | 20 |
| Figur 11. Kostnader for et bygg gjennom et livsløp [31]..... | 21 |
| Figur 12. Diskontering av fremtidige kostnad til nåverdi [31] | 22 |
| Figur 13. Oversikt over de syv klimasonene i Norge [36]..... | 24 |
| Figur 14. Graddøgn som funksjon av normal døgnmiddeltemperatur og fyringssesong [39]..... | 24 |
| Figur 15. Resultater av lydeffektnivå av utedelen vedl avrimingssyklus. Rød linje er før frostdannelsen, blå linje under avriming og grønn linje er etter avrimingssyklusen [47] | 30 |
| Figur 16. Måling av lydeffektnivå med vibrasjonsisolasjon og absorberende isolasjon (t.v). Måling av lydeffektnivå med kompressor av treboks kombinert med passivtiltak (t.h) [49]..... | 31 |
| Figur 17. Vifte med Axitop (t.v) og vifte med flow grid (t.h) [49]..... | 32 |
| Figur 18. Louverd finner, wavy finner og flate rør med louverd finner [61]..... | 36 |
| Figur 19. Skjematisk oppbygning varmepumpe med dual Hot gass By-pass [72] | 40 |
| Figur 20. Skjematisk oppbygning av forsøket [75]..... | 41 |
| Figur 21. Figur Oppbygning av varmeveksler med PCM [75] | 41 |
| Figur 22. Pourbaix diagram for jern i vann ved 25 °C [83]..... | 46 |
| Figur 23. Prinsippskisse av boligblokken som er simulert i SIMIEN | 51 |
| Figur 24. Effekt-varighetskurve for boligblokken..... | 53 |
| Figur 25. NIBE luft/vann- varmepumpe varmelytelse 8- 20 kW [96]..... | 55 |
| Figur 26. Oversikt over bergart i Bergen område [98] | 57 |

Tabelliste

| | |
|---|----|
| <i>Tabell 2.1. Varmetap i bygninger</i> | 7 |
| <i>Tabell 2.2. Varmetilskudd i bygninger</i> | 7 |
| <i>Tabell 4.1. Oversikt av bygningskategorier med tilhørende lydklasser [27]</i> | 28 |
| <i>Tabell 4.2. Tilstandene for vann ved en fast overflate</i> | 37 |
| <i>Tabell 4.3. Termisk konduktivitet for ulike metaller og metalloksider [62]</i> | 44 |
| <i>Tabell 5.1. Inndata for simulering av boligblokken i SIMIEN</i> | 52 |
| <i>Tabell 5.2. Ytelse til varmpumpemodellen (S. Raastad, personlig kommunikasjon 30.april. 2021)</i> | 56 |
| <i>Tabell 5.3. Ytelse til varmpumpemodellen (S. Raastad, personlig kommunikasjon 30.april. 2021)</i> | 56 |
| <i>Tabell 5.4. 10 Beregnet varmeuttak fra energibrønnene (S. Raastad, personlig kommunikasjon 30.april. 2021)</i> | 58 |
| <i>Tabell 6.1 Investeringskostnader for varmpumpealternativene</i> | 60 |

Nomenklatur/Symboloversikt

Følgende begreper og symboler er benyttet i oppgaven [3] [4]:

| Begreper/symboler | Forklaring |
|--------------------------|---|
| COP | Avgitt varmeeffekt dividert med tilført effekt til kompressor (øyeblikksverdi) |
| T_{DUT} | Et steds laveste gjennomsnittstemperatur over 3 døgn i løpet av en 30 års periode |
| Effekt | Opptatt eller avgitt energi per tidsenhet [W] –[J/s] |
| GWP | Global Warming Potential. Enhet for angivelse av relative klimavirkning for en gass |
| HFK | Forkortelse for ”fluorokarbon”, halokarbon som i tillegg til karbon inneholder hydrogen og fluor. (For eksempel tetrafluoretan, HFK-134a). |
| Kuldemedium | Arbeidsmediet i et kuldeanlegg eller en varmepumpe |
| U-verdi | Beskriver hvor mye varme som går gjennom per m^2 av en konstruksjon ved en temperatur-forskjell på 1 K. Enhet [W/ (m^2 K)] |
| Varmeveksler | Komponent hvor varme overføres fra et medium til et annet medium med lavere temperatur |
| Årsvarmefaktor | Avgitt varmemengde fra en varmepumpe i løpet av et år dividert med tilført energi til drift av varmepumpen det samme året. |
| SCOP / SPF | Seasonal Coefficient of Performance / Seasonal performance factor |
| Bergvarme/ grunnvarme | Varme fra grunnfjellet som brukes til varmepumpe. Utvinnes ved hjelp av borehull som gjerne er 60 - 200 meter dype. |
| LCC | Livssyklus kostnader kommer av engelsk Life Cycle Cost. Angir kostnader for investerings- eller kapitalkostnader, samt årlige kostnader i driftsperioden inkludert vedlikehold (FDVU-kostnader) |

1 Innledning

Norske næringsbygg og husholdninger bruker henholdsvis 16 TWh og 37,5 TWh til oppvarming og kjøling i løpet av et år [1]. Der mesteparten av oppvarming basert på elektrisitet, noe som ikke er forenelig med EUs mål.

EU har som mål å redusere klimagassutslippene med minimum 40 prosent innen 2030 sammenlignet med 1990. Dette har medført til en rekke endringer i byggebransjen, blant annet utvikling av bygg med vesentlig lavere energibehov enn tidligere. Samtidig har det termiske energiforsyningssystemet fått mer fokus. Deriblant identifiseres varmepumper som nøkkelteknologi for å nå kravene til EUs energieffektiviseringsdirektiv [1].

Varmepumpemarkedet har hatt en økt utvikling de siste årene. Flere bygg har fått varmeanlegg basert på varmepumpeteknologien. Ettersom varmepumper oppnår høy energisparing og lave CO₂ utslipp, er teknologien ofte foretrukne for nullenergibygging, passivhus og lavenergibyggninger i Norge [5].

Blant varmepumpeløsningene har væske/vann med energibrønner hatt en betydelig vekst, noe som skyldes ambisjoner om spare energi og følgelig penger [2]. Men løsningen er forbundet med høye investeringskostnader. Derimot er luft/vann varmepumper en konkurrerende løsning med hensyn til økonomi og energi. De klimatiske forholdene spiller en viktig rolle med tanke på hvilken varmepumpeløsning som er energi- og kostnadseffektiv. Formålet med oppgaven er å finne hvilken løsning som er mest kostnadseffektiv i klimasonen Sør-Vestlandet (kysten).

1.1 Formål og problemstilling

Oppgaven har som formål å undersøke: «*Livssyklus kostnader (LCC) for to ulike varmepumpe løsninger. Oppgaven skal vurdere hvilken varmepumpe løsning, som er best egnet i Sør-Norge-vestkyst klima*».

Rapporten baseres på teoretiske beregninger for et casestudie (boligblokk), der det undersøkes hvor energieffektiv de ulike varmepumpe løsningene. Dette benyttes videre for å vurdere hvilken løsning som er mest kostnadseffektiv. I tillegg er det gjennomført et litteraturstudie som har som formål å identifisere suksesskriterier for å lykkes med luft som varmekilde for varmepumper.

1.2 Avgrensning og antagelser

På grunn av at undertegnende ble involvert i en skiulykke med påfølgende operasjon, ble det utfordrerne å reise på befaring til Jondal med tanke på å gjennomføre analyser og energioppfølging av flerbrukshallen i Jondal. Det ble dermed besluttet at oppgaven ikke skulle inkludere varmepumpeanlegget til flerbrukshallen. Dette ble avklart med veilederne og vi ble enig om at det viktigste for oppgaven var å gjøre rede for livssyklus kostnadene ved de ulike varmepumpe løsningene.

I tillegg er de teoretiske beregningene basert på empiriske data og veiledende priser og kostnader fra leverandører. Det har tilstrebes å finne realistiske data o.l. men representere således ikke nødvendigvis nøyaktige reelle lokale forhold. Eksempelvis er forhold i grunn, løsmasser og fjell basert på data fra Norges geologiske undersøkelse (NGU).

Oppgaven er avgrenset til å omfatte hovedsakelig varmepumpe løsningene. For begge alternativene benyttes det likt varmedistribusjonssystem, og er derfor ikke inkludert i lønnsomhet vurdering. Videre er det ikke tatt hensyn til eventuelle systemvirkningsgrader og varmetap for varmedistribusjonssystemet ved beregning av varmepumpenes ytelse. I tillegg er det ikke undersøkt kjølebehovet for casestudiet og lønnsomheten ved å bruke varmepumpene til kjøling. Ytterligere avgrensninger er beskrevet nærmere i oppgaven.

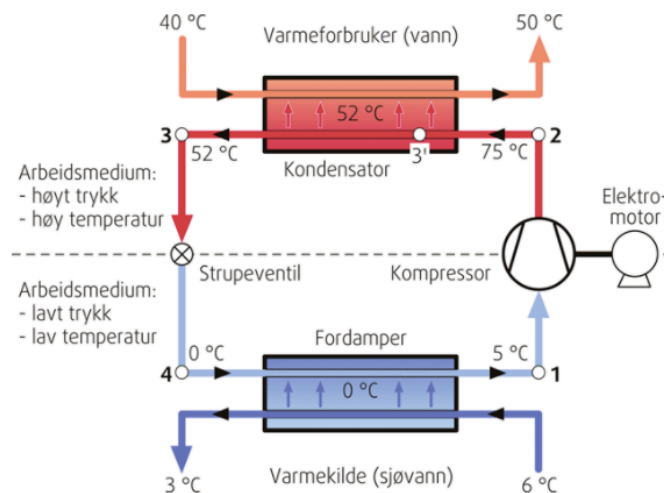
2 Teori

I dette kapitlet presenteres teori om varmepumper og de ulike systemløsninger. I tillegg blir det gjennomgått teori knyttet til energibruk, klima og økonomi.

2.1 Varmepumpe

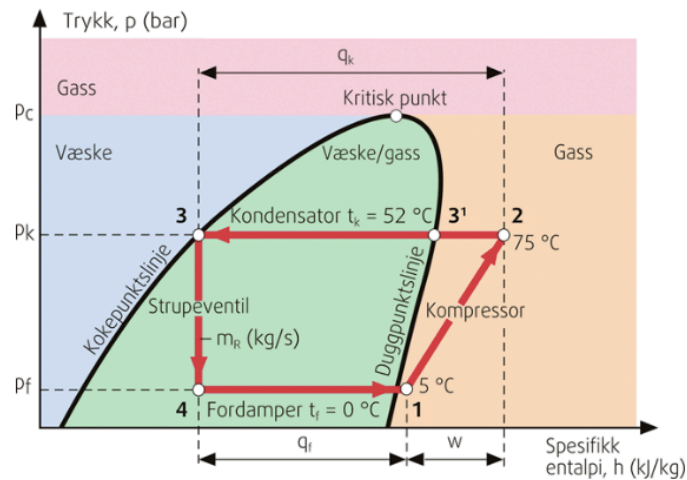
Varmepumpens prinsipielle funksjon er å transportere lavtemperatur varme fra en varmekilde og levere varmen ved en høyere temperatur til forbrukeren. Denne prosessen er illustrert på *Figur 1*. For at dette skal la seg gjennomføres er det nødvendig med tilførsel av elektrisitet. Varmepumpeprosessen er basert på fire hovedkomponenter:

- Fordamper – varmeveksler som transporterer varme fra varmekilden til arbeidsmediet
- Kompressor – øker trykk og temperatur
- Kondensator – varmeveksler som transporterer varme fra arbeidsmediet til forbruker
- Strupeventil – reduserer trykk og temperatur



Figur 1. Prinsipiell skisse av varmepumpe og illustrerer komponentens virkemåte [6].

Disse komponentene i varmepumpen er koblet sammen i en lukket røkrings. Et arbeidsmedium sirkulerer i røkringsen og transporterer energi fra varmekilden til forbruker. *Figur 2* viser faseendringene arbeidsmediet gjennomgår, illustrert ved hjelp av trykk (P) og entalpi (H) diagram



Figur 2. Trykk (P)/ Entalpi (H) diagram. Illustrere arbeidsmediet faseendring [6].

2.1.1 Arbeidsmediet og faseendring

Arbeidsmediet gjennomgår ulike faseendringer for å kunne levere varme, der komponentene medfører følgende endringer [7]:

- **Fordamper:** arbeidsmediet er i væskefase og metningstrykket er lavt, dette medfører at mediet har lavere temperatur enn varmekilden. Differansetemperaturen medfører at varme overføres fra varmekilden til arbeidsmediet, som begynner å fordampe. I utløpet av fordamperen er all væske fordampet (gass), og energiinnholdet i arbeidsmediet har økt som følge av varmekilden.
- **Kompressor:** arbeidsmediet er i gassfase som suges inn i kompressoren. Kompressoren øker trykket og temperaturen. Tilførsel av elektrisk energi til kompressoren resulterer i at energiinnholdet i gassen øker. I tillegg er metningstemperaturen til arbeidsmediet lavere enn temperaturen til varmekilden, som resulterer i bedre varmeoverføring
- **Kondensator:** mediet er i gassfase med høyt trykk og temperatur. Når arbeidsmediet strømmer over kondensator overføres varmen til det andre mediet med lavere temperatur. Under varmeoverføring kondenserer arbeidsmediet til væske.
- **Strupeventil:** medfører at arbeidsmediets trykk og temperatur reduseres til henholdsvis fordampningstrykk og fordampningstemperatur. Arbeidsmediet strømmer tilbake til fordamperen og prosessen repeterer seg.

2.1.2 Effektfaktor

Effektiviteten til en varmepumpe beskrives ved effektfaktoren *Coefficient of Performance* (COP). Effektfaktoren beregnes ved en gitt driftstilstand og angir forholdet mellom levert varmeeffekt fra kondensatoren (Q) og tilført elektrisk effekt til kompressoren (P), som vist ved ligning 1 [7]. Dersom effektfaktoren til en varmepumpe er høy, resulterer det i størst energisparing.

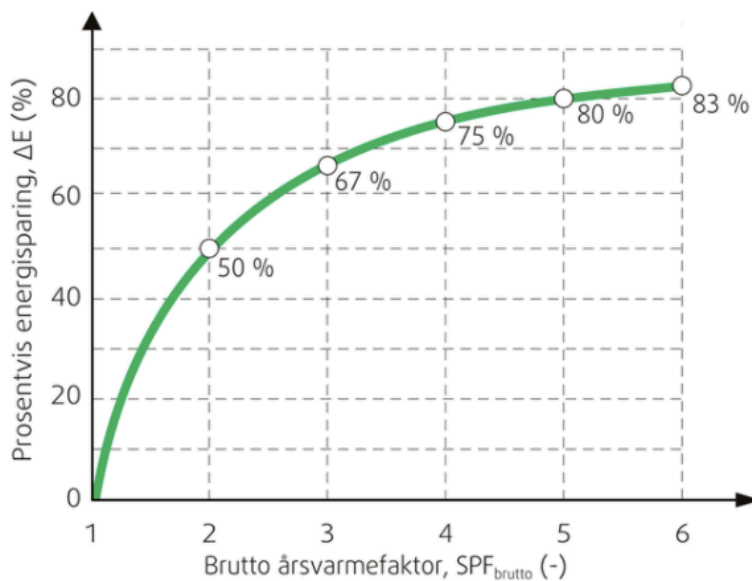
$$COP = \frac{Q}{P} \quad (1)$$

Blant faktorer som påvirker effektfaktoren (COP) er differansen mellom fordampnings- (t_f) og kondenseringstemperaturen (t_k), samt kompressoren energivirkningsgrad (η_{is}).

2.1.3 Årsvarmefaktor

Årsvarmefaktor *Seasonal Performance Factor* (SPF) beskriver varmepumpens effektivitet gjennom en fyringssesong og tilsvarer gjennomsnittlig effektfaktor. Årsvarmefaktoren beskriver forholdet mellom årlig levert varme fra kondensator og årlig tilført elektrisk energi for drift av varmepumpen [6]. Det er derfor gunstig å bruke årsvarmefaktor, istedenfor COP som er en momentanverdi og beskriver i liten grad ytelsen til varmepumpe ved varierende temperatur- og driftsbelastning.

Forholdet mellom årsvarmefaktor og energisparing er ikke lineært. Slik at ved dobling av årsvarmefaktor vil ikke forbrukeren oppnå dobling i relativ energisparing. Eksempelvis vil en SPF på to gi 50 % energisparing, derimot en SPF på fire vil gi 75 % energisparing. *Figur 3* viser energisparings potensial til en varmepumpe ved ulike SPF, sammenlignet med elektrisk oppvarmingssystem.



Figur 3. Sammenheng mellom varmepumpens COP og prosentvis energisparing sammenlignet med elektriske oppvarmingssystemer [6]

2.1.4 Systemvirkningsgrad

Varmedistribusjons- og reguleringsystem vil også påvirke ytelsen til varmeanlegget. I tilfeller hvor varmepumpe og spisslast har samme distribusjons og reguleringsystem, kan systemvirkningsgrad beregnes ved likning 2 [8].

$$COP_{system} = COP_{produksjon} \cdot \eta_{distribusjon} \cdot \eta_{regulering} \quad (2)$$

2.2 Dimensjonering av varmepumpe

2.2.1 Energi- og effektbehov

For å oppnå en optimal dimensjonering av varmepumpeanlegget må byggets energi- og effektbehov kartlegges. Byggets effekt- og energibehov bestemmes ved å beregne byggets varmetap og varmetilskudd [9]. Samspillet mellom varmetapet og varmetilskuddet avhenger av bygning og lokalt klima. Dette er nærmere beskrevet Tabell 2.1 og 2.2.

Tabell 2.1. Varmetap i bygninger

| Varmetap | Årsak | Anvendelse |
|---------------------|---|---|
| Transmisjon | Varmetap gjennom byggets klimaskjerm (vegger, vinduer, gulv og tak). <ul style="list-style-type: none"> • <u>Mengden tap avhenger av:</u> <ul style="list-style-type: none"> ○ Temperaturdifferansen (ute og innetemperatur), U-verdi til bygningsdelene (Areal), Kuldebro | Brutto varmeeffektbehov Beregnes ved å summere varmetapene ved dimensjonerende temperatur |
| Infiltrasjon | Varmetap som følge av utilsiktet luft som strømmer ut av byggets utettheter. <ul style="list-style-type: none"> • <u>Mengden tap avhenger av:</u> <ul style="list-style-type: none"> ○ Trykkdifferanse (avhenger temperaturdifferansen), Vindpåkjenning, høyde | |
| Ventilasjon | Varmetap som følge av utskiftning av luft <ul style="list-style-type: none"> • <u>Mengden tap avhenger av:</u> <ul style="list-style-type: none"> ○ Varmegjenvinner virkningsgrad, luftmengde, temperaturdifferanse | |

Tabell 2.2. Varmetilskudd i bygninger

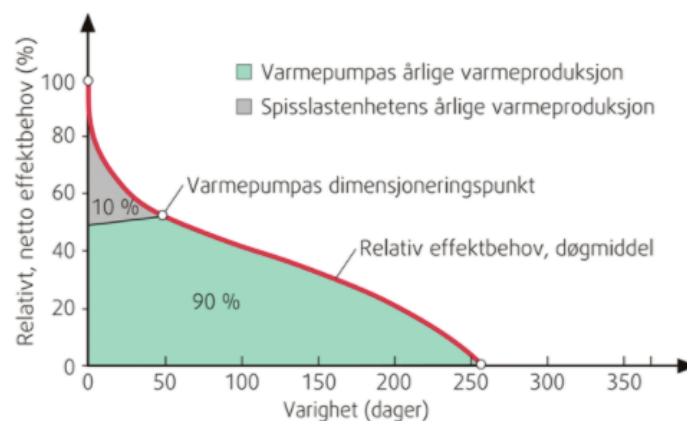
| Varmetilskudd | Årsak | Anvendelse |
|---------------------|--|--|
| Internlaster | Varmetilskudd fra elektroniske utstyr: <ul style="list-style-type: none"> • lys, datamaskiner, distribusjonssystemer | Netto varmeeffektbehov Beregnes ved å summere varmetilskuddene minus brutto varmeeffektbehov |
| Personer | Varmetilskudd fra personer som oppholder seg i bygget: <ul style="list-style-type: none"> • aktivitetsnivå og antall personer | |
| Soltilskudd | Varmetilskudd fra sola: <ul style="list-style-type: none"> • via vinduer, tak og fasader. Avhenger av orientering og plassering av bygget, samt grad solavskjerming | |

Når netto varmeeffektbehov er kartlagt kan dette benyttes videre som dimensjoneringsgrunnlag for varmpumpeanlegget. Ved å summere varmetilskuddene ved dimensjonerende sommerforhold, kan dette benyttes som dimensjoneringsgrunnlag for kjøleanlegget

2.2.2 Grunnlast & spisslast

Begrepene grunnlast og spisslast beskriver hvor stor andel av varmebehovet som dekkes av ulike varmekilder. Hvor grunnlast beskriver hvor mye varmeeffekt som nødvendig for å dekke mesteparten av årlig varmebehov på en lønnsom måte [10]. Det vil si at en varmepumpe oppnår de laveste investeringskostnadene når anlegget dimensjoneres som grunnlast [6]. Grunnlast utgjør vanligvis mellom 70 – 90 % av bygningens årlige varmebehov.

Spisslast er tilleggseffekt som skal dekke det resterende varmeeffektbehovet for bygning ved den kaldeste perioden av året. I enkelte tilfeller kan spisslasten dekke hele bygnings effektbehov. Spisslast utgjør vanligvis mellom 10 – 30 % av bygnings årlige varmebehov [10], som illustrert ved *Figur 4* Spisslasten leveres fra en annen varmekilde, slike kilder er typisk elektrisitet, biobrensel og fjernvarme.



Figur 4. Prinsipiell effekt-varighetskurve for oppvarmingsbehovet for en bygning [6]

2.2.3 Spisslastkilder

Ved bestemmelse av aktuell spisslastkilde må flere faktorer vurderes, blant annet økonomi, forsyningssikkerhet og tilgjengelig areal. I enkelte tilfeller kan forsyningssikkerheten være retningsgivende avhengig av bygningstype, lokasjon og sårbarhet for klima. De mest alminnelige kildene omfatter:

- **Elektrokjel** er kjeler som benytter elektrisitet som energibærer [11]. Dette er i teorien en varmtvannstank som er koblet til rørsystemet og varmeanlegget. Ulempen med elektrokjel er høye driftskostnader (avhengig av strømprisen). Dette kan være uheldig

dersom varmebehovet er høyt. Derimot er elektrokjel forbundet med lave investeringskostnader.

- **Fjernvarme** dersom fjernvarme er tilgjengelig i området, kan bygningen koble seg til en kundesentral (varmeveksler) for fjernvarmenettet. Bygningens energiforbruk registreres og avregnes med energimålere. Fjernvarme er forbundet med lave investeringskostnader og lite vedlikeholdsbehov, ettersom energiforsyning driftes av ekstern aktør [9]. Dersom fjernvarmen er basert på avfallsforbrenning som inneholder plastprodukter kan klimagassutslippet være relativt stort. I tillegg er det ikke gitt alle fjernvarmeleverandører ønsker å kun levere spisslast.
- **Biobrensel** omfatter biologiske materiale og regnes som CO₂ nøytralt [9]. Biovarme karakteriseres ved store arealer til forsyningssystem, samt lokal forurensning av sot og partikler. Slike anlegge har høye investeringskostnader sammenlignet med de øvrige alternativene.

2.3 Varmedistribusjonssystemer

Bygninger med varmpumpeanlegg utstyres ofte med vannbårende varmeanlegg. For at varmen skal distribueres videre bygget behøver det vannbårende anlegget et rørsystem med ekspansjonssystem og sirkulasjonspumper. I tillegg er det nødvendig med varmeavgivere til romoppvarming, samt beredning av varmt vann og/eller ettervarming av varmt vann [7].

2.3.1 Energifleksibelt system

Begrepet energifleksibelt varmesystem er knyttet til et ønske om at bygg skal oppvarmes ved bruk av forskjellige varmekilder. Formålet med et energifleksibelt system er blant annet å oppnå lavest mulig oppvarmingskostnader, avlaste el. nettet, fleksibilitet knyttet forsyningssikkerhet og omstilling til fornybare energiresurser. Dette er noe av bakgrunnen for kravene gitt i byggt teknisk forskrift (TEK17).

I henhold til veiledning for byggt teknisk forskrift (VTEK) § 14-4 skal bygning med over 1000 m² BRA ha energifleksible varmesystemer. Deriblant fremgår det «*energifleksible system må*

dekke minimum 60 % av normert varmebehov» [12]. Det medfører at varmepumper må dekke minimum 60 % eller kombinasjonen av varmepumpe og en annen fornybar kilde.

2.3.2 Varmegivere

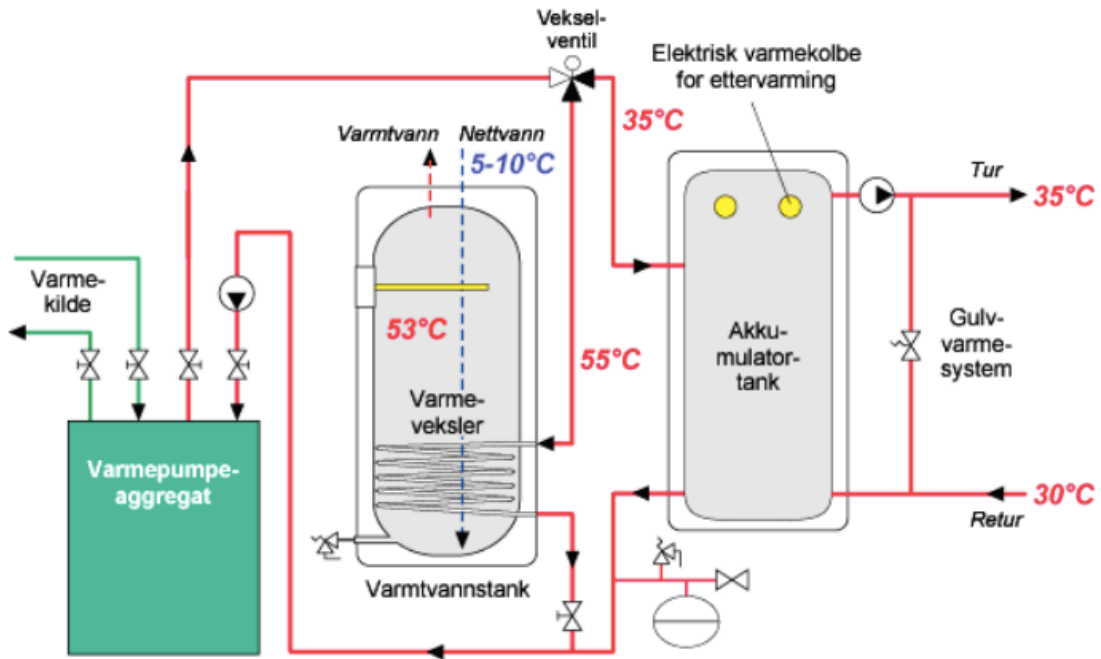
Med vannbårent varmeanlegg er det mange muligheter til levere varme til bygningen. Blant annet kan viftekonvektor benyttes som varmeavgivende element. En viftekonvektor er i prinsippet en radiator/varmebatteri med vifte. Varmeavgivelsen foregår via konveksjon (luftoppvarming) og stråling. Disse egner seg for både boliger eller større bygg, slik som idrettshaller. Viftekonvektoren har integrert termostat og gir rask romoppvarming. Disse anses som støysvake, men avhenger av viftens turtall [9].

Et annet varmeavgivende element er vannbårne gulvvarmesystemer. Vannbårne gulvvarmesystemer består av diffusjonstetteplastrør installert i gulvet. Lavtemperatur gulvvarmesystem gir mindre temperaturvariasjon (vertikal temperaturgradient) i oppholdssonen (fra gulv til tak) sammenlignet med konvektiv varmeavgivende elementer. Den mindre temperaturvariasjonen medfører at beboerne får en bedre termisk komfort.

Varmeavgivelsen fra en radiator skjer via konveksjon (luftoppvarming) og termisk stråling. Mengden varme som blir avgitt, avhenger av blant annet radiatorens størrelse (heteflate) og forskjellen mellom tur-/returtemperaturen over radiatoren, samt romtemperaturen. Tradisjonelt plasseres radiator under vindusfelt, ettersom vinduer har høyest U-verdi og kalde overflater. Radiatorer plassert under vinduene vil redusere kaldras (trekk) og opprettholde komfortabel innetemperatur ved varierende utetemperaturer.

2.3.3 Romoppvarming og varmtvannsberedning

En alminnelig løsning for varmepumpeanlegg med lavtemperatur varmedistribusjonssystem er å integrere varmtvannstank og vekselventil for prioritert varmtvannsberedning [7]. Vekselventilen regulerer vannstrømmen fra varmepumpens kondensator til varmtvannstanken eller varmedistribusjonssystemet, avhengig av hva som er nødvendig. Prinsipielt eksempel av en varmepumpe med vekselventil er vist i *Figur .5*.



Figur 5. Prinsipiell utforming av væske/vann-varmepumpe med vekselventil og separat akkumulatortank for både romoppvarming og varmtvannsberedning [7].

For å redusere slitasje på komponenter i varmepumpeanlegget og sørge for jevnere drift, kan akkumuleringstank benyttes for lagre varmtvann. Ved hjelp av en varmeveksler i akkumulatortanken varmes vannet ytterligere opp. Akkumulatortank kan være hensiktsmessig ved varierende energipriser, ettersom tanken kan lagre varme ved lavere energipris og benytte seg av varmen i tilfeller der energiprisen er høy.

Blant distribusjonssystemene skiller man vanligvis mellom lav- og høytemperatur system. Et lavtemperatursystem (30-50 °C) benyttes til å dekke romoppvarming, derimot må tappevann ha et temperaturnivå opp mot 60-65 °C. Et slikt temperaturnivå er nødvendig for å forhindre oppblomstring av legionella bakterier [9]. Det innebærer at lavtemperatursystem må ha parallelt eller seriekoblet system, eventuelt en tilknytning til en varmtvannsbereder som hever tappevannstemperaturen [13].

2.4 Varmepumpeløsninger

Varmepumpeanlegg kan kategorisere etter hvilken varmekilde anlegget benytter, samt etter hvordan varmen blir distribuert. Varmepumpeløsningene som er presentert i oppgaven er avgrenset til de alternativene som er utgangspunktet for oppgaven.

2.4.1 Luft/vann-varmepumpe

Luft/vann varmepumpeanlegg benytter uteluft som varmekilde. Varmen som blir generert fra varmepumpen avgis ved oppvarming av vann. Det oppvarmede vannet kan benyttes til romoppvarming (via vannbåren gulvarme, radiatorer eller konvektorer), men også til å varme opp tappevann. Luft/ vann varmepumper gir et godt inneklima, men installasjon av varmedistribusjonssystem kan være forbundet noe høyere investeringskostnader sammenlignet andre varmepumpe alternativer.

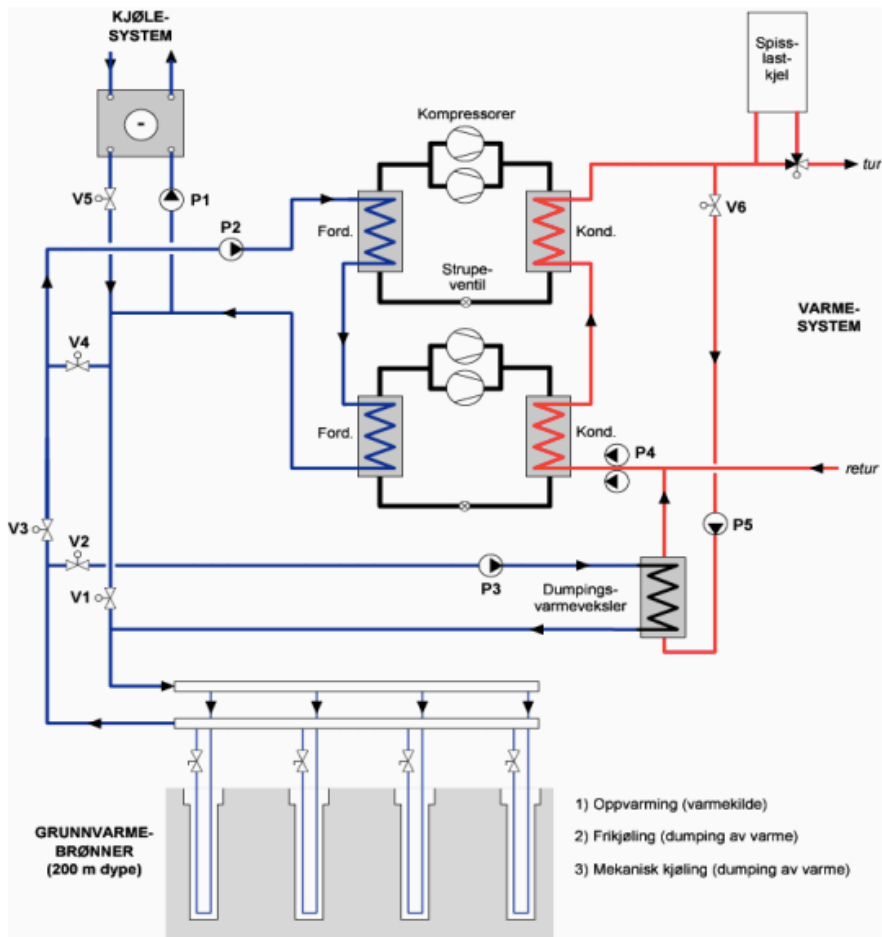
Ulempen ved å benytte uteluft som varmekilde, er knyttet til temperaturvariasjonene gjennom en fyringssesong. Der temperaturen på uteluften om vinteren er i motfase med byggets oppvarmingsbehov [6]. Noe som medfører en lavere effektfaktor. Den laveste driftstemperaturen for uteluftvarmepumper ligger mellom -15 og -25 °C [6]. Slik at luft/vann-varmepumpe egner seg best i klima med mildere vintre. Ved sommerstid kan en reversere varmepumpeprosessen slik at en kan levere kjøling til bygget.

Utforming til mindre luft/vann-varmepumpe kan variere mellom to systemløsninger. Direkte systemløsning innebærer at ute-enheten (fordamper, vifte, kompressor) og inne-enheten (kondensator) er sammenkoblet med en lukket rørkrets. Alternativt kan en benytte såkalt indirekte løsning som innebærer inne-enheten (væske/vann-varmepumpe), som er koblet med en ute-enhet (luftvarmeveksler, luftkjøler) via en lukket rørkrets med frostvæske (sekundærkrets) [10].

2.4.2 Væske/vann- varmepumpe

Væske/vann-varmepumpe benytter grunnvarme som varmekilde. Det hentes fra berg, jord, løsmasser eller vann. Varmepumpen løfter temperaturen og varmen leveres til bygningens romoppvarmingssystem og tappevannsystem. Grunnvarme er magasinert solenergi i grunnen [14]. I tillegg er det et varmebidrag fra spalting av radioaktiv elementer i berggrunnen [15].

Ved grunnvarme har man tilgang til stabil temperatur, i motsetning til lufttemperatur som vil variere i løpet av et år. Temperaturen i grunnen er ca 1-2 °C høyere enn lokalt årsmiddel lufttemperatur [15]. Hvor gjennomsnittets temperaturen i jorden kan være mellom 3-7°C [16]. Noe som gir gode forutsetninger for oppvarming og frikjøling. *Figur 6* viser prinsipielt eksempel av design av et væske/vann- varmepumpeanlegg med energibrønner.



Figur 6. Prinsipielt eksempel av design av et væske/vann varmepumpeanlegg [17].

Væske/vann-varmepumpeanlegg medfører en større investeringskostnad sammenlignet med andre varmepumpeanlegg. Men til gjengjeld har anleggene lave livssyklus-kostnader, samt anleggene er svært driftssikre.

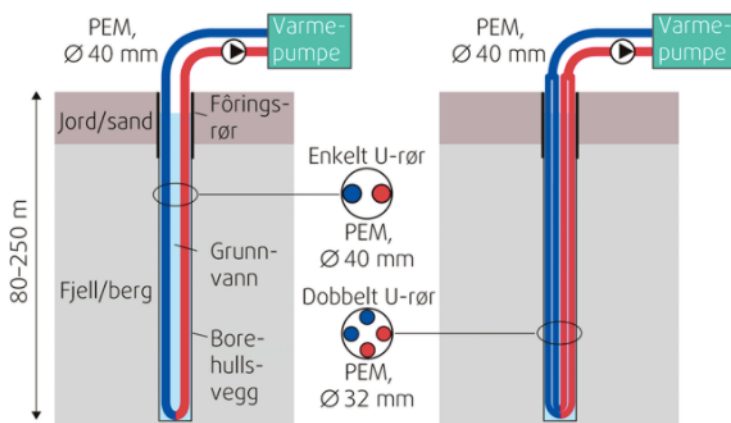
Kostnadene for væske/vann- varmepumper er knyttet til energibrønnene. Herunder kan kostnadene knyttes til forundersøkelser av grunn, boring, grøfter, varmepumpe og montering [14]. Det blir anslått at boring i fast fjell koster ca. 150-250 (uten mva) kr pr meter, derimot representere stabilisering av løsmassedekket ned til fjelloverflaten en større kostnad. Hvor det blir anslått at kostnadene er tre-fem ganger større enn boring i fast fjell [14].

2.5 Grunnvarme

De to vanligste metodene for å varmeuttak fra grunnen kan kategoriseres i åpent- og lukket system. Disse grunnvarmesystemene henter varme fra grunnvann og borehull ned til 200-300 meter dybde. Varmeuttak med brønner som er enda dypere omtales som geovarme, og vil ikke vektlegges videre i oppgaven.

2.5.1 Lukket system

Et lukket grunnvannssystem består av energibrønner, der borehullene er fylt med en kollektor slange med frostsikker væske. Den frostsikre væsken sirkulere i kollektor slangen og avgir varme fra energibrønneren til varmepumpen. Med et slik system kan varme eller kulde transporteres mellom berg og borehull som følge av konduksjon [18]. Figur 7 illustrer hvordan kollektorslange i plastrør (PEM) er installert i borehull.



Figur 7. Bergvarmepumpe med ulik utforming av kollektorslanger [6].

Energipotensialet til energibrønnene avhenger av de lokale geotermiske egenskapene til berggrunn [15]. Variasjonen mellom bergartene sin varmeledningsevne er relativt store, der innholdet av mineralet av kvarts avgjør berggrunnens varmeledningsevne. Kvartsrike bergarter som sandstein kan ha varmeledningsevner på mer enn 6 W / m K [15]. Videre avhenger energipotensialet av temperaturdifferansen mellom fjell og væske, grunnvannstrømninger, grunnvannsspeilets nivå og sprekkeforhold i fjellet.

Avhengig av nevnte forhold kan det estimeres at gjennomsnittlig varmeuttak per meter vannfylt borehull er $30 - 40 \text{ W/m}$ [6]. Disse egenskapene legger forutsetningen for design av brønnparken med hensyn til borehullets dybde, antall brønner og brønnavstand.

2.5.2 Åpent system

Grunnvarmeanlegg med åpent system pumper vann fra borehullet opptil varmepumpen, som overfører varmen direkte eller indirekte i varmepumpesentralen. Et slikt system basere seg på akvifer (grunnvannsmagasin), hvor energipotensialet avhenger blant annet av vanntemperaturen, vannmengde og vannkjemien.

Det som er fordelaktig er at vannet er i direkte kontakt med omliggende berggrunn i borehullet, slik at en kan få god varmeveksling. Dersom omgivelse forholdene er tilstrekkelig, foretrekkes grunnvann [14]. Grunnet stabil temperatur gjennom året og muligheter for frikjøling.

Utfordringene er knyttet til begrenset tilgjengelighet av grunnvannsmagasiner. Områder med sprekker i fast fjell og- / eller i nærheten av elver har god tilgjengelighet til magasiner. Ulempen er knyttet til risikoen for at effekten til varmepumpen svekkes på grunn av belegg og gjenslamming. Deriblant er slike anlegg særlig utsatt for korrosjon og biofilm belegg, som følge av vannkvaliteten. Det er derfor viktig å ta vannprøver for å kontrollere kvaliteten. Ytterligere kan det også være risiko for setningsskader ved store vannuttak [19].

2.5.3 Termisk responstest

Termisk responstest gjennomføres ofte for å avdekke faktorer som er sentral ved dimensjonering av grunnvarmeanlegg [18]. Blant annet gir testen svar på:

- Termisk borehullsmotstand (R_b)
- Effektiv varmeledningsevne (λ_{eff})

Termisk borehullsmotstand er en faktor som angir hvor effektivt kollektoren kan transportere varme. Lav borehullsmotstand gir god varmetransport. Effektiv varmeledningsevne for energibrønn beskriver berggrunnens varmeledningsevne og eventuelle tilskudd fra grunnvann. Varmen transporteres mellom kollektor og berggrunn ved hjelp av konduksjon og konveksjon. Termisk responstest gjennomføres ved å tilføre varme i borehullet via kollektorvæsken som sirkulerer i borehullets kollektorslange. Basert på temperaturendringen i borehullet registreres varmetransporten og den termisk motstand.

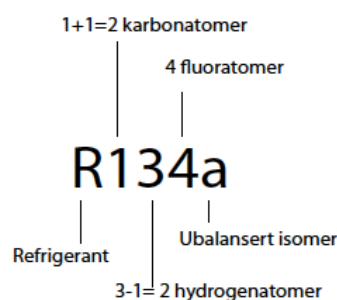
For å kunne utnytte energien maksimalt, må motstanden reduseres mellom omliggende berggrunnen og varmebærende væske (kollektor). Ved å benytte materialer med god ledningsevne og en kollektorslange med liten tykkelse, oppnår en god varmeoverføring. I tillegg er det viktig at det er turbulent strømning i kollektor slangen, grunnet det reduserer den termiske motstanden [20].

2.6 Arbeidsmedier

Ved bestemmelse av arbeidsmedier til en varmepumpe er det flere egenskaper til arbeidsmediet som er vesentlig for prosjektering, drift og energibesparelse. Samtidig må en også ta hensyn til arbeidsmediene sin påvirkning av miljø- og sikkerhet

2.6.1 Klassifisering og benevnelse av arbeidsmedium

Arbeidsmediene betegnes ved R-nummersystemet i henhold til *American Society of Heat, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) og har offisiell betegnelse «Rxyz» [11]. Systemet beskriver den kjemiske sammensetningen av mediet. Der R står for Refrigerant, x angir antall karbonatomer minus én, y angir antall hydrogenatomer addert med én og z angir antall fluor atomer [11]. Som illustrert med arbeidsmedium tetrafluoretan (R134a) i *Figur 8*. Dersom det står bokstavene a, b, eller c etter tallverdiene betegnes det som isomer. Zeotrope medier blir beskrevet med bokstavene A, B og C, samt nummert fra 400 til 500.



Figur 8 Benevnelse av arbeidsmediet tetrafluoretan.

Uorganiske arbeidsmedier betegnes ved nummert syv etterfulgt av molvekten. Eksempelvis betegnes nitrogen som R728 ettersom nitrogen har molvekt 28 kg/k mol [11].

2.6.2 Naturlige og syntetiske arbeidsmedier

Arbeidsmedier kan inndeles i to grupper, syntetiske og naturlige arbeidsmedier [6]. Syntetiske arbeidsmedier er halogenerte hydrokarboner, HFK (HydrogenfluorKarboner) [6]. Disse arbeidsmediene har vært mye benyttet på grunn av deres gode termofysikalske egenskaper. Ulempen er ved eventuelle lekkasjer av syntetiske arbeidsmediet, vil de kunne bidra til drivhuseffekten. I motsetning finnes de naturlige arbeidsmediene allerede i jordens biosfære og har ikke påvirkning på det globale miljøet ved eventuell lekkasje. Arbeidsmediene sine egenskaper kan blant annet kategoriseres som følgende [21]:

- **Kjemisk:** kjemisk stabil og kompatibel med materialer.
- **Helse og sikkerhet:** giftfri og brennbarhet .
- **Miljø:** Påvirkning på ozonlaget, Ozon depleting Potential (ODP) og effekt på global oppvarming, Global Warming Potential (GWP).
- **Termofysikalske egenskaper:** varmekapasitet, viskositet, konduktivitet, normalkokepunkt, molekylvekt.
- **Annet:** kompatibel med oljer og smøremidler, vannløselighet, frysepunkt, pris og tilgjengelighet.

2.6.3 F-gassforordning

Som følge av HFK gasser sin påvirkning på miljøet, er bruken av gassene blitt strengere regulert i Norge. I 2010 ble det innført F-gassforordning for alle EØS landene [22]. Forordningen har som mål redusere utslippene av fluorholdige klimagasser (f-gasser), deriblant HFK gasser. Dette innebærer en utfasing av F-gasser, og at mengden utslipp skal være redusert med to tredjedeler innen 2030 [23]. Blant annet er det innført krav om sertifisering av personell og importrestriksjoner på gasser som har høyt oppvarmingspotensial (GWP).

De naturlige arbeidsmediene slik som karbondioksid (CO_2 , R744), ammoniakk (NH_3 , R717), og propan (R290) har som nevnt tidligere, ingen påvirkning på den globale oppvarmingen. Derimot medfører de andre utfordringer, blant annet medfører de naturlige arbeidsmediene sikkerhetstiltak og/eller behov for ekstraordinær utforming varmedistribusjonssystem.

2.6.4 Sikkerhetsklasser

Arbeidsmediene deles inn sikkerhetsklasser med hensyn til giftighet, brennbarhet og eksplosjonsfare) [24]. Hvor sikkerhetsklassene inndeles etter bokstavene A eller B, som representerer giftigheten til mediet. Medier i sikkerhetsklasse «B» kategoriseres som giftig og medier i sikkerhetsklasse «A» kategoriseres som ikke giftig.

Arbeidsmediene deles videre inn etter inn etter hvor brann- og eksplosjonsfarlig mediene er [24]. Der mediene rangeres fra 1, 2, 2L og 3. Hvor medier i klasse 2L og oppover er brennbare.

Til tross for at det svært sjeldent er lekkasjer og alvorlige ulykker, er arbeidsmedium generelt underlagt strenge krav med hensyn til miljø og sikkerhet. Avhengig av arbeidsmedium for varmpumpeanlegget, må maskinrommet tilrettelegges ulike bygningsmessige og tekniske tiltak. Deriblant deteksjonssystem, alarmsystem, nødventilasjon, trykkavlastningsflater, ROS-analyser med mer [25].

2.6.5 Arbeidsmedienes egenskaper

De naturlige og syntetiske arbeidsmediene representerer ulike fordeler og ulemper. De mest alminnelige arbeidsmediene benyttet i varmpumper har følgende egenskaper:

Ammoniakk (NH₃, R717) har gode termofysikalske egenskaper og kan oppnå 5-10 % høyere COP sammenlignet med varmpumpeanlegg med HFK medier [17]. Dessuten bidrar ikke arbeidsmediet til drivhuseffekten (GWP og ODP = 0) ved utlipp. Varmepumpeanlegg for større bygg med ammoniakk er ofte gunstig.

- Kritisk trykk og temperatur hhv. 114,2 bar og 133 °C [26]

Ulempen ved ammoniakk er at mediet er klassifisert i sikkerhetsklasse B2L (giftig, brennbart). Ved lekkasje av ammoniakk er det en særegen lukt som kan medføre panikk [27]. Maskinrommet må derfor prosjekteres med nødvendig sikkerhetsbarrierer, eksempelvis gassdeteksjon, nødventilasjon og alarmsystem.

Propan (R290) er ekstremt brennbar og eksplosiv. Mediet blir kategorisert i sikkerhetsklasse A3 [28]. Noe som medfører strenge krav til bygningsmessige tiltak og sikkerhetsbarrierer. De termofysikalske egenskapene til propan er relativt lik de bedre syntetiske arbeidsmediene. Noe som gir høy energieffektivitet og driftssikre anlegg.

- Kritisk trykk og temperatur hhv. 42,5 bar og 96,8 °C [26]

Karbondioksid (CO₂, R744) er et giftfri og ubrennbart arbeidsmedium, og medfører derfor ikke ekstraordinære tiltak. Dermed kategoriseres karbondioksid i sikkerhetsgruppe A1. I tillegg er karbondioksid et miljøvennlig arbeidsmedium (GWP = 1) [11].

- Kritisk trykk og temperatur hhv. 73,8 bar og 31,3 °C [26]

Ettersom CO₂ varmepumper har høyt kritisk trykk, vil varmepumpen ha 5-10 ganger høyere trykk enn de andre naturlige arbeidsmediene [17]. Slik at ved normal drift vil varmepumpen avgi varme ved overkritisk trykk. Det medfører at mediet nedkjøles i gasskjøler istedenfor kondensator.

R407C er et blandingsmedium av flere medier og betegnes som zeotrop. Det innebærer at arbeidsmediet fordampner og kondenserer over et område med konstant trykk. Fordampning og kondensering skje ved glidende overganger og kalles ofte «glidende medier». R407C har en GWP-verdi på 1530 og inngår ikke i de mediene som blir forbudt fra 2030. Dette skyldes at arbeidsmediet har en GWP-verdi lavere enn 2500 [29].

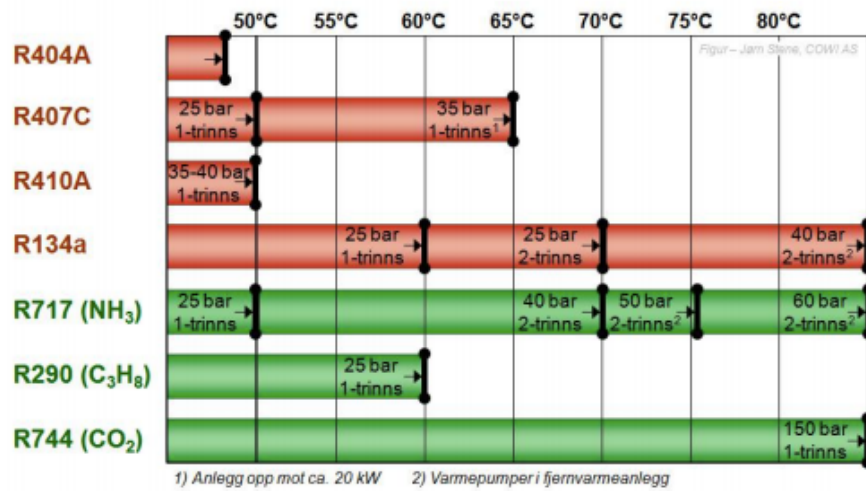
- Kritisk trykk og temperatur hhv. 46,2 bar og 86,1 °C [26]

R410A er også et blandingsmedium og er et av de mest brukte syntetisk arbeidsmediene. Mediet har egenskaper som gir muligheter å utforme anleggene med kompakte komponenter [11]. Ved utslipp av mediet vil det bidra til drivhuseffekten, og er klassifisert med GWP-verdi 1730, men har en ODP-verdi på 0.

- Kritisk trykk og temperatur hhv. 49,6 bar og 72,5 °C [26]

2.6.6 Temperatur begrensning

Bruksområdet til varmepumpeanlegget bestemmes av blant annet maksimal utgående vanntemperatur fra kondensator [17]. Maksimal utgående temperatur fra kondensator avhenger av arbeidsmediet, kompressorens trykklasse, type kompressor og gasstemperaturen fra kompressor. *Figur 10* viser noen arbeidsmedier sin maksimale utgående vanntemperatur fra kondensator. Eksempelvis kan propan (R290) varmepumpe levere varme opp til 60 °C.



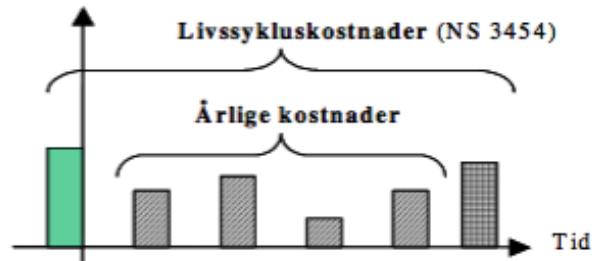
Figur 9. Temperaturbegrensning til ulike arbeidsmedier [9].

Utgående vanntemperatur i varmedistribusjonssystemet har stor påvirkning på effektfaktoren (COP) varmepumpeanlegg. Det vil si ved økende kondenseringstemperatur eller reduserende fordampningstemperatur avtar effektfaktoren ved 2-3 % per grad (°C). Noe som betyr at det fordelaktig å benytte en varmekilde med høy temperatur og varmen levers ved moderat temperatur [6].

I tillegg må ikke returtemperaturen være større enn maksimal utgående vanntemperatur, ettersom det kan medføre at varmepumpeanlegget slås av og effektbehovet må dekkes med spisslast [30].

2.7 Livssyklus kostnader

Livssyklus kostnader (Life Cycle Cost, LCC) defineres som alle kostnader som inntreffer over byggets levetid, som illustrert ved *Figur 11* [31]. Livssyklus kostnader kan beregnes ved hjelp av årskostnader i henhold til NS 3454 *Livssyklus kostnader for byggverk* [32].



Figur 10. Kostnader for et bygg gjennom et livsløp [31]

Ved hjelp av metodikken kan man evaluere alternativene, samt gi beslutningstakerne større mulighet til å fatte riktig beslutning med hensyn til framtidig drift, vedlikehold og utvikling av energiforsyningssystemet.

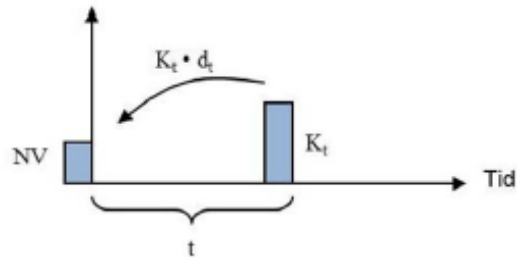
2.7.1 Netto nåverdi for kostnader i analyseperioden

Lønnsomhetsberegningen bygger på netto nåverdimetoden. Nåverdimetoden er metodikk for å beregne hvor mye framtidige inntekter er verdt i forhold til dagens kurs. Netto nåverdi beregnes ved å hjelp av diskonteringsrenten, som vist i formel 3.

$$d_t = \frac{1}{(1+r)^t} \quad (3)$$

Hvor:

| | |
|-------|---|
| d_t | diskonteringsrenten |
| r | kalkulasjonsrenten |
| t | er et gitt antall år (antall år fra basis året) |



Figur 11. Diskontering av fremtidige kostnad til nåverdi [31]

Netto nåverdi (Net Present Value, NPV) av alle utgifter og inntekter i analyse perioden uttrykkes som vist i formel 4.

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (4)$$

Hvor:

| | |
|-------|-----------------------------|
| I_0 | Investeringsutgiften |
| C_t | Kontantstrømmen i år |
| r | kalkulasjonsrente |
| n | Levetiden til investeringen |

2.7.2 Kalkulasjon av levetidskostnad (K) og årskostnad (ÅK)

I henhold til NS 3454 beregnes levetidskostnadene som vist ved likning 5.

$$K = K_0 + \sum_{t=0}^T [(1+r)^{-t} \cdot FDVU_t] - R(1+r)^{-T} \quad (5)$$

Hvor:

| | |
|----------|---|
| K_0 | er prosjektkostnaden (investeringskostnad) |
| t | er antall år fra ferdigstillestidspunkt |
| T | er brukstiden (levetiden) |
| r | er kalkulasjonsrente |
| $FDVU_t$ | er det enkelte års forvaltnings, drifts, og vedlikeholds- og utviklingskostnader. |
| R | netto salgsverdi av bygningen |

Multiplisere man levetidskostnaden (K) med annuitetsfaktoren (b) får vi årskostnaden (ÅK) [33], som vist ved likning 6.

$$\dot{A}K = K \cdot b = K \cdot \frac{r}{1 - (1 + r)^{-T}} \quad (6)$$

Hvor:

| | |
|------------|--|
| $\dot{A}K$ | er årskostnader |
| K | er levetidskostnad |
| b | er annuitetsfaktor |
| T | er analyseperiode (antall år regnet fra basisåret) |

Årskostnad defineres som de gjennomsnittlige kostnadene inkludert renter og avskrivninger av kapitalen som påløper bygning [33]. Årskostnad må ikke forveksles med de årlige kostnadene ettersom de periodiske tiltakene varierer fra år til år.

2.7.3 Lønnsomhetsvurdering

Dersom investering skal være lønnsom må netto nåverdisummen være positiv ($NPV > 0$).

2.8 Tilskuddsordninger

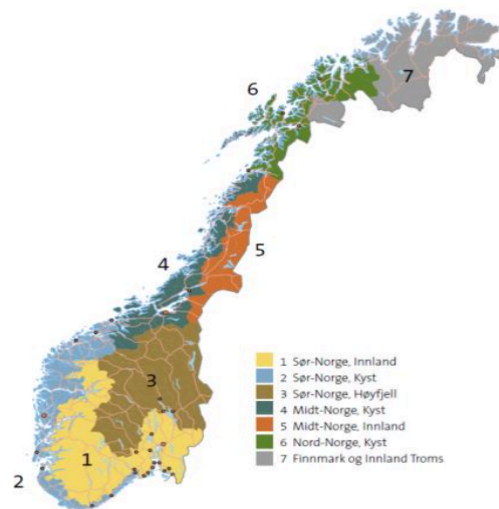
Statelig tilskuddsordninger er insentiver for at bedrifter og privatpersoner skal velg løsninger som er basert på fornybare kilder. Dette er et av tiltakene som skal bidra til bærekraftige løsninger og sikre omstillingen til et lavutslipp samfunn.

Enova SF er et statsforetak som har som mål bidra til å få redusert klimagassutslipp som bidrar til å oppfylle Norges klimaforpliktelser for 2030 [34]. Varmesentraler er et av tiltak Enova gir støtte for. Herunder gis det støtte til væsk/vann varmepumper på 1600 kr/kW. Bedrifter o.l. kan få 2 millioner i støttesats. Der Enova støtter inntil 45 prosent [35].

2.9 Klima

Norge er et langstrakt land og med landsdeler med ulike klimasoner, som vist i *Figur 13*.

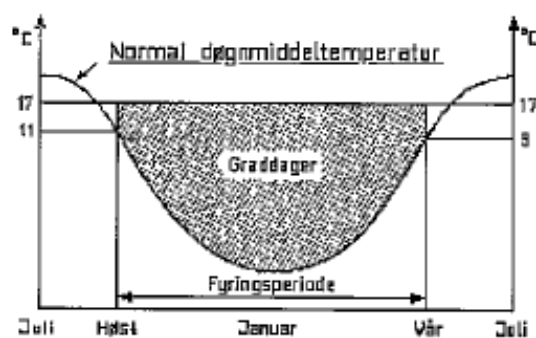
Bygningers energibehov er et samspill mellom klima, og der behovet for romoppvarming og ventilasjon er klimaavhengig parametere. For å kunne forstå og sammenligne bygningers energibehov mellom ulike landsdeler, må en vite hvilke parametere som legges til grunn.



Figur 12. Oversikt over de syv klimasonene i Norge [36].

Variasjonen i klima hos de ulike landsdelene, har medført at det er definert syv ulike klimasoner i Norge [37]. Hvor følgende kriterier er lagt til grunn for klimasonene:

- **Dimensjonerende utetemperatur (DUT):** kaldeste tredagers temperaturmiddel i løpet av 30 års-periode
- **Normal årsmiddeltemperatur:** gjennomsnitt av årets døgnmiddeltemperatur over 30 års-periode [38]
- **Fyringssesongens lengde:** antall dager med oppvarmingsbehov
- **Gradagstall:** utrykk for oppvarmingsbehov, som vist i *Figur 14*. Benyttes for å sammenligne energibruken per år [39].



Figur 13. Graddøgn som funksjon av normal døgnmiddeltemperatur og fyringssesong [39]

For å kunne sammenligne to identiske bygg som er lokalisert i to ulike steder, kan benytte graddagskorrigerering. For eksempel har bygg i Sør-Norge (høyfjell) 1,26 ganger høyere årlig varmebehov enn i Oslo [40].

Vestlandsk klima er definert som temperert klima. Det innebærer blant annet et klima som preget av vær og vind. I tillegg har Sør-Norge (kysten) lavest graddagstall sammenlignet med de andre klimasonene i Norge. Noe som er et godt utgangspunkt for varmepumper som skal dekke energibehovet bygninger lokalisert i Sør-Norge.

3 Metode

Programvarene som er benyttet for beregning av casestudiet (boligblokken) blir presentert og gjennomgått. I tillegg redegjøres det for fremgangsmetoden for litteraturstudiet.

3.1 Litteraturstudie

Utgangspunktet for litteraturstudien ble gjennomført med hensyn til suksesskriterier for å lykkes med luft som varmekilde. Fremgangsmetoden var å undersøke relevante nasjonale - og internasjonale forskningsartikler, rapporter, studier o.l. basert på enkelte nøkkelord. Det ble benyttet følgende søkeord:

- *Acoustics, noise, vibration*
- *Corrosion, climate, weather, cathodic and anodic protection*
- *Defrosting, heat gas, ice*

Det ble benyttet søkemotorer som *Researchgate, Google Scholar, ScienceDirect* m.m. til å innhente relevant forskning og litteratur. Ytterligere ble det benytte institusjoner som SINTEF, Enova, Heat Pump Centre (HTC), Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE), Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) som kilder for litteraturstudiet.

Litteraturstudiet har vært en iterativ prosess gjennom hele oppgaven. Hvor relevante problemstillinger innenfor litteraturstudiet har blitt undersøkt og revidert, avhengig av behovet for utfyllende litteratur.

3.2 Simuleringsverktøy

Simuleringsverktøyene benyttet i oppgaven tillater å beregne omfattende bygg og tekniske løsninger på en effektiv og nøyaktig måte. Disse programmene er utbredt blant rådgivere, leverandører og til akademisk forskning m.m

Til tross for at simuleringsprogrammene er mye benyttet, representerer programmene ulike styrker og svakheter. Deriblant er beregningene basert på empiriske ligninger, samt de avhenger i stor grad av forutsetningene og antagelsene som er lagt til grunn.

Simuleringsprogrammene gir muligheten til å gjennomføre beregninger på en effektiv måte og etterprøve resultatene.

3.2.1 SIMIEN

SIMIEN (SIMulering av Inneklima og Energibruk i bygninger) er et norskutviklet energiberegningsprogram som evaluer bygninger mot kravene gitt i TEK17. Programmet er harmonisert etter Norsk Standard 3031. SIMEN karakteriseres som et dynamisk beregningsverktøy iht. leverandør [41].

Standarden (NS 3031) angir regler for beregning av bygningers energibehov. Herunder varmetapstall, totalt netto energibehov i et energibudsjett, levert energi til bygninger fordelt på ulike energivarer, primærenergibehov og CO₂-utslip [42].

3.2.2 CoolPack

Simuleringsprogrammet *CoolPack* er utviklet ved Danmarks Tekniske Universitet (DUT). Programmet gir brukeren muligheten til å gjennomføre ulike simuleringsmodeller for kjølesystemer. Hvor de ulike modellene lar brukeren analysere anlegget, eksempelvis dimensjonering av hovedkomponenter, energianalyse og optimalisering [43].

4 Litteraturstudiet

Litteraturstudiet tar for seg problemstillinger vedrørende luft som varmekilde for varmepumper. Problemstillingene er knyttet til utfordringer som oppstår som følge av klimatiske driftspåkjenninger. Blant disse utfordringene er det fokusert på korrosjon og frost, samt akustiske utfordringer fra varmepumper. Litteraturstudiet er basert på forskning og erfaringer.

4.1 Akustikk

4.1.1 Krav til akustikk

Krav til lydforhold fra varmepumper er gitt i Plan og bygningsloven (Pbl) og byggt teknisk forskrift (TEK17). Norsk standard 8175 [44] angir grenseverdier som kan benyttes for å kontrollere om bygninger tilfredsstiller funksjonskravene til TEK17. Standarden angir krav til ulike typer bygningskategorier og lydklasser fra A til D. Hvor lydklasse C er minimumskravet for å tilfredsstille TEK. Fra varmepumper skal lydnivået utendørs ikke overstige verdiene oppgitt i *Tabell 4.1* [44].

Tabell 4.1. Oversikt av bygningskategorier med tilhørende lydklasser [44]

| Bygningskategori | Klokken | Klasse C [dB] |
|--------------------|---------|---------------|
| Boliger | 23-07 | 35 |
| | 19-23 | 40 |
| | 07-19 | 45 |
| Skoler | | 40 |
| Barnehage | | 32 |
| Helsebygninger | | 40 |
| Overnattingssteder | | 45 |
| Kontorer | | 45 |

4.1.2 Persepsjon av lyd

Persepsjonen av lyd oppstår når trommehinnen blir satt i bevegelse på grunn av, lydbølger i lufta som stammer fra en lydkilde. De hørbare endringene av lufttrykket ved atmosfæretrykket kalles luftlyd [45]. Menneskets hørsel er mest sensitiv i frekvens område 1000 Hz. Det er derfor vanlig å frekvensveie målinger (A-veie), slik at frekvensområdene hvor hørselen har høy følsomhet tillegges høyere vekt, enn områder hvor følsomheten til øret er lav.

4.1.3 Varmepumpe som støykilde

Hovedkildene til støy fra en varmepumpe som benytter luft som varmekilde, er knyttet til de bevegelige delene i varmepumpen. Hvor kompressorene og viftene utgjør de komponentene som avgir mest støy [46] [47]. Sekundært kan støy knyttes til varmeveksler og ventiler.

Hvor mye støy som blir avgitt fra de enkelte varmepumpe avhenger av hvilken type kompressor og driftsforhold. Der kompressortyper og kapasitetsregulering vil påvirke støyforholdet. I tillegg vil klimaet også være en medvirkende årsak. Ettersom temperaturforholdene påvirker kapasiteten til varmepumper [48].

Viften vil i likhet med kompressoren måtte tilpasse seg forbrukeren og klimaet, for å kunne levere nødvendig luftmengde. Hvor samspillet mellom klima og viftens effekt er forhold som påvirker lydnivået.

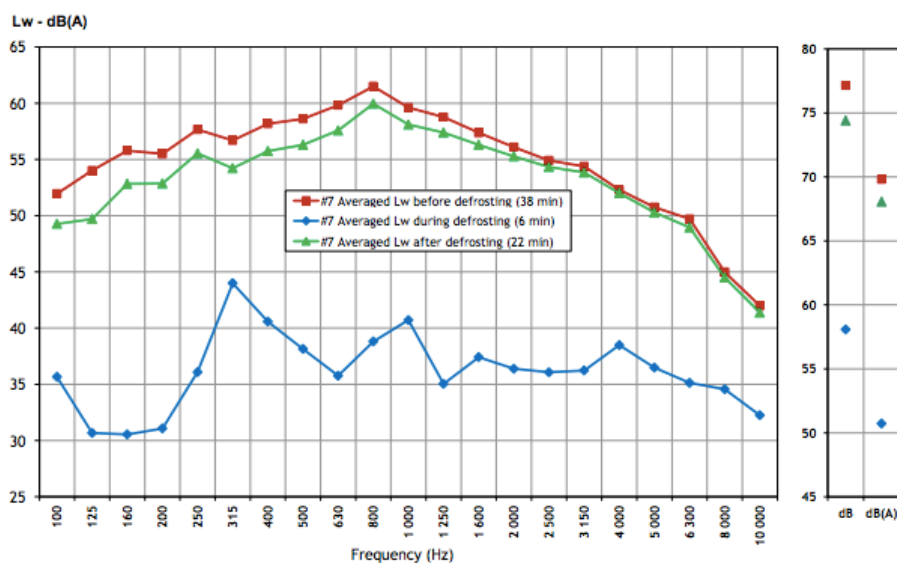
For grunnvarmeanlegg som benytter latent varme fra borehull som varmekilde, reduseres støynivået av naturlige årsaker. Ettersom grunnvarmeanlegg ikke har behov for vifter, elimineres støy fra viftene. I tillegg er kompressorbehovet mindre for grunnvarmeanlegg enn for anlegg med luft som varmekilde. Dette skyldes at grunnvarmeanlegg har tilgang på varmekilde med stabile temperaturer. Samtidig er grunnvarmeanlegg plassert innendørs i teknisk rom. Dette gir bedre forutsetninger for å isolere og redusere støynivået til omliggende rom [46].

4.1.4 Støy ved avrimingssyklus

Rapporten *Round Robin Tests* [47] gjennomførte forsøk av luft/vann- varmepumper for å evaluere resultatene av akustiske målinger i forhold til gjeldene standarder. *Figur 15* viser resultatene fra de akustiske målingene av ute-enheten. Målingene er inndelt i periodene før, under og etter avriming. Resultatene viser at frost på varmeveksler øker lydeffektnivået med ca 2 dBA, samtidig at kapasiteten på VP synker. I løpet av perioden hvor frost danner seg på

kompressoren var lydeffektnivået størst. Dette var målt ved lufttemperatur rundt 4 – 2 °C . Ved lufttemperaturer under 0°C, var det ikke målt økning i lydeffektnivå.

Under avrimingssyklusen var resultatene varierende og ga ustabile målinger på lydeffektnivået. Målingene viser at avrimingssyklusene produserer i gjennomsnitt 20 dBA lavere, enn ved lyd nivået ved slutten av frostdannelse perioden. Ved oppstartsperioden etter avriming viser målingene at lydeffektnivået er økt, som framstilt ved grønn kurve i *Figur 15*.



Figur 14. Resultater av lydeffektnivå av utedelen vedl avrimingssyklus. Rød linje er før frostdannelsen, blå linje under avriming og grønn linje er etter

Forsøkene viser at støynivået er størst i periodene før og etter avriming. Dette er et interessant aspekt ettersom forsøkene viser at lyd nivået er knyttet til at kompressoren må arbeide mer under disse driftsforholdene, og ikke nødvendigvis under selve avriming prosessen.

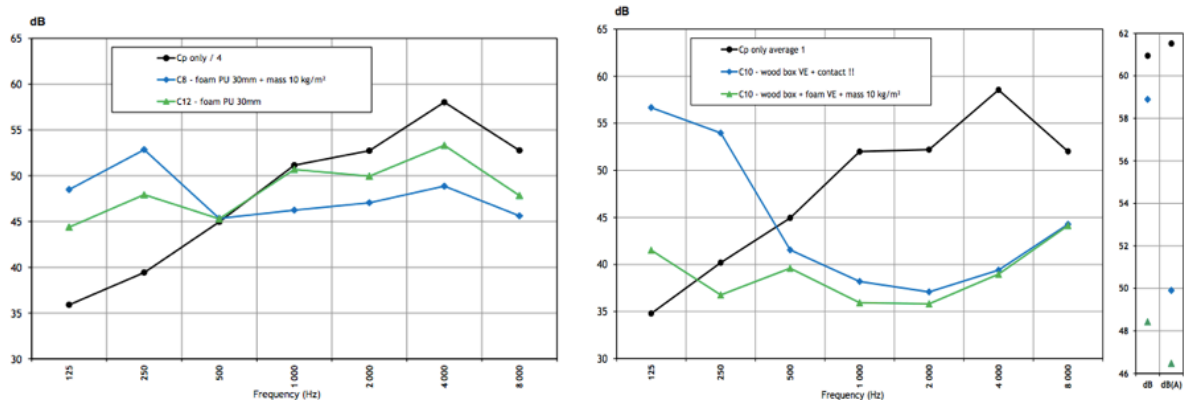
4.1.5 Kompressor støy

Wagner et.al [49] gjennomførte undersøkelser av en stempelkompressor og ulike passive tiltak for å redusere lydeffektnivået. De ulike strategiene for kompressor isolasjon involverte blant annet absorberende materialer og vibrasjonsisolasjon.

Figur 16 viser resultater fra de akustiske målingene av kompressor støy med ulike passive tiltak. Absorberende materiale av typen 30 mm viskoelastisk materiale, var mest effektivt for å redusere lavfrekvent støy, grønn kurve (t.v) i Figur 16

Kombinasjonen av absorberende lag og vibrasjonsisolasjon (EPDM gummi 10 kg/m²), reduserte støynivået hvor menneskets hørsel er mest sensitiv (1000- 5000 Hz) [50]. Denne kombinasjonen av materialer bidro ikke til mindre lavfrekvent støy, blå kurve (t.v) Figur 16. Sammensetning av støy i de ulike frekvens områdene gjorde det utfordrende å dempe lydnivået

Det ble også gjennomført målinger av lydeffektnivå med innbygget kompressor kombinert med - og uten akustisk isolasjon. Innbygget kompressor uten akustisk demping, resulterte i forsterket lavfrekvent støy, blå kurve (t.h) i Figur 16. Det skyldes at ledninger forsterket vibrasjonen. Innbygget kompressor med passive tiltak, oppnådde en best akustisk demping i hele frekvensområdet, grønnkurve Figur 16. (t.h). Målingene viser at innbygget kompressor med akustisk isolasjon kan en redusere lydnivået med 12 og 15 dBA, sammenlignet uten akustisk isolasjon.



Figur 15. Måling av lydeffektnivå med vibrasjonsisolasjon og absorberende isolasjon (t.v). Måling av lydeffektnivå med kompressor av treboks kombinert med passivtiltak (t.h) [49]

Forsøkene viser hvor utfordrende det er å dempe støy. Det skyldes sammensetning av støyen, og at isolasjon ikke klarer å dempe lydnivået i de ulike frekvensområdene. Samtidig illustrerer forsøkene hvor viktig det er med isolasjon og deres egenskaper.

4.1.6 Akustiske strategier

For å oppnå god akustisk dempning med hensyn til luft- og strukturlyd, er det flere forhold som må vurderes. De enkelte varmpumpeinstallasjonene må vurderes enkeltvis, herunder orientering til omliggende bygningsdeler (f. eks bakkenivå eller tak), byggetekniske forhold og klima.

Støy kan avstråles som luftlyd fra varmpumpehuset/kabinettet, eller via strukturlyd som forplanter vibrasjoner gjennom konstruksjonsdeler. I det følgende beskrives den akustiske håndtering for å begrense støynivået:

Viftestøy fra varmpumper involverer flere faktorer som må vurderes ved bestemmelse og planlegging. Blant annet vifte design, klimatiske forhold og orientering av varmpumpen med hensyn til omliggende bygninger m.m. Studier av viftestøy [49] viser at utformingen og geometrien av viftebladet har stor innvirkning på lydnivået. Hvor såkalte «backward-skewed blades» vifte i kombinasjon med varmeveksler flate rør og «plain fins» har størst påvirkning i lydnivået sammenlignet med andre kombinasjoner [51].

Installasjon av diffusere kan redusere støynivået og bidra til å gi bedre strømningsforhold som resulterer i et mindre trykkfall [52]. Blant annet viser målinger av vifter med «flow grid» (gitter) at det kan redusere lydnivået med 1- 3 dBA. Flow grid installeres på sugesiden, som vist på *Figur 17*. Et annet alternativ som kan benyttes er «Axitop» (kjegle), hvor målingene viser at viftene med kjegle økte luftmengde med 9 % og reduserte lydnivået med 7 dbA (ved dellast) [49]. I tillegg bør det monteres mansjetter for å minimere vibrasjon til andre bygningsdeler.



Figur 16. Vifte med Axitop (t.v) og vifte med flow grid (t.h) [49]

Støy fra luftinntak og avkast bør orienteres slik at støynivået reduseres med hensyn til nærmeste bebyggelse. Det er derfor essensielt å samarbeide med arkitekt og byggherre o.l. for å få tilpasset teknisk rom og/eller tak. Slik at støy ikke kan forplante seg til andre rom, eksempelvis via inntaksrist og avkast.

Dersom det er utfordringer å begrense viftestøyen kan en installere såkalte *lydsluse*. Lydsluse er i praksis en skjermingsvegg som tvinger lyden gjennom en smal passasje fylt med lydabsorberende materialer. Slusen er mer effektiv dersom den er lang og smal [48].

Varmepumpehus/kabinett må være tilrettelagt og tilpasset for varmpumpens tyngde og kompressor- og viftens turtall, slik at en unngår at kabinettet forsterker eventuelle strukturlydoverskridelser. Blant annet er vibrasjonsdempende kledning effektivt, samt å benytte vibrasjonsdempere som har 30 prosent høyere bæreevne enn varmpumpens vekt [48]. Herunder er stålfjærer eller gummidekk effektivt, avhengig av resonansfrekvensen. Stålfjærer og gummidekke egner seg i hhv. resonansfrekvens område 2-8 Hz og 7-35 Hz [53]. Rør og kanaler bør også vibrasjonsisoleres slik at en reduserer forplantning av lavfrekvent støy. I tillegg er det fordelaktig hvis varmpumpen kan installeres på en stødig og homogen flate [48].

For å oppnå god luftlydisolasjon er innvendig absorbenter i kabinettet effektivt, særlig nærme viften og kompressoren. Det er viktig å tilpasse isolasjon slik at tilgang til luft ikke blir blokkert. I tillegg bør leverandør kontaktes vedrørende installasjon av absorbenter, slik at garanti avtalen ikke bortfaller [48]. Ved effektiv vibrasjonsisolasjon og lydabsorbenter kan en redusere lydnivået med mer enn 20 db [49].

Støyskjerm kan potensielt redusere støyet opptil 5-10 dB, under visse forutsetninger [48]. Ved å benytte materialer som veier minst 12 kg/ m², samt at skjermen er «lufttett» og kontinuerlig i retningen mot den bygningen som skal skjermes. I tillegg må skjermen bestå av absorbenter, eksempelvis mineralull, perforert materiale (fiberduk o.l.). For å oppnå god skjerming mot andre bygg eller bygningsdeler (vindu o.l.) kan rådgivende akustiker kontaktes for beregning av oppbygning og posisjon av støyskjermen.

4.1.7 Oppsummering

Støy avstrålt fra varmpumper kan forplante seg både som luft- og strukturlyd, noe som medfører at tiltakene må dempe støy i mange frekvensområder. For å oppnå tilfredsstillende lydnivå kan følgende kriterier legges til grunn:

- Velge varmpumpe som oppfyller forskriftskravene uten ekstraordinære tiltak. Videre må en undersøke om leverandør kan dokumentere lydnivået ved andre driftsforhold, eksempelvis ved temperaturer under 0 °C.
- Inngå tidlig dialog med arkitekt, byggherre o.l. vedrørende utforming av teknisk rom med hensyn til luftinntak og avkast. Dersom anlegget skal plasseres tak eller på bakkenivå må det tilstrebes å orientere varmpumpen for å minimere støy til omliggende bygg [54].
- Støyskjerm kan potensielt redusere støyet opptil 5-10 dB, under visse forutsetninger. Ved å benytte materialer som veier minst 12 kg/ m², samt at skjermen er «lufttett» og kontinuerlig i retningen mot den bygningen som skal skjermes.
- Varmepumpehuset/kabinett må være tilrettelagt og tilpasset for varmpumpens tyngde, kompressor- og viftens turtall. Ved å benytte vibrasjonsdempende kledning og vibrasjonsdempere (stålfjærer eller gummidekke), samt innvendig absorbenter spesielt nærme viften og kompressoren kan en redusere lydnivået.
- Rør må være fleksible for å begrense vibrasjon, samt rør gjennom vegger og konstruksjonsdeler må være isolert.
- Benytte varmpumpe med lavt støynivå knyttet til viften, eventuelt vurdere å installere diffusere for å redusere støynivået.

4.2 Frost og avriming

4.2.1 Isdannelse

Utedelen av varmepumper er eksponert for klimatiske påkjenninger, disse påkjenningene kan medføre at is og frostlag danner seg på varmeveksler ved kaldere klima. Islag dannes ved lufttemperaturer rundt $\pm 0^{\circ}\text{C}$ og høy relativ luftfuktighet (65 %) [55] [56]. Ved disse forholdene vil fuktigheten i luften felles ut som frost på overflaten varmepumpen [7]. Det er spesielt i områder langs kyststrøk en kan forvente frost på utedelen, ettersom kystklima vil ha høyere luftfuktighet enn ved innlandsstrøk.

Konsekvensen av islag på ute-enheten (fordamper, lameller) er redusert varmeoverføring etterhvert som islaget øker i tykkelse. Sekundært kan islaget potensielt blokker lufttilgang mellom lamellene/finnen og gi et større trykktap. Som resultat vil viften få et større effektbehov og varmepumpens effektfaktor kan reduseres med 10 – 20 % [7].

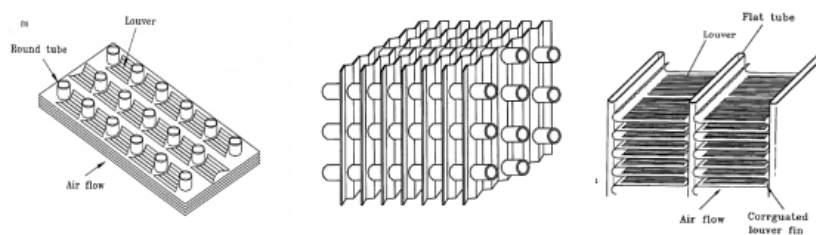
4.2.2 Avrimingsmetoder: passive og aktive metoder

Is dannet på ute-enheten bør fjernes slik at varmepumpen kan fortsette å levere varme effektivt og til tilstrekkelig mengde for å dekke varmebehovet. Teknikkene for å tine islag og begrense mengde is, kan kategorisere i aktive og passive metoder. Disse metoden kan gi en forbedret avriming prosess og opprettholde effektfaktor, samt bidra til at den termiske komforten i bygget opprettholdes.

4.2.3 Optimalisering av utendørs enhet

Varmeveksler bestående av rør/lamell er mye benyttet, som vist i *Figur 18* (t.v). Utformingen av varmevekslere har stor betydning i forhold til frostdannelse og avriming. Blant annet ruhet på inn- og utvending overflater, samt potensialet for drenering av fukt og vann. I tillegg vil avstand mellom finne/lamellene også påvirke avriming prosessen, ettersom små avstander kan hindre luftstrømning. Noe som kan bidra til flere avriming sykluser.

Ved å optimalisere fordampere er det stort potensial for å øke varmeovergangskoeffisienten, ettersom uteluften har høyest varmeovergangsmotstand. Fellesnevneren mellom de ulike metodene for å forbedre varmeovergangen, er å optimalisere finnen/lamellene og rør geometrien [57]. Blant annet viser studie av Watters et. al [58] at økt avstand mellom finnen/lamellen reduserte frostdannelsen. Hvor lamellavstanden bør ligge mellom 6 – 10 mm [59]. I tillegg rapporterte Sommers et.al [60] at en kan redusere varmeovergangsmotstand med 35 – 42 % ved hjelp av virvelgenerator. Disse medfører laminære strømninger ($Re = 500-1300$) ved fordampere.



Figur 17. Louverd finner, wavy finner og flate rør med louvered finner [61].

Figur 18 viser noen eksempler på utformingen av varmevekslere og finner (lameller). Sammenligner en effekten av varmeovergang mellom de ulike utformingen, kan en øke varmeovergang uten at merkostnadene øker. Undersøkelser av varmeveksler med «louvered finner» skiller seg ut med best varmeovergang, sammenlignet med glatte finner. Etterfulgt av «wavy finner» og «slit fin» [62].

4.2.4 Overflatebehandling

Overflatebehandling ved hjelp av nanoteknologi for å forhindre eller redusere isdannelse på utedelen av varmepumpen har vært et område under utvikling. Ved å optimalisere overflaten kan det bidra til å redusere energiforbruket, ettersom behovet for avriming reduseres. Blant overflatebeleggene skiller en mellom hydrofil og hydrofob. Hydrofil overflater har evnen til å tiltrekke seg eller absorberer vann [63]. Derimot har hydrofobe overflater egenskaper som er vannvisende [64].

Overflatebeleggene kan defineres ut ifra deres vinkel mellom vandrdåpen og overflaten. I de senere årene har ytterpunktene av overflatebeleggtypene fått mer fokus, det vil si såkalte

superhydrofil og superhydrofobt belegg. *Tabell 4.2* viser inndelingen av beleggene med hensyn til kontaktvinkel [65].

Tabell 4.2. Tilstandene for vann ved en fast overflate

| Overflate | Kontaktvinkel |
|------------------|---------------------------------|
| Superhydrofil | $\theta < 10^\circ$ |
| Hydrofil | $10^\circ < \theta < 90^\circ$ |
| Hydrofob | $90^\circ < \theta < 150^\circ$ |
| Superhydrofob | $\theta > 150^\circ$ |

Huang et al. [66] gjennomførte studie av varmeveksler med hydrofilt overflatebelegg og uten belegg. Det ble observert at frostdannelsen på varmeveksler ble betydelig forsinket med hydrofilt overflatebelegg sammenlignet med uten hydrofilt overflatebelegg. Imidlertid ble islaget på den hydrofile overflaten raskere dannet igjen etter den første avrimingsprosessen, sammenlignet med varmeveksler uten belegg. Det ble konkludert med at egenskapene til hydrofilt overflatebelegg medførte at vann ble liggende igjen mellom lamellene. Slik at vannet ble fryst etter den første avrimingsprosessen. Dette ble også observert fra andre studier. Blant annet fant Okoroafor et al. [67] at frost dannelse på kalde overflater utsatt for varme fuktige luftstrømmer kunne reduseres betydelig ved hjelp av hydrofilt belegg. Frosttykkelsen ble redusert med ca 10-30% sammenlignet med en ubehandlet metalloverflate. Imidlertid kan hydrofile overflater ha utfordringer ved at frosten som blir tint, blir liggende igjen på overflaten.

Superhydrofobt belegg er av interesse ettersom belegget skaper kontaktvinkel som større enn 150° slik at vandråper ruller enkelt av. Wang et al. [68] undersøkte frost og avrimingsprosessen på tre forskjellig aluminium lameller. Der to var overflatebehandlet med hydrofil og superhydrofob, mens den tredje var uten overflatebelegg. Studien rapporterte at superhydrofobt belegg hadde 79,82 % reduksjon av mengden av restvann på overflaten sammenlignet med hydrofil overflate. Det ble det konkludert at det var betydelig enklere å transportere bort kondensert vann med superhydrofobt belegg sammenlignet med dem andre.

4.2.5 Styring og deteksjon

De aktive tiltakene som benyttes til å detektere og starte avrimingsprosessen på varmepumper med luft som varmekilde, kan gjennomføres på ulike måter. Dette kan blant annet styres ved [69]:

- Registering av differanse av innløps luft- og fordampertemperatur.
- Tidsur som styrer lengden på avrimingsprosessen og antall intervaller. Ofte integrert med termostat som avbryter dersom temperaturen er tilstrekkelig
- Lufttrykk- og temperaturenhet som måler og styrer etter grenseverdier for både temperatur og mengden lufttilgang. Enheten aktivere avrimingsprosessen dersom disse kriteriene synker under grenseverdiene.

Uavhengig av deteksjonssystem og styringssystem er det essensielt at de virker etter sin hensikt. Dersom styring ikke fungerer etter sin hensikt kan en risikere å få en lavere effektfaktor (COP) og at spisslastkilden må dekke varmebehovet mens varmepumpen er under avriming [59].

4.2.6 Elektrisk avriming

Elektrisk avriming baserer seg på elektrisk oppvarming ved hjelp av elektriske varmeelementer plassert i nærheten av fordamperen eller integrert i lamellene. Kombinasjon av varmeelementene og luftstrømninger fra viften medfører at is tines ved hjelp av varmetransportene konveksjon, konduksjon og stråling.

Under avrimingssyklusen er det viktig at væsketilførselen til fordamperen stenges, slik at kuldemediet ikke kondenser under avriming. Plassering av varmeelementene er essensielt, slik at en kan konsentrere varmetransportene nøyaktig til overflaten. Metoden er relativt rask og er forbundet med lave produksjonskostnader. Ulempen med metoden er knyttet til «nedtid» for varmepumpen.

Eksperimentelle studier viser at varmestaver plassert mellom lamellene er mer effektiv enn varmeelement plassert foran fordamperen. Dette skyldes at varmen ble lettere transportert som følge av viften sitt bidrag. Noe som medførte en redusert avrimingstid og energiforbruk på hhv 62.1 % og 61 % [56].

4.2.7 Varmgassavriming

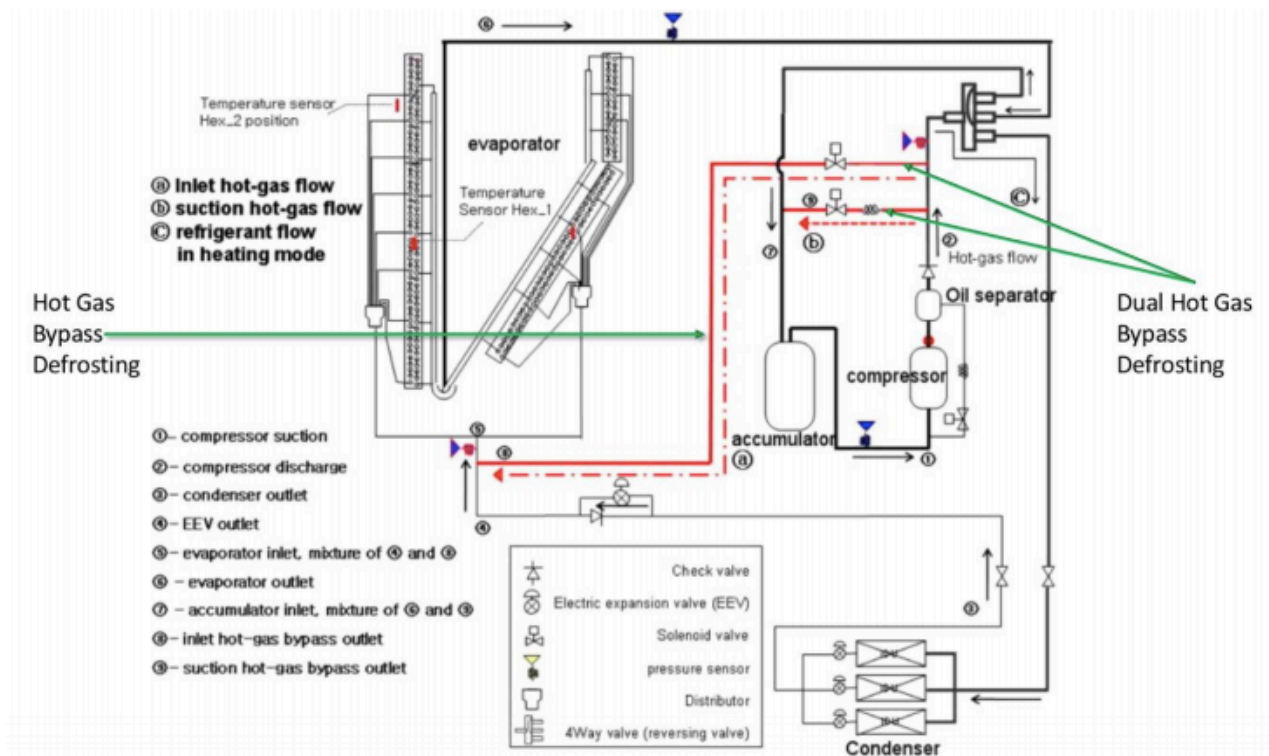
En av metodene for avriming er ved hjelp av varmgass. Ved å reversere varmepumpe prosessen, slik at varmgass ledes til fordampere og islaget tines på utedelen. Det vil si at fordampere vil fungere som kondensator og avgi varme [70]. I løpet av denne prosessen hentes varmen fra inn-enheten (kondensatoren). Dette kan medføre at kjølig luft strømmer til bygningen til tross for at viften er stanset. Metoden er effektiv og rask, men mengdene energi til å avrime og deretter gjenopprette innnetemperaturen kan være betydelig [71]. Dette avhenger av blant hvor stor tykkelsen på islaget og utelufttemperaturene er.

Det finnes ulike varianter av varmgassavriming og en annen måte er å benytte varmgass med by-pass ventil. Ventilen befinner seg etter kompressoren og leder varmgass direkte til fordampere. Som navnet antyder, omdirigerer varmegassen slik at en unngår kondensatoren i systemet.

«Dual Hot gas By-Pass» er en annen metode som bygger på samme prinsipp, hvor ledningen er koblet til innløpet av varmeveksleren og den andre koblet til utløpet av varmeveksleren, som vist i *Figur 19*.

Studier av Choi et al. [72] sammenlignet de nevnte avrimingsmetodene. Hvor studien viste at avrimings tid var kortest ved å reversere varmepumpe prosessen (419 s), etterfulgt av «Dual Hot gas By-Pass» (526 s). Metoden varmgass med by-pass (914 s) brukte lengst tid av dem tre.

Metoden «Dual Hot gas By-Pass» brukte minst tid når en tar hensyn til gjenoppretelse av normal drift, og brukte 585 sekunder. Dernest brukte reversert varmgassavriming totalt 615 sekunder. Varmgass med by-pass var metoden som tok lengst tid med 978 sekunder. I tillegg viste studien at avriming med Dual Hot gas By-Pass er 13 % mer energieffektiv enn reversert prosess.



Figur 18. Skjematisk oppbygging varmepumpe med dual Hot gass By-pass [72]

4.2.8 Termisk energilagring PCM

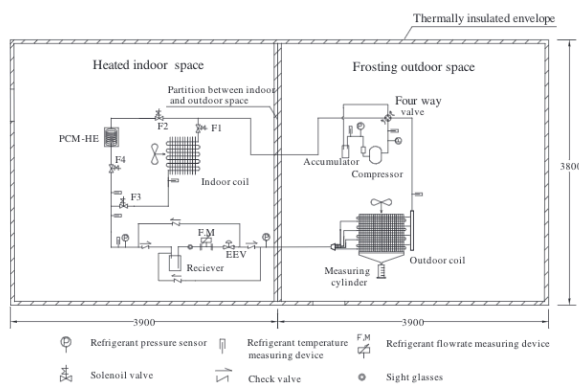
Termisk energilagring (TEL) er en metode som omfatter å lagre energi som ved et seinere tidspunkt kan brukes til oppvarming, kjøling eller kraftproduksjon [73]. TEL kan kategoriseres i følbare varmelagring, termokjemisk lagring og latent varmelagring.

Latent varmelagring baserer seg på faseendingsmaterialer (Phase Change Material, PCM). Ved hjelp av PCM kan en lagre store mengder varme uten at materialene selv øker temperaturen, rundt smeltepunktet. PCM er et materiale som gjennomgår en faseendring ved en gitt temperatur, som frigjør varme til omgivelsen eller mottar varme. Når prosessen er reversert, f.eks. fra væske til fast stoff, frigjøres denne varme. Disse faseendringene kan være fra fast stoff – væske, væske – damp og/eller vice versa [74]. Faseendingsmaterialene kan klassifiseres i tre hovedgrupper; organiske forbindelser, uorganiske forbindelser og eutectics.

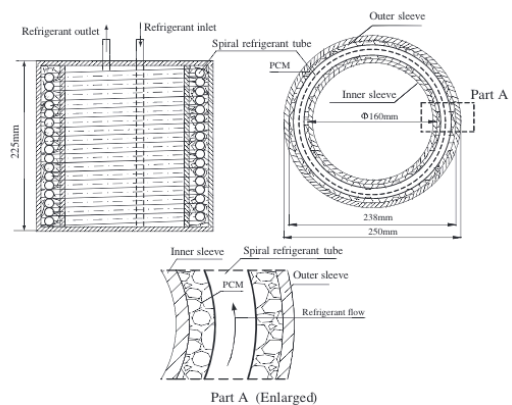
Ved å utnytte faseendringsmaterialene sine egenskaper i varmepumpeanlegg, kan det brukes til å forbedre avrimingsprosessen. Med PCM kan en oppnå flere fordeler, blant annet redusere avrimingstiden, unngå slitasje på komponenter og opprettholde termisk komfort i rommet. En varmepumpe med PCM vil ha varmelagringskapasitet og avgi varme (energi) under avrimingsprosessen.

Minglu et al. [75] gjennomførte avrimingsforsøk med PCM varmeveksler i parallell med inn-enheten (kondensator), som vist *Figur 20 og 21*. Varmeveksleren var av typen spiralvarmeveksler, hvor spiralene besto av PCM og sirkulerende arbeidsmedium i rørene.

Det ble benyttet faseendringsmateriale som tilhører kategorien uorganisk PCM ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, salthydrot). Materialet ble benyttet ettersom det har gode termiske egenskaper. Blant annet med lavt smeltepunkt ($T_s = 29 \text{ }^\circ\text{C}$) og høy smeltevarme ($L = 190,8 \text{ kJ/kg}$). Samtidig er materialet forbundet med lave kostnader og ikke korrosiv med kobber.



Figur 19. Skjematisk oppbygning av forsøket [75]



Figur 20. Figur Oppbygning av varmeveksler med PCM [75]

PCM varmeveksleren absorberer overskuddet av varmen fra kondensatoren under normal drift. Ved avriming, reverseres varmepumpe prosessen og PCM varmeveksleren benytter den lagrede varmen til å fungere som fordemper og utedelen fungerer som kondensator [76].

Minglu et.al rapporterte at avriming med PCM reduserte tiden med 36,4 % sammenlignet reversert avrimingsprosess. Det ble i tillegg konkludert at avriming med PCM ga en bedre termisk komfort og høyere innelufttemperatur.

Wenju et al. [77] gjennomførte samme forsøk med faseendringsmateriale som Minglu. Avrimingstiden med faseendringsmateriale ble redusert med 38 % sammenlignet med reversert avrimingsprosess. Studien rapporterte i tillegg at avrimingsmetoden reduserte risikoen for kompressorhavari, på grunn av lavt sugetrykk nesten kunne unngås. Selv om effektiviteten økte under avrimingsprosessen, var det kun lagret 2,6 % av totale energien lagret i PCM varmeveksler. Noe som ga neglisjerbar forbedring av COP. Ulempen ved å benytte PCM er produksjonskostnadene og levetid. I følge studien økte produksjonskostnaden med 30 %, men kan reduseres med 10 % ved masseproduksjon. Videre ble levetiden beregnet til å vare ca 1000 sykluser, noe som betyr at de må skiftes årlig [77].

Et lignende system ble testet av Dong et al [78] med kombinasjon av ulike faseendringsmaterialer ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ og 2 % massefraksjon med $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Forsøkene viste at avrimingsprosessen med PCM var 60 % kortere enn avrimingsprosess med varmgass. Ytterligere viste studien at PCM varmeveksler brukte 48 % mindre energi.

4.2.9 Oppsummering

Is og frost på ute-enheten kan medføre uheldige konsekvenser, eksempelvis redusert effektfaktor (COP). For å redusere is og frostlaget kan følgende kriterier legges til grunn:

- Benytte varmepumpe som er designet til «norske forhold» med hensyn avriming. Der utforming av lamell og varmeveksler er optimalisert for å redusere risikoen for is og frostdannelse på ute-enheten
- Overflatebelegg reduserer sannsynligheten for at frost og is akkumuleres på ute-enheten. Noe som vil medføre kortere avrimingssyklus og dermed gi energibesparelser. Superhydrofobbelegg er energieffektivt løsning som bidrar til å drene bort vann.
- Elektrisk avriming egner seg godt for mindre ute-enheter og enkle anlegg.
- Systemet med varmgass krever ikke noe vesentlige endringer i varmepumpen og er dermed en kostnadseffektiv løsning. Ulempen knyttet til metoden er den reduserte effekten (COP) og kan potensielt gi redusert termisk komfort. Den videreutviklede metoden “Dual hot gas By-pas” klarer å opprettholde den termiske komforten og er mer energieffektiv.
- Varmeveksler med faseendringsmaterialer er en effektiv løsning med hensyn til avriming og kan gi synergieffekt til flere områder. Etterhvert som teknologien utvikler seg vil kostnadene knyttet til materialer og levetid reduseres.

4.3 Korrosjon

4.3.1 Årsak og konsekvens

Kystklima med høy luftfuktighet og saltholdig luft er faktorer som kan bidra til at komponenter på varmepumper korroderer [79]. Dersom deler av en varmepumpe begynner å korrodere, kan det medføre en rekke negative konsekvenser. Blant annet dårligere varmetransport, redusert levetid, samtidig kan en forvente høyere drift og vedlikeholdskostnader. I ytterste konsekvens kan korrosjon føre til lekkasje av brann- og miljøfarlige gasser [79].

Korrosjon på varmepumper kan også oppstå av andre årsaker enn korrosive omgivelser. Blant annet kan det oppstå korrosjon som følge av mekanisk belastninger eller dersom systemet ikke er tilstrekkelig lufttett og oksygen reagerer med arbeidsmediet.

4.3.2 Beleggets effekt på varmeytelse

Dersom varmeveksler begynner å korrodere, kan korrosjonsbelegget redusere varmoverføringsevnen [80]. Dette skyldes at korrosjonsproduktene som dannes, har dårligere termisk konduktivitet (ledningsevne) enn materialet til varmeveksleren. Belegget vil også kunne blokkere luftstrømninger som potensielt kan medføre et økt trykkfall på utedelen

Tabell 4.3 viser termisk konduktivitet for metaller som er alminnelig i varmevekslere og metallenes reduserte ledningsevne som følge av korrosjon.

Tabell 4.3. Termisk konduktivitet for ulike metaller og metalloksider [80]

| Metall | Termisk konduktivitet [W/m K] | Oksid | Termisk konduktivitet [W/m K] |
|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Aluminium | 237 | Al ₂ O ₃ | 25-40 |
| Kobber | 401 | CuO | 20 |
| Karbonstål | 52 | Jern okid | 0.58 |
| Rust fritt stål | 17 | Cr ₂ O ₃ | 10-33 |
| Titanium | 20 | TiO ₂ | 11.7 |

Zhao et.al [81] undersøkte påvirkningen av saltvannspray på varmetransporten for kobber og aluminium. Undersøkelsene viste at varmetransporten fikk en reduksjon på 2 % for kobber og 19 % for aluminium.

4.3.3 Korrosjonsformer

Korrosjon defineres som «uønsket nedbrytning av et materiale, vanligvis oksidasjon av et metall» [82]. Korrosjon er et resultat av elektrokjemiske reaksjoner mellom metaller og miljø. Den mest vanlig form for korrosjon oppstår når metaller kommer i kontakt med vann, kalt elektrolytisk korrosjon. Følgende korrosjonsformer kan forekomme ved varmpumpeanlegg:

Galvanisk korrosjon oppstår når to ulike elektrisk ledende metaller kommer i kontakt med en ledende væske (elektrolytt). Det vil dermed dannes et galvanisk par, og det uedle metallet oppløses i ioner. Det uedle metallet (anoden) vil da korrodere.

Ved montering av varmpumper er det viktig å benytte metaller med likt elektriskpotensial, eventuelt må metallene isoleres for å hindre korrosjon. Dersom man ikke kan benytte like metaller, kan man benytte offeranode.

Punktkorrosjon (pitting) er alminnelig blant metaller som danner oksidsjikt. Dersom deler av oksidsjiktet forsvinner, kan korrosjon forekomme i disse punktene. Deriblant er det fare for pitting for metaller som er i kontakt med klorider, eksempelvis sjøvann eller miljøer med liten tilgang til oksygen [24].

En annen form for lokalisert korrosjon er spaltkorrosjon. Det vil si at i spalter hvor oksygen ikke kommer til kan det oppstå korrosjon. Dette skyldes at beskyttende oksidsjiktet forhindres.

Spenningskorrosjon oppstår som følge av strekkspenninger ved mekanisk belastning. Belastningen kan komme fra vibrasjoner, deformasjoner, sveising, varmebehandling o.l [24]. Ved spenningskorrosjon vil det oppstå små sprekker i materialet. Kombinasjonen av oksygen og ammoniakk-gass (uten vann) kan medføre spenningskorrosjon rør og beholdere. Som preventivt tiltak kan en tilføre litt vann (1 %) til gassen [24].

Korrosjonsutmatting er en liknede korrosjons form som spenningskorrosjon. Utmatting oppstår som følge av det beskyttende oksidsjikt brytes ned av mekanisk belastning, eksempelvis ved sykliske spenninger. Hvor sykliske prosesser kan medføre at korrosjonsutmatting

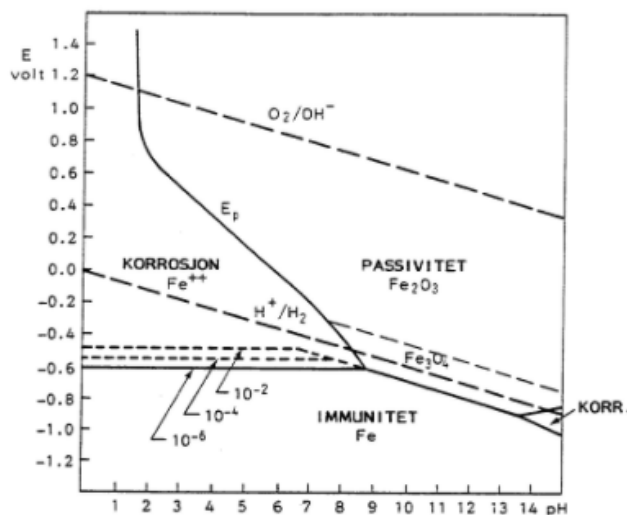
akselereres. Korrosjonen kan blant annet skyldes vibrasjoner generert fra kompressor, særlig være ved instrumentering av kompressor [24]. Vibrasjonene sine spenningsamplituder medføre at metallet overstiger utmattingsgrensen [24].

4.3.4 Pourbaix diagram

Ved hjelp av Pourbaix diagram kan en illustrer hvilken fase et materiale befinner seg i med hensyn til korrosjon. Diagrammet viser fasene til metall avhengig av pH og elektrokjemisk potensial. Ved hjelp av diagrammet kan en beskrive materialet i tre områder [83]:

- **Aktivt område** metallet vil korrodere.
- **Immune område** metallet kan ikke korrodere (immunitet).
- **Passivt område** betyr at overflaten av metallet er beskyttet av en tett, uløselig oksidhinne. Vil dermed ikke korrodere så lenge filmen/hinnen ikke sprekker.

Figur 22 viser hvilke faser jern er avhengig av pH og elektrokjemisk potensial. Diagrammet viser ikke reaksjonshastighet.



Figur 21. Pourbaix diagram for jern i vann ved 25 °C [83]

4.3.5 Overflatebehandling

Overflatebelegg av utedelen er en effektiv og rimelig løsning. Det påførte belegget vil forhindre at ioner kommer til metalloverflaten. For at belegget skal fungere etter sin hensikt, må det

tilpasses de betingelsene og vilkårene som en kan forvente av omgivelsen. Deriblant er det vanlig å benytte belegg basert på korrosjonsklasse. Klassene angir hvilke belegg som kan anvendes med hensyn til det atmosfæriske miljøet [84]. De ulike belegg systemene bygger på tre prinsipper:

- **Epoksy:** belegg vil forhindre at ioner kommer til metalloverflaten.
- **Katodisk effekt:** innebærer at belegget vil selv fungere som en offeranode (galvanisk effekt), eksempelvis sink rik maling
- **Inhiberende /passiviserende effekt:** belegget passiviserer metallens overflate. Eksempelvis overflatebelegg som inneholder rustbeskyttende pigmenter (blymønje, kromater og fosfater)

Variasjonen i overflatebehandling og belegg av varmpumper varierer mellom de ulike produsentene. Men mange varmpumpeprodusenter reklamere med belegg basert på epoksy [85]. Epoksy belegg bidrar til betydelig forlengelse av levetiden og kan gi besparelser knyttet til vedlikeholdskostnadene [86].

4.3.6 Materialer og metallenes egenskaper

Metallenes egenskaper er viktig med hensyn til varme/kjøle ytelse og varmekonduktivitet. I tillegg til å vurdere metallenes egenskaper med varmeledningsevner, må en også evaluere metallenes kvaliteter og motstandskraft mot korrosjon. Dette er den enkleste metoden for korrosjonsbeskyttelse.

Egenskapene til rustfrie stål, kommer av det er levert med krom [87]. Dette medfører at det oppstår et beskyttende sjikt som øker stålets bestandighet mot korrosjon. Syrefast stål (AISI 316) er mer motstandsdyktig mot korrosjon enn rustfritt stål (AISI 304) [87]. Dette skyldes at syrefast stål tilsettes molybden som øker bestandigheten til stålet. I tillegg tåler det større kjemiske påkjenninger ettersom det inneholder mindre karbon enn vanlig rustfritt stål. Disse faktorene kan være kostnadsdrivere.

Kobber sin motstandsdyktighet mot korrosjon skyldes at det er relativt edelt metall [88]. Kobber har høy bestandighet i korrosive omgivelser. Dette skyldes at det dannes beskyttende belegg av ir. Belegget er svært motstandsdyktig og beskytter metallet mot videre angrep.

Aluminium danner naturlig et korrosjonsbeskyttende (oksidasjonssjikt) belegg ved kontakt med oksygen [88]. Ved eventuelle mekaniske påkjenninger på sjiktet vil det reparere seg selv. Men eksponert for aggressive miljøer kan det oppstå korrosjon lokale steder på overflaten [89].

Korrosjon kan oppstå til tross for at varmpumpen har metaller med god bestandighet. I enkelt tilfeller har det oppstått korrosjon som følge av sveisetekniske forhold har svekket bestandigheten til metallet [90]. Etterbehandling av metallet er nødvendig til for gjenopprett bestandigheten til metallet. Der enkelte leverandører syrebeiser både innvendig og utvendig i sveisesømmene [91].

Det er også fare for korrosjon dersom diffusjonstette slanger/ rør og pakninger ikke monteres riktig. Ettersom disse kan miste sin fasthet slik at oksygen kan trenge inn. Det er i tillegg fare lekkasjer og korrosjon dersom pakningene reagerer med arbeidsmediet slik at de begynner å svele/krympe.

4.3.7 Arbeidsmedium

Arbeidsmedium som benyttes i varmpumper må også vurderes med hensyn til korrosjon. Arbeidsmediet må være kompatibel med metallene og må ikke påvirke korrosjon forholdene. Tilsetningsstoffer som anti-korrosjonsmidler, biocider og fargestoff, tilsettes arbeidsmediene for å forhindre korrosjon, bakterie og algevekst. Disse kan utgjøre 10 % av blanding [87]. Sammensetning av arbeidsmedienes tilsetninger kan være utfordrerne innhente, ettersom sammensetning blir anset som beskyttet varemerket informasjon.

4.3.8 Oppsummering

Korrosjon kan oppstå av ulike årsaker og kan medføre uheldige konsekvenser, eksempelvis redusere varmeoverføringsevnen og levetid. Ved å benytte varmpumper som har korrosjonsbeskyttelse, deriblant korrosjonsbestandigmetaller og arbeidsmedium som er kompatibel med metallene, samt overflatebehandlet mot korrosjon kan en redusere sannsynligheten for korrosjon. Videre kan byggherre, rådgivere, utbyggere o.l. forebygge korrosjon ved:

- Plassere varmpumpen slik at den er minst utsatt for klimatiske påkjenninger
- Forhindre at varmpumpen blir utsatt for mekaniske belastninger ved å avstive og isolere, eksempelvis ved å benytte vibrasjonsdempere til kabinettet.
- Kontrollere at installasjonen og monteringen ikke svekker varmpumpens korrosjonsbeskyttelse. Herunder med hensyn til sveisetekniske forhold, montasje skal ikke medføre galvanisk korrosjon og slanger/rør og pakninger ikke bidrar til korrosjon.
- Et supplement som kan gi besparelser med hensyn til rengjøringsprosessen, er å benytte superhydrofobt belegg. Beleggene har egenskaper som er bidrar til mindre mengder smuss og støv kan legg seg på overflaten

4.4 Kartlegging av service- og vedlikeholdsbehov i ulike VP-installasjoner.

4.4.1 Forvaltning og drift

For å opprettholde funksjonalitet, varme-/ kjøleytelse og effektfaktor (COP) til varmpumper er det nødvendig med vedlikehold. Avhengig av kompetanse hos driftspersonell på bygget, kan vedlikeholdet gjennomføres av personellet. Dersom anlegget er komplekst bør det etableres service avtale for varmpumpeaggregatet, varme opptakssystem, arbeidsmediet og hjelpesystemer [19]. Servicebehovet må utarbeides med hensyn til å opprettholde funksjonalitet, sikker drift og bidra til lengst mulig levetid.

4.4.2 Varmepumpeløsning

Enkelte varmpumpeløsninger må er særlig utsatt for begroing og korrosjon. Deriblant varmeutakksystemet fra sjøvann, grunnvann- og grunnvarmesystemer må vedlikeholdes spesielt grundig. Hvor det anbefales å etablere vedlikeholds- og service rutiner for blant annet pumper, varmebærer (frostvæske), rengjøring av varmeveksler, rørsystemer og brønnfilter [19].

Varmepumper med luft som varmekilde må være oppmerksom for lekkasjer i fordamperrørene ved utarbeidelse av vedlikeholdsrutiner. Dette kan oppstå som følge av temperaturendringer ved avrimingsprosessen av fordampere. Hyppig temperaturendring kan medføre termiske spenninger i fordamperrørene, lameller og bend. Disse spenningen kan medføre at det oppstår brudd i sveisepunkter eller i materialet. Dette er en økende trend som forekommer på grunn av fordampere designes med mindre materialtykkelse [90].

4.4.3 Kostnader knyttet til drift og vedlikehold

Masteroppgaven «*Varmepumper: Drift eller vedlikehold*» [92] gjennomførte en spørreundersøkelse i samarbeide med Enova og undersøkte driftskostnader knyttet til varmpumpeanlegg. Det ble konkludert fra spørreundersøkelsen at kostnadene for drift og vedlikehold ligger under 2 % av investeringskostnader. Utvalget av respondenter varierte mellom ulike varmpumpeløsning, men bergvarmeanlegg utgjorde mesteparten.

Dette er noe som stemmer overens med litteraturen, hvor kostnadene for drift og vedlikehold ofte estimeres til 2-3 % av investeringskostnadene [93]. Forutsatt at anlegge fungerer som de skal. Hva som defineres som investeringskostnader, er viktig å være oppmerksom på. Ettersom det er varierende hva som defineres som investeringskostnader, hvor enkelte definerer dette som maskinrom. Mens andre definerer det som kostnadene knyttet til selve varmpumpen.

Omfanget av kostnader knyttet til vedlikehold avhenger av varmpumpeløsning, men gode rutiner for driftspersonell, samt måle- og registreringsutstyr er essensielt for å opprettholde varmpumpers effektivitet på en lønnsom måte.

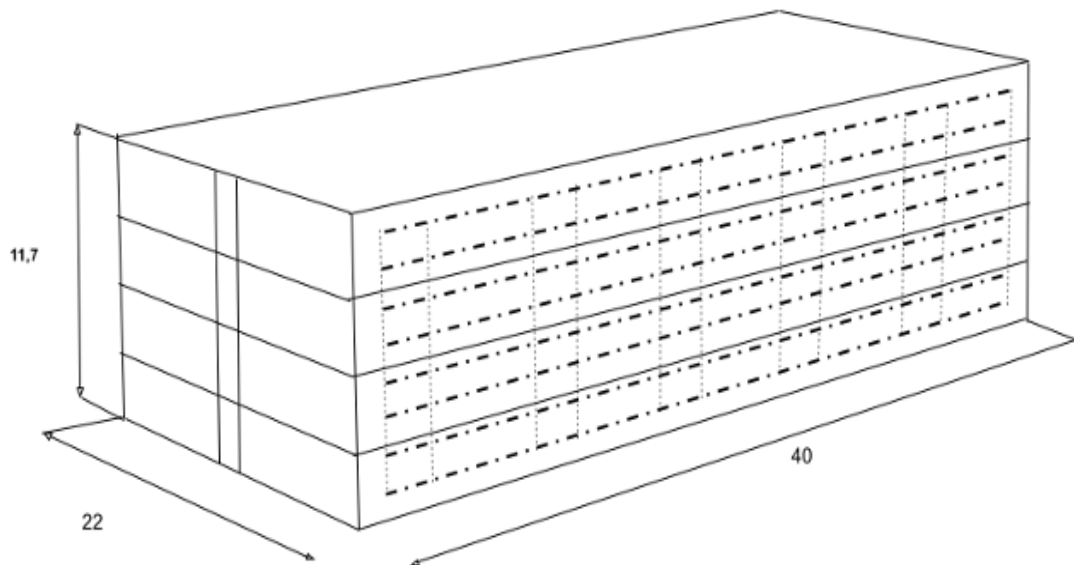
5 Casestudie

I dette kapitlet presenteres det to varmepumpealternativer for en boligblokk. Det er blitt undersøkt hvilke løsninger av varmepumpealternativene som gir best varmeytelse, med hensyn til klimaet på Sør-Vestlandet (kysten). Alternativene som er undersøkt er én væske/vann- og én luft/vann-varmepumpe.

5.1 Boligblokk

Som grunnlag for casestudiet ble det tatt utgangspunkt i en boligblokk i Bergen.

Klimaet i Bergen kjennetegnes som et vestlandsk klima med en årsmiddeltemperatur på $7,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ og dimensjonerende utetemperatur (DUT) $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ [94]. Boligblokken har oppvarmet bruksareal på 3520 m^2 fordelt på fire etasjer, som skissert i *Figur 23*. Boligblokken består av 32 leiligheter og hvor hver leilighet er ca 87 m^2 .



Figur 22. Prinsippskisse av boligblokken som er simulert i SIMIEN

Simuleringsprogrammet SIMIEN ble benyttet til å beregne bygnings energi- og effektbehov. Det er benyttet fire beregningssoner i SIMIEN, der hver etasje utgjør én sone.

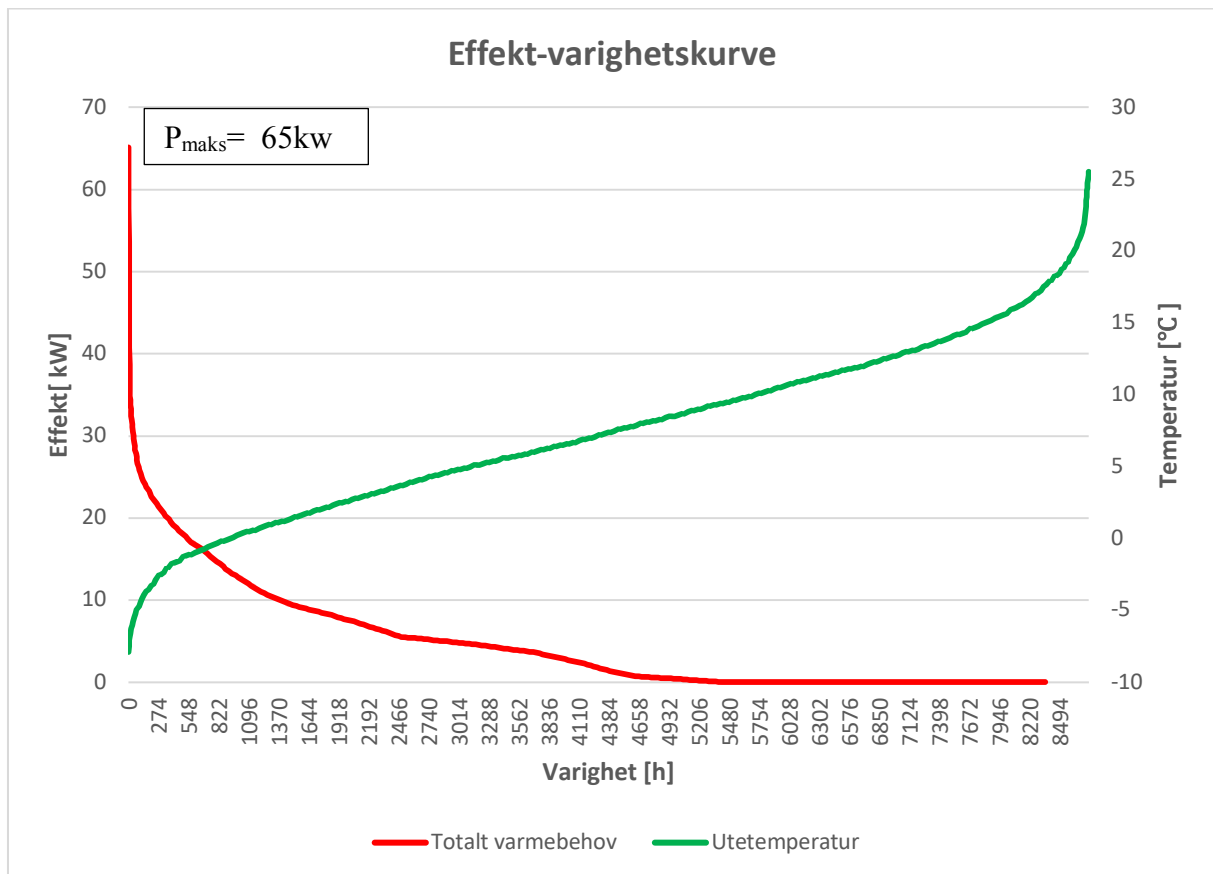
Tabell 5.1 inneholder inndata som er benyttet til simulering av boligblokken. Verdiene og egenskapene til bygget tilfredsstillende energikravene gitt i TEK17. For å oppnå tilfredsstillende termisk inn klima på sommeren er det benyttet passive tiltak. Deriblant solavskjerming og eksponert termisk masse.

Tabell 5.1. Inndata for simulering av boligblokken i SIMIEN

| | Beskrivelse | Verdi | Enhet |
|-----------------------|---------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| Byggteknisk | U-verdi Yttervegg | 0,15 | [W/m ² K] |
| | U-verdi Tak | 0,12 | [W/m ² K] |
| | U-verdi Gulv | 0,11 | [W/m ² K] |
| | U-verdi Vinduer & dører | 0,8 | [W/m ² K] |
| | Normalisert Kuldebro | 0,03 | [W/m ² K] |
| | Lekkasjetall (n ₅₀) | 0,6 | [h ⁻¹] |
| | Driftstid (romoppv/vent) | 16/7/52 – 24/7/52 | [T/Dg/Uker] |
| Teknisk anlegg | Ventilasjonssystem | VAV | |
| | Luftmengde i driftstid | 10/6 | [m ³ /h·m ²] |
| | Luftmengde utenfor driftstid | 1 | [m ³ /h·m ²] |
| | Temperaturvirkningsgrad | 85 % | |
| | SFP | 1,5 | [kW/(m ³ /s)] |
| | Innetemperatur | 21/19 | [°C] |
| | Solskjerming | 175 | [W/m ²] |
| Internlast | Kjøling | Vent | |
| | Belysning | 1,95 | [W/m ²] |
| | Utstyr | 3 | [W/m ²] |
| | Person | 1,5 | [W/m ²] |
| | Varmtvann | 3,4 | [kWh/m ²] |

5.1.1 Energi og effektbehov

Figur 24 viser effekt-varighetskurve for bygget. Det er valgt å dimensjonere varmpumpen for å dekke byggets oppvarmingsbehov til ventilasjonstap, transmisjonstap og infiltrasjonstap. Samt tappevann ved dimensjonerende utetemperatur (DUT). Det medfører 50 % av netto effektbehov og varmpumpen skal yte 32 kW.



Figur 23. Effekt-varighetskurve for boligblokken

Totalt årlig spesifikt energibehov for boligblokken er beregnet til 266 383 kWh (75,7 kWh/m²) inklusivt tappevann. Hvor 14 795 kWh er til romoppvarming og 100 985 kWh er til tappevann.

5.1.2 Systembeskrivelse

De to varmepumpealternativene skal installeres med vannbårent varmeanlegg. Det vannbårende varmeanlegget skal ha følgende varmeavgivere:

- Vannbåren gulvvarme med temperaturnivå 35/30 °C og dimensjonerende effekt 19 kW.
- Ventilasjonsaggregat med roterende varmegjenvinner ($\eta = 85\%$) med dimensjonerende effektbehov og temperaturnivå hhv. 22 kW og 45/35 °C

Videre skal varmepumpen ha vekselventil som styrer mellom romoppvarming og tappevann. Ved romoppvarming leverer varmepumpen oppvarmet vann til gulvvarmesystemet og varmebatteriet i ventilasjonsaggregat via akkumuleringstank. Varmt tappevann skal forvarmes av varmepumpene til vanntemperaturen blir ca. 45-50 °C og en elektrisk varmtvannstank ettervarmer vannet til 70 °C .

5.1.3 Avgrensning

For begge alternativene benyttes det likt varmedistribusjonssystem. Derfor er ikke dette inkludert i videre beregninger. Dette medfører at det ikke er tatt hensyn til eventuelle systemvirkningsgrader og varmetap for varmedistribusjonssystemet ved beregning av varmepumpenes ytelse. I tillegg er det ikke inkludert kjøling ettersom behovet for boligblokken er begrenset (dokumentert ved sommersimulering i SIMIEN).

5.2 Varmepumpe alternativ

Varmepumpene som er benyttet i oppgaven er kommersielt tilgjengelig på det norske varmepumpemarkedet, og kan blant annet bestilles fra ABK-Qviller AS. Ved bestemmelse av type varmepumpe er det mange faktorer som må vurderes, deriblant aktuelle arbeidsmedium.

Varmepumpeanlegg med naturlig arbeidsmedium kan medføre betydelige investeringskostnader [95]. Blant annet kan varmepumpe med propan som arbeidsmedium bli 15 prosent dyrere enn varmepumpeanlegg med syntetisk arbeidsmedium. Som beskrevet i *kapitel 2.7* representerer arbeidsmediene ulike fordeler og ulemper.

Med hensyn til at oppgaven ikke har definert noen ambisiøse miljømål, er det valgt å benytte varmepumper med syntetiske arbeidsmedier. Ettersom disse har lavere investeringskostnader enn naturlige arbeidsmedier.

5.3 Alternativ 1: Luft/vann- varmepumpe

5.3.1 Årsvarmefaktor og energidekningsgrad

For alternativ én er det foreslått to luft/vann-varmepumpe av typen NIBE F2120-16, som vist i *Figur 25*. Dette er inverterstyrt varmepumpe med nominell varmeytelse på 16 kW.

Kompressoren er av typen scoll og kan levere varme ved utelufttemperatur ned til - 25 °C [96]. Varmepumpen leveres med arbeidsmedium R410A.



Figur 24. NIBE luft/vann- varmepumpe varmeytelse 8- 20 kW [96].

For å beregne effektfaktor for varmepumpen ble simuleringsprogrammet *Coolpack* benyttet. Simuleringen ble gjennomført som *ett - trinn krets med tørrfordamper (One-stage cycle with DX evaporator)*. Det henvises videre til *Vedlegg B* for nærmere beskrivelse av input verdier. *Tabell 5.2* viser forventet effektfaktor ved varierende lufttemperaturer.

Tabell 5.2 Effektfaktor ved varierende utetemperatur

| Lufttemperatur [°C] | 5 | 0 | -5 | -10 | -15 |
|----------------------------|----------|----------|-----------|------------|------------|
| COP | 4,9 | 4,1 | 3,4 | 2,9 | 2,5 |

Årsvarmefaktor er beregnet ved simulert effektfaktor og varmeytelse ved ulike driftsforhold gjennom en fyringssesong. Varmepumpens ytelser er vist i *Tabell 5.3*

Tabell 5.2. Ytelse til varmpumpemodellen (S. Raastad, personlig kommunikasjon 30.april. 2021)

| Beskrivelse | Alt. 1 (Luft/vann- varmpumpe) |
|--------------------------|-------------------------------|
| SCOP [-] | 3,8 |
| Energidekningsgrad [kWh] | 99 % |
| Effektdekningsgrad [kWh] | 65 % |

5.3.2 Tappevann

Boligblokken har et betydelig tappevannsbehov (100 985 kWh). Som følge av at varmpumpen ikke vil dekke hele tappevannsbehovet vil det være nødvendig å tillegge anlegget ytterligere enn beskrevet i *kapitel 5.3.3 Systembeskrivelse*. Det må derfor installeres to spiralberedere (6 kW El.koble) og varmtvannsbereder (3x5 kW el.kolbe). Dersom varmpumpene ikke klarer å levere tilstrekkelig varme, kobles en el.kjel på 42 kW som spisslast.

5.4 Alternativ 2: væske/vann- varmpumpe

5.4.1 Årsvarmefaktor og energidekningsgrad

For alternativ to er det tatt utgangspunkt i to inverterstyrte væske/vann-varmpumpe av typen NIBE S1155. Varmepumpen levers med nominell varme ytelse på 12 kW (brinetemp. 0 °C og utgående vanntemperatur. 35 °C) uten integrert varmtvannsbereder. Varmepumpen benytter arbeidsmedium R407C. *Tabell 5.2* viser ytelsen til varmpumpemodellen.

Tabell 5.3. Ytelse til varmpumpemodellen (S. Raastad, personlig kommunikasjon 30.april. 2021)

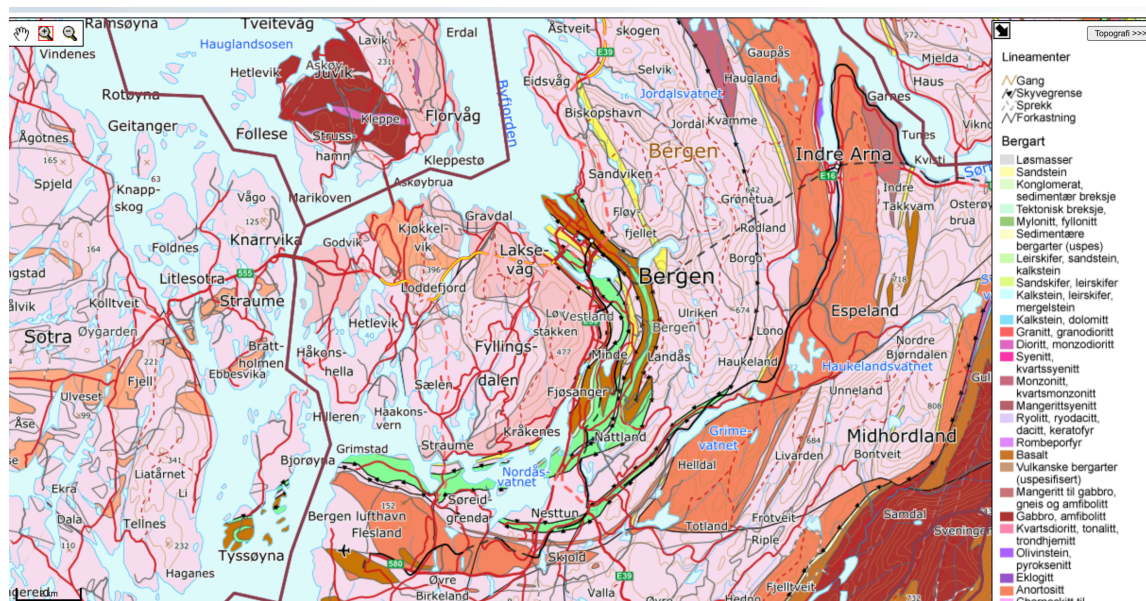
| Beskrivelse | Alt. 2 (Væske/vann-varmpumpe) |
|--------------------------|-------------------------------|
| SCOP [-] | 3,6 |
| Energidekningsgrad [kWh] | 100 % |
| Effektdekningsgrad [kW] | 79 % |

5.4.2 Systembeskrivelse

Som beskrevet i *kap 5.3.3 Systembeskrivelse* har varmepumpen vekselventil mellom romoppvarming og tappevann, som leverer varmen gjennom en akkumuleringstank. For tappevann er det to spiralberedere med 6 kW el.kolbe og én varmtvannsbereder 3x5 kW el.kolbe. For spisslast er det lagt til grunn en el.kjel (42 kW).

5.4.3 Varmeuttakk

Geologiske forhold i Bergen er ikke undersøkt i detaljer. Det vil si at det ikke er gjennomført termisk responstest (TRT) for måling av berggrunnens varmeledningsevne og termiske motstand. Derimot er det benyttet kart fra Norges Geologiske Undersøkelse (NGU) med oversikt over bergarter i Bergen område, som vist i *Figur 26*. Fra kartet er det varierende hvilken type bergarter det er i område, men det observeres en generell trend med dioritt bergart. Det er lagt til grunn dioritt bergart med varmeledningsevne på 3 W/ m K. [97]. Resulterende uttak fra energibrønnen fremgår i *Tabell 5.7*



Figur 25. Oversikt over bergart i Bergen område [98]

Tabell 5.4. 5 Beregnet varmeuttak fra energibrønnene (S. Raastad, personlig kommunikasjon 30.april. 2021

| Brønndybde[m] | Antall brønner | Effektuttak [W/m] | Energiuttak [kWh/m] |
|---------------|----------------|----------------------|------------------------|
| 215 | 3 | 20 | 158 |

6 Økonomisk analyse

I dette kapittel presenteres det en økonomisk analyse, som inkluderer LCC beregninger med service og vedlikeholds kostnader for varmepumpealternativene. Det er benyttet årskostnad- og netto nåverdi metoden for å vurdere lønnsomheten til alternativene.

6.1 Forutsetninger og antagelser

Det er lagt til grunn noen forutsetninger og antagelser for den økonomiske analysen. Forutsetningene som er lagt til grunn har vesentlig innvirkning på lønnsomheten. Hvor følgende forutsetninger er benyttet:

Kalkulasjonsrente er et beløp som henviser til ulike tidspunkter og kan dermed sammenlignes når de er regnet i fast kroneverdi. Kalkulasjonsrenten i den økonomiske analysen lik realrenten. Det innebærer at renten inneholder korreksjoner for generell inflasjon, relativ energisparing og skatteforhold. Avhengig av lånerenten og avkastningskrav settes kalkulasjonsrente normalt mellom 4 – 7 %. I analysen benyttes det derfor kalkulasjonsrente på 4 %.

Strømpris følgende kostnadselementer inngår i strømpriser [99]:

- Nettleie kan bestå et fastledd eller to variable ledd (energi- og effektledd)
- Kraftpris
- Offentlig avgifter utgjør blant annet forbruksavgift, elavgift til energifondet

Prognoser for fremtidig strømpriser forbundet med usikkerhet. Noe som skyldes at mye kan endres knyttet til skatter, avgifter og kraftpris. For beregningene benyttes det derfor strømpris 80 øre/kWh.

Analyseperiode beskriver hvor lang levetid det forventes at varmepumpeanlegget er i drift. Leverandør oppgir at væske/vann-varmepumpe og luft/vann-varmepumper forventes å ha en levetid på hhv. 20 og 15 år.

6.2 Investeringskostnader

6.2.1 Borekostnader

Etter gjennomgang av litteraturen for borekostnader og samtaler med aktører, er det påpekt at disse kostnadene er varierende og avhenger av lokale grunnforhold. Borekostnader i fjell (150-250 kr) er vesentlig rimeligere enn i løsmasser (ned til fast fjell) der det estimeres til ca. 500-700 kr. I beregningene benyttes det 350 kr/m (uten mva.) inkl. til vegg i teknisk rom. I tillegg legges det til grunn 30 000 kr per kollektor (inkl. samleikum).

6.2.2 Forventet drift og vedlikeholdskostnader

Varmepumper behøver oppfølging og vedlikehold for å opprettholde funksjonaliteten. Reelle kostnader for drift og vedlikehold er ikke funnet. Det er lagt til grunn erfaringstall for væske/vann- og luft/vann-varmepumpe på henholdsvis 2 % og 3 % av investeringskostnader.

6.2.3 Tilskuddsordning

Offentlig tilskudd fra Enova er medbrakt i beregningene på 1600 kr/kW.

6.2.4 Forutsetning og forenklinger

Den økonomiske analysen inkluderer ikke alle investeringskostnader som ville vært inkludert ved en reell installasjon av varmepumpealternativene. Blant annet ville faktorer som sikkerhetstiltak, akustikk, rør-og varmedistribusjonssystem, elektro & automatisering m.m. medføre økte investeringskostnader.

Noen av disse kostnadene vil være likt for begge alternativene, eksempelvis varmedistribusjonssystem. Derimot vil noen av kostnadene være mer spesifikt rettet mot en løsning, eksempelvis akustiske tiltak for luft/vann-varmepumpen. Men omfanget av disse kostnadene vil sannsynligvis ikke være av karakter som vil bli utslagsgivende.

6.3 Økonomisk analyse

Investeringskostnadene benyttet i oppgaven er oppgitt av ABK AS. Disse kostnadene inkluderer varmepumpe med tilhørende komponenter, herunder spisslastkjel og annet utstyr. Alle kostnader er eks. Merverdiavgift, disse fremgår i sin helhet i *vedlegg C*. Kostnadene for alternativene fordeler seg som oppgitt i *Tabell 6.1*

Tabell 6.1 Investeringskostnader for varmepumpealternativene

| Alternativ 1 (luft/vann-VP) | | Alternativ 2 (Væske/vann-VP) | |
|------------------------------------|---------|-------------------------------------|---------|
| Varmeytelse [kW] | 32 | Varmeytelse [kW] | 24 |
| Varmepumpe | 214 620 | Varmepumpe[kr] | 197 100 |
| Total investeringskostnad [kr] | 413 059 | Total investeringskostnad [kr] | 380 758 |
| Energibesparelse [kWh/år] | 101 889 | Energibesparelse [kWh/år] | 98 106 |
| Energi å kjøpe [kWh/år] | 39 285 | Energi å kjøpe [kWh/år] | 43 068 |
| Energibrønner [kr] | n/a | Energibrønner [kr] | 315 750 |
| Drift & vedlikehold [kr] | 12 391 | Drift & vedlikehold [kr] | 7 615 |
| Tilskudd [kr] | n/a | Tilskudd [kr] | 34 800 |
| Levetid [år] | 15 | Levetid [år] | 20 |

Den spesifikke investeringskostnaden (kr/ kW) for varmepumpealternativ 1 og 2 er hhv. 6 706 kr/kW og 8212 kr/kW. Ytterligere kan en se fra *tabell 6.1* at energibesparelse er nesten lik. Luft/vann-varmepumpe oppnår 3,7 % bedre energibesparelse enn væske/vann-varmepumpe.

6.3.1 Lønnsomhet

Lønnsomhetsvurdering av varmepumpealternativene er basert på netto nåverdi. Resultatene for alternativene er presentert i *Tabell 6.2*. Beregningene viser at luft/vann-varmepumpe er en lønnsom investering. Væske/vann-varmepumpe gir en negativ netto nåverdi og dermed ulønnsom investering.

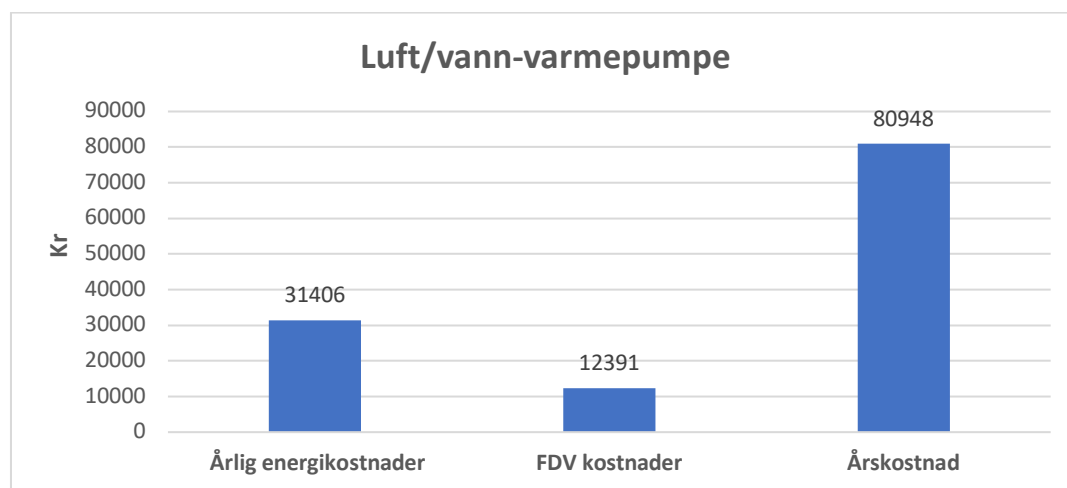
Tabell 6.2 Netto nåverdi for varmepumpealternativene

| | Alt. 1 (luft/vann-VP) [kr] | Alt. 2 (Væske/vann-VP) [kr] |
|----------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Netto nåverdi | 6 017 | - 166 882 |

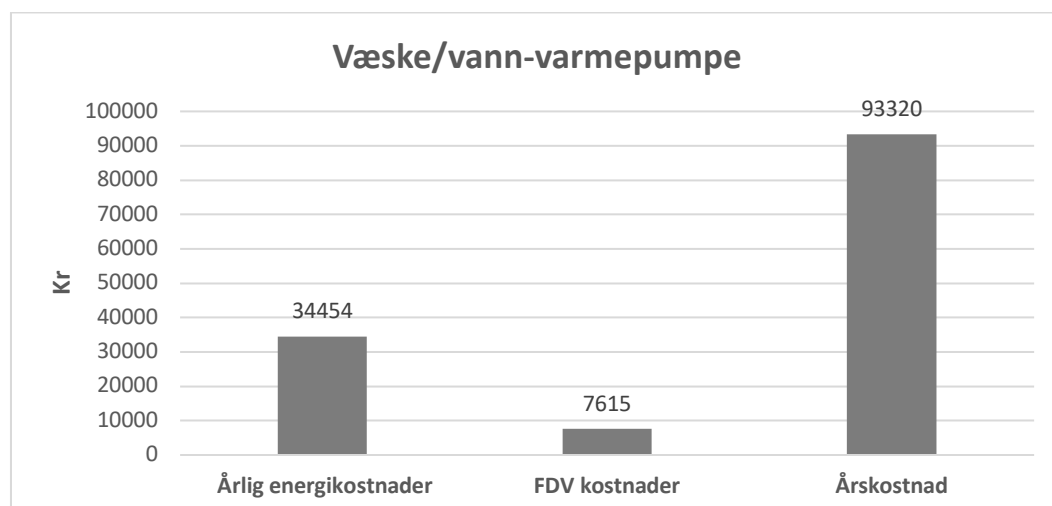
6.3.2 Årskostnad

Figur 27 og 28 viser oversikt av kostnader knyttet FDV og årlig energikostnader, samt årskostnader for alternativene. Fra resultatene kommer det frem at luft/vann-varmepumpe gir lavest årskostnad.

Figur 27 Årskostnad for luft/vann-varmepumpe



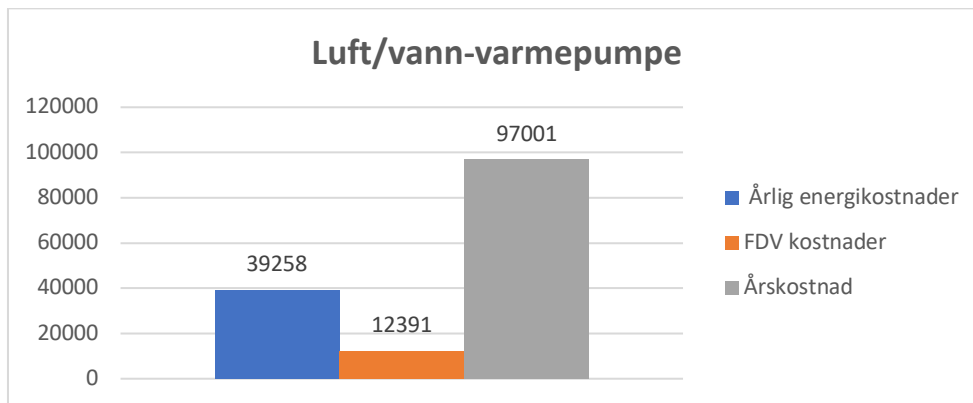
Figur 28 Årskostnad for væske/vann-varmepumpe



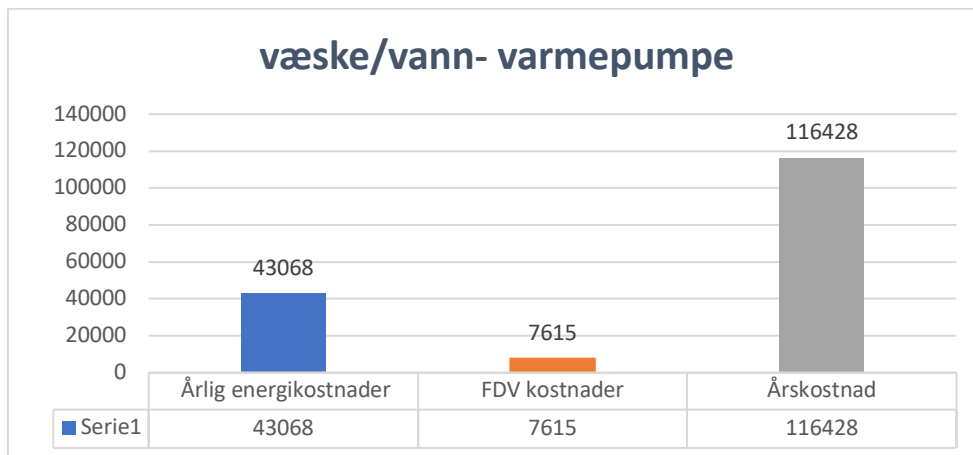
6.3.3 Sensitivitetsanalyse

Livssyklus kostnader er forbundet med noe usikkerhet. Disse usikkerhetene kan blant annet knyttes til faktorer som strømpris og kalkulasjonsrente. Hvor varmepumper er spesielt følsomme for endringer i kalkulasjonsrenten og strømpris. For å illustrere effekten av endring av disse faktorene, er det benyttet en strømpris 1 øre/kWh og kalkulasjonsrente på 7 %. Luft/vann-varmepumpe alternativet oppnår fortsatt lavest årskostnad, som vist i figur 29.

Figur 29 Endret kalkulasjonsrente til 7% og strømpris 1 øre/kWh



Figur 30 Endret kalkulasjonsrente til 7% og strømpris 1 øre/kWh



7 Diskusjon

I dette kapittelet blir resultatene fra casestudiet og lønnsomhetsberegningen for varmepumpealternativene drøftet.

7.1 Luft/vann-varmepumpe

7.1.1 Årsvarmefaktor

Det har blitt benyttet en markedsledende og energieffektiv luft/vann-varmepumpe fra NIBE. Varmepumpemodellen er til sammenligning 40 prosent dyrere enn andre luft/vann-varmepumper.

Beregningene viser at varmepumpealternativet oppnår en relativt høy årsvarmefaktor. Dette skyldes flere faktorer. Blant annet er det ikke inkludert distribusjons- og reguleringstap i beregningene. Et slik tap ville medførte en redusert ytelse på varmeanlegget. En annen medvirkende årsak til at luft/vann-varmepumpeanlegget oppnår høy årsvarmefaktor kan knyttes til at boligblokken består av lavtemperaturanlegg og at varmen leveres ved moderat temperatur. Det lave temperaturløftet er fordelaktig for luft/vann-varmepumper ettersom effekt faktoren reduseres ved 2-3 % per grad (°C).

Videre viser beregningene at luft/vann-varmepumper egner seg godt i klimaet på Sør-Vestlandet (kysten). Ettersom det er et mildt klima i Bergen passer det godt med luft/vann-varmepumpe.

7.1.2 Økonomi

Resultatene fra lønnsomhetsberegningen viser at luft/vann-varmepumper er et konkurransedyktig alternativ til væske/vann-varmepumpe. Dette skyldes den klare fordelene med at luft/vann-varmepumper har en betydelige lavere installasjonskostnad. Til tross for oppgavens begrensninger med hensyn til andre investeringskostnader (f.eks. rørinstallasjon, akustikk m.m) viser resultatene at luft/vann-varmepumpe er den mest kostnadseffektive løsningen.

7.1.3 Andre forhold

Andre forhold som må belyses ved å benytte luft/vann-varmepumper er støyproblematikken. Dette kan i enkelte tilfeller være retningsgivende i forhold til bestemmelse av varmepumpeløsning. Disse utfordringene kan reduseres ved bruk av gode akustiske strategier, som beskrevet i *kapitel 4.1 Akustikk*. Dersom støyproblematikken er utfordrende kan en redusere støynivået med å tilpasse varmepumpen. Ved å benytte ute-enhet med kun fordampere og resterende komponenter (kompressor og kondensator) plassert i tekniske rom, kan en redusere støynivået.

Et moment som ville vært relevant å sammenligne, er hvor effektiv varmepumpealternativene ville ha vært med et høytemperturanlegg. Ettersom tappevannsbehovet utgjør mesteparten av varmebehovet i boligblokken. I tillegg er dette aktuelt for passivhus og lavenergibygg som har et dominerende varmtvannsbehov og lavt romoppvarmingsbehov.

7.2 Væske/vann-varmepumpe

7.2.1 Energibrønn og årsvarmefaktor

Etablering av energibrønner medfører betydelige investeringskostnader for væske/vann-varmepumpeanlegg. I beregningen er det lagt til grunn for et effektuttak på 20 W/m. I litteraturen rapporteres det om muligheter for å hente ut en effekt på 20 – 80 W/m [100].

Varmeuttaket som kan utnyttes av energibrønnen, vil ha stor påvirkning på investeringskostnadene. Dersom energi-og effektuttaket hadde vært større kunne antall brønner vært redusert, og dermed fått vesentlige lavere investeringskostnader knyttet til energibrønnene.

Dersom det hadde vært mulig å anskaffe reelle målinger, ville det ha bidratt til å gi et bedre estimat for lønnsomhetsvurderingen. Ytterligere må det understrekes at borekostnadene er basert på erfaringstall. Summen av dette medfører stor usikkerhet knyttet til energibrønnene. Det som er interessant er at væske/vann-varmepumpeløsningene får en lavere årsvarmefaktor enn luft/vann-varmepumpe. Dette kan tolkes ulikt, men væske/vann-løsningen er over

gjennomsnittet. Luft/vann-varmepumpen skiller seg ut i form av den uforventede høye årsvarmefaktoren.

7.2.2 Økonomi

Det er lagt til grunn i beregningen et tilskudd på 1600 kr/kW fra Enova. Det er i tillegg mulighet for å få innvilget inntil 45 % støtte av investeringskostnadene. Dette er ikke inkludert i beregningene ettersom søknadene behandles individuelt, samt at søker må ha en rekke formelle krav til bedriften. Dersom Enova hadde støttet et slikt prosjekt for boligblokken ville lønnsomhetsvurdering vært annerledes.

7.2.3 Diskusjon av andre forhold

Energibrønner har den klare fordelene i de tilfellene hvor de økonomiske hensynene ikke er av betydning som ved, eksempelvis støy. I tillegg har energibrønner lang levetid og er relativt driftssikker. Ettersom forsyningssikkerhet med væske/vann-varmepumper er relativt stabil.

8 Konklusjon

På bakgrunn av oppgavens problemstilling presenteres konklusjonen ut i fra de undersøkte problemstillingene.

8.1 Litteraturstudiet

Gjennom litteraturstudiet har det blitt redegjort for utfordringer og suksesskriterier for å lykkes med luft som varmekilde. Det er identifisert mulige tiltak som kan implementeres på varmepumpeanlegg avhengig av utfordringen. Blant annet kan disse tiltakene bidra til å gi besparelser i form material- og levetidskostnader, samt energibesparelser. Ytterligere er det presenterte forhold som kan bidra til å sikre en god installasjon med hensyn til støyproblematikken. Dersom tiltakene og muligheten blir i større grad tatt hensyn til ved en eventuell bestemmelse av varmepumpeanlegg, vil luft/vann-varmepumpe bli enda mer konkurransedyktig.

8.2 Casestudiet

Casestudiet har kartlagt energi- og effektbehov for en boligblokk lokalisert på Sør-Vestlandet (Bergen). Romoppvarming og tappevannsbehovet er lagt til grunn for dimensjonering av varmepumpealternativene. Basert på resultatene for varmepumpenes årsvarmefaktor og varmeytelse ved ulike driftsforhold gjennom en fyringssesong, er det utarbeidet lønnsomhetsberegninger. Resultatene fra casestudiet for varmepumpesystemene er blitt benyttet til å beregne hvilke av varmepumpealternativene som er energi- og kostnadseffektivt.

Basert på de forutsetningen og antagelsen som er lagt til grunn for beregningene, viser lønnsomhetsberegningen av luft/vann-varmepumpeløsningen å være den mest energieffektive løsningen og samtidig den kostnadseffektive løsningen for boligblokken.

Varmepumpeløsningen oppnår høyest årsvarmefaktor, samt lavest årskostnad. Basert på livssyklus-kostnadene har luft/vann-varmepumpen fått en årskostnad på 80948 kr og netto nåverdi 6 017 kr.

Oppgaven viser videre at investeringskostnadene for varmepumpeanlegg er avhengig av bygningsspesifikke energi- og effektbehov. Lønnsomheten vedrørende varmepumpealternativer er avhengig av geografiske, geologiske, hydrologiske, drift & vedlikehold og bygningstekniske forhold. Det kan dermed konkluderes i at varmepumpeløsningen må tilpasses bygningen og klimaet.

9 Litteraturliste

- [1] «Publikasjoner.nve.no,» 2020. [Internett]. Available: http://publikasjoner.nve.no/eksternrapport/2020/eksternrapport2020_08.pdf. [Funnet 29 April 2021].
- [2] SINTEF, «– Varmepumper er den beste teknologien for energieffektive bygg - SINTEF,» 2018. [Internett]. Available: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2018/-varmepumper-er-den-beste-teknologien-for-energieffektive-bygg/>. [Funnet 05 April 2021].
- [3] 06 Mai 2021. [Internett]. Available: <https://nkf-norge.no/wp-content/uploads/2019/11/Kulde-og-varmepumpenorm-2018.pdf>.
- [4] «Publikasjoner.nve.no,» [Internett]. Available: https://publikasjoner.nve.no/rapport/2016/rapport2016_60.pdf. [Funnet 06 Mai 2021].
- [5] SINTEF, «Varmepumper er den foretrukne teknologien for nesten nullenergibygg (nZEB) - SINTEF,» [Internett]. Available: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2018/varmepumper-er-den-foretrukne-teknologien-for-nesten-nullenergibygg-nzeb/>. [Funnet 05 April 2021].
- [6] SINTEF, «552.403 Varmepumper i bygninger,» [Internett]. Available: https://www.byggforsk.no/dokument/541/varmepumper_i_bygninger_funksjonsbeskrivelse. [Funnet 04 April 2021].
- [7] J. Stene, «Oppvarmingssystemer for lavenergi boliger,» 2006. [Internett]. Available: https://www.sintef.no/globalassets/project/annex32/oppvarmingssystemer_tra6182_20061.pdf. [Funnet 01 April 2021].
- [8] J. Stene, «Årsvarmefaktor for varmepumpesystemer,» [Internett]. Available: <https://docplayer.me/2569635-Arsvarmefaktor-for-varmepumpesystemer.html>. [Funnet 06 April 2021].
- [9] Enova, «Kompetansekompedium for varmeanlegg 2011,» 2011. [Internett]. Available: https://www.enova.no/upload_images/15620DD1392D4A9A94C1A77A589C2941.pdf. [Funnet 01 April 2021].
- [10] O. Ø. S. Jørn Stene, «Enova,» 19 Mars 2013. [Internett]. Available: https://www.enova.no/upload_images/380D698AC6CC4A0D98695AC29342ECDC.pdf. [Funnet 02 April 2021].
- [11] D. Zijdemans, Vannbaserte oppvarmings- og kjølesystemer, Skarland Press AS, 2012.
- [12] Dibk, «§ 14-4. Krav til løsninger for energiforsyning,» [Internett]. Available: <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/14/14-4/>. [Funnet 06 April 2021].
- [13] Dibk, «FORENKLET ANLEGG FOR VANNBÅREN OPPVARMING AV BOLIGER,» [Internett]. Available: <https://dibk.no/globalassets/miljo/publikasjoner/forenklet-anlegg-for-vannbaren-oppvarming-av-boliger.pdf>. [Funnet 18 April 2021].
- [14] R. K. Ramstad, «Norges vassdrags- og energidirektorat,» [Internett]. Available: http://publikasjoner.nve.no/oppdragsrapportA/2011/oppdragsrapportA2011_05.pdf. [Funnet 14 Mars 2021].

- [15 Norges geologiske undersøkelse, «Grunnvarme | Norges geologiske undersøkelse,»
] [Internett]. Available: <https://www.ngu.no/emne/grunnvarme>. [Funnet 14 Mars 2021].
- [16 L. A. K. (. o. H. K. Tor Simon Pedersen, «Norges vassdrags- og energidirektorat,»
] [Internett]. Available: http://publikasjoner.nve.no/rapport/2003/rapport2003_01.pdf.
] [Funnet 26 Mars 2021].
- [17 A. J. Jørn Stene, «Prototype CO2 varmpumpesystem for oppvarming og kjøling av større
] bygning,» [Internett]. Available:
[https://www.sintef.no/globalassets/upload/smartbygg/wp3/prototyp-co2-
varmpumpesystem-for-oppvarming-og-kjoling-av-en-storre-bygning.pdf](https://www.sintef.no/globalassets/upload/smartbygg/wp3/prototyp-co2-varmpumpesystem-for-oppvarming-og-kjoling-av-en-storre-bygning.pdf). [Funnet 26
Mars 2021].
- [18 J. K. I. H. E. B. Kirsti Midttømme. [Internett]. Available:
] <http://biblioteket.husbanken.no/arkiv/dok/Komp/Termisk%20energilagring%20i%20berggrunnen%20med%20aktiv%20bidrag.pdf>. [Funnet 23 Mars 2021].
- [19 V. H. Jørn Stene, 2018. [Internett]. Available: [https://byggalliansen.no/wp-
content/uploads/2018/11/Varmepumper_Byggalliansen-Tipshefte-7.pdf](https://byggalliansen.no/wp-content/uploads/2018/11/Varmepumper_Byggalliansen-Tipshefte-7.pdf). [Funnet 15 April
2021].
- [20 E. Brekke. [Internett]. Available:
] https://www.ngu.no/FileArchive/91/termisk_responstesting_fou.pdf.
- [21 Swep, «Swep.net,» [Internett]. Available: [https://www.swep.net/refrigerant-handbook/5.-
refrigerants/sd7/](https://www.swep.net/refrigerant-handbook/5.-refrigerants/sd7/). [Funnet 01 Mars 2021].
- [22 T. Kofstad, «Utredning av fluorholdige gasser i næringsbygg,» COWI , 2018.
]
- [23 Regjeringen, «Regjeringen.no,» [Internett]. Available:
] [https://www.regjeringen.no/no/sub/eos-notatbasen/notatene/2014/juni/revidert-f-
gassforordning-/id2434380/](https://www.regjeringen.no/no/sub/eos-notatbasen/notatene/2014/juni/revidert-f-gassforordning-/id2434380/). [Funnet 18 Mars 2021].
- [24 NORSK KULDE- OG VARMEPUMPENORM 2018, «NORSK KULDE- OG
] VARMEPUMPENORM 2018,» 2018. [Internett]. Available: [https://nkf-norge.no/wp-
content/uploads/2019/11/Kulde-og-varmepumpenorm-2018.pdf](https://nkf-norge.no/wp-content/uploads/2019/11/Kulde-og-varmepumpenorm-2018.pdf). [Funnet 12 Mars 2021].
- [25 Standard Norge, «Standard.no (NS-EN 378),» [Internett]. Available:
] [https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID
=730503](https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=730503). [Funnet 02 April 2021].
- [26 J. Pettersen. [Internett]. Available: [https://docplayer.me/44136098-Arbeidsmedier-
working-fluids-kuldemedier-refrigerants.html](https://docplayer.me/44136098-Arbeidsmedier-working-fluids-kuldemedier-refrigerants.html). [Funnet 22 April 2021].
- [27 J. Stene, «Tekniske nyheter».
]
- [28 Standard Norge (NS-EN 378), «NS-EN 378».
]
- [29 J. Akre-Aas, «Norsk Kjøleteknisk Forening,» Norsk Kjøleteknisk Forening. [Internett].
] Available: [https://nkf-norge.no/wp-content/uploads/2016/04/NKF-HFO-foredrag-
09052016-Jaa.pdf](https://nkf-norge.no/wp-content/uploads/2016/04/NKF-HFO-foredrag-09052016-Jaa.pdf). [Funnet 13 Mai 2021].
- [30 Norsk Gartnerforbund, «Temahefte varmpumper,» [Internett]. Available:
] <https://ngfenergi.no/wp-content/uploads/2020/04/Temahefte-Varmepumper-2.pdf>. [Funnet
15 April 2021].
- [31 A. L. H. Ø. Svein Bjørberg, «DIBK,» [Internett]. Available:
] [https://dibk.no/globalassets/eksisterende-bygg/publikasjoner/livssyklus-kostnader-for-
bygninger.pdf](https://dibk.no/globalassets/eksisterende-bygg/publikasjoner/livssyklus-kostnader-for-bygninger.pdf).

- [32 NS 3454, «Standard Norge,» [Internett]. Available:
] <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=626300>.
- [33 A. L. H. Ø. Svein Bjørberg, «Livssyklus kostnader for bygninger,» [Internett]. Available:
] <https://dibk.no/globalassets/eksisterende-bygg/publikasjoner/livssyklus-kostnader-for-bygninger.pdf>.
- [34 Enova, «Oppdraget,» [Internett]. Available: <https://www.enova.no/om-enova/om-organisasjonen/strategiske-veivalg-mot-2050/oppdraget/>. [Funnet 06 Mars 2021].
- [35 Enova, «Varmesentraler,» [Internett]. Available: <https://www.enova.no/bedrift/bygg-og-eiendom/varmesentraler/>. [Funnet 29 Mars 2021].
- [36 ABK, «LØNNSOMHET LUFT/LUFT VARMEPUMPE,» [Internett]. Available:
] <https://www.slideserve.com/oberon/l-nnsomhet-luft-luft-varmepumpe>. [Funnet 05 Mars 2021].
- [37 J. Tønnesen, «Inndeling av Norge i klimasoner,» [Internett]. Available:
] <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/2618968>. [Funnet 05 Mars 2021].
- [38 byggforsk 451.021, «Klimadata for termisk dimensjonering og frostsikring,» [Internett].
] Available:
https://www.byggforsk.no/dokument/204/klimadata_for_termisk_dimensjonering_og_frostsikring. [Funnet 05 mars 2021].
- [39 Enova, «Graddagstall,» [Internett]. Available: <https://www.enova.no/om-enova/drift/graddagstall/>.
- [40 K. M. J. S. Helge Smebye, 2011. [Internett]. Available:
] https://publikasjoner.nve.no/oppdragsrapportA/2011/oppdragsrapportA2011_09.pdf.
] [Funnet 05 Mars 2021].
- [41 Programbyggerne, [Internett]. Available:
] <https://www.programbyggerne.no/SIMIEN/validering>. [Funnet 30 April 2021].
- [42 NS 3031, «Standard.no,» [Internett]. Available:
] <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=702386>. [Funnet 30 April 2021].
- [43 NTNU, «CoolPack,» [Internett]. Available: <https://innsida.ntnu.no/wiki/-/wiki/Norsk/CoolPack>. [Funnet 13 Mai 2021].
- [44 Standard Norge, «Lydklasser (NS 8175),» [Internett]. Available:
] <https://www.standard.no/fagomrader/bygg-anlegg-og-eiendom/akustikk-og-stoy/lydklasser/>. [Funnet 23 Mars 2021].
- [45 SINTEF, «Lydubredelse og støy. Grunnbegreper,» [Internett]. Available:
] https://www.byggforsk.no/dokument/185/lydubredelse_og_stoey_grunnbegreper. [Funnet 02 Mars 2021].
- [46 D. Lurcock, «ACOUSTIC NOISE MEASUREMENTS OF AIR SOURCE HEAT PUMPS,» 2011. [Internett]. Available:
] https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/48204/3307-acoustic-noise-air-source-heat-pumps-1.pdf. [Funnet 21 Februar 2021].
- [47 F. BESSAC, «2.2: Round Robin Tests Air-to-Water Heat Pump Heat Pump Water Heater,» 2020. [Internett]. Available: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex51/wp-content/uploads/sites/59/2020/11/iea-hpt-annex-51-d22-v1.pdf>. [Funnet 23 Februar 2021].

- [48 C. Reichl, «Educational material, guides & guidelines.» 2021. [Internett]. Available:
] <https://heatpumpingtechnologies.org/annex51/wp-content/uploads/sites/59/2021/04/iea-hpt-annex-51-d71-v2.pdf>. [Funnet 21 Februar 2021].
- [49 S. Wagner, «Overview on Heat Pump Component Noise and Noise Control Techniques.»
] 2020. [Internett]. Available: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex51/wp-content/uploads/sites/59/2020/11/iea-hpt-annex-51-d3-v1.pdf>. [Funnet 26 Februar 2021].
- [50 NHI, «Hørsel.» [Internett]. Available: <https://nhi.no/kroppen-var/organer/horsel/>. [Funnet
] 21 Februar 2021].
- [51 Gustafssona, H. Stignor og bäck, «Heat exchanger design aspects related to noise in heat
] pump applications.» *Sciencedirect*, 16 Januar 2016.
- [52 «Store norske leksikon på snl.no.» [Internett]. Available: <https://snl.no/diffusor>. [Funnet
] 07 Mai 2021].
- [53 550.501 Vibrasjonsisolering av maskiner og utstyr, «Byggforsk.» 2007. [Internett].
] Available: <https://www.byggforsk.no/dokument/512/vibrasjonsisolering>. [Funnet 03 Mars
2021].
- [54 M. Berg, «Akustiske utfordringer med store varmpumper.» [Internett]. Available:
] http://www.norskakustiskselskap.org/uploads/hostmote/2015/2_3_MeisingsetOgBerg.pdf.
[Funnet 17 Februar 2021].
- [55 N. V. M. F. G. M. V. K. Gregory P. Vasilyev Vitaly A. Leskov, «Technical Solution for
] Protection of Heat Pump Evaporators Against Freezing the Moisture Condensed.»
[Internett]. Available: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2016/03/mateconf_icmes2016_05002.pdf.
[Funnet 22 Februar 2021].
- [56 K. N. A. E. B. Fricke, «A Critical Literature Review of Defrost Technologies for Heat
] Pumps and Refrigeration Systems.» 2018.
- [57 D. S. Song Mengjie, «Applied Energy.» 2018. [Internett]. Available:
] [https://www.researchgate.net/publication/322195212_Review_on_improvement_for_air_s
ource_heat_pump_units_during_frosting_and_defrosting](https://www.researchgate.net/publication/322195212_Review_on_improvement_for_air_source_heat_pump_units_during_frosting_and_defrosting). [Funnet 22 Februar 2021].
- [58 R. Watters, «ResearchGate.» 2002. [Internett]. Available:
] [https://www.researchgate.net/publication/316885180_FrostDefrost_Performance_of_a_Th
ree-Row_Fin_Staged_Heat_Pump_Evaporator](https://www.researchgate.net/publication/316885180_FrostDefrost_Performance_of_a_Three-Row_Fin_Staged_Heat_Pump_Evaporator). [Funnet 22 Februar 2021].
- [59 O. P. Galaasen, «VVSforum.» 2018. [Internett]. Available:
] <https://www.vvsforum.no/2018/unngar-sub-optimale-luftvann-varmpumpesystemer/>.
[Funnet 21 Mars 2021].
- [60 A. A.M.Jacobi, «ScienceDirect.» 2005. [Internett]. Available:
] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700705000800>. [Funnet 22
Februar 2021].
- [61 P. S. René Mulvad, 2008. [Internett]. Available:
] <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/970082>. [Funnet 26 Februar 2021].
- [62 J. S. Arne Jakobsen, «Luft/luft-varmpumper.» SINTEF, 2003.
]
- [63 snl, «snl.no.» 2019. [Internett]. Available: https://snl.no/hydrofil_-_kjemi. [Funnet 22
] Februar 2021].
- [64 B. Pedersen, «snl.no.» 2019. [Internett]. Available: <https://snl.no/hydrofob>. [Funnet 27
] Februar 2021].

- [65 E. G. K. E. A. Tserepi, «Microelectronic Engineering Volume 132, Pages 135-15,» 2015.
] [Internett]. Available:
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167931714004341. [Funnet 16 Mars
2021].
- [66 L. H. Z. L. Yaomin, «ScienceDirect,» 2009. [Internett]. Available:
] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089417770900082X. [Funnet 16 Mars
2021].
- [67 E. O. M. Newborough, «Applied Thermal Engineering Volume 20, Issue 8, Pages 737-
] 758,» 2000. [Internett]. Available:
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431199000563. [Funnet 12 Mars
2021].
- [68 C. L. Feng Wang, «Experimental Thermal and Fluid Science,» Feb 2015. [Internett].
] Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0894177714002647.
[Funnet 11 Mars 2021].
- [69 B. C. Langley, Heat Pump Technology, Prentice Hall, 2002.
]
- [70 S. M. Z. M. Yaqub, «Performance evaluation of hot-gas by-pass capacity control schemes
] for refrigeration and air-conditioning systems,» *Energy*, 2000.
- [71 S. D. Jiankai Dong, «An experimental study on defrosting heat supplies and energy
] consumptions during a reverse cycle defrost operation for an air source heat pump,»
Applied Thermal Engineering , 2012.
- [72 B.-S. K. Hwan-Jong Choi, «Defrosting method adopting dual hot gas bypass for an air-to-
] air heat pump,» *Applied Energy*, Desember 2011.
- [73 M. E. N. L. F. C. A. I. F. Camila Barreneche, «New database to select Phase Change
] Materials: chemical nature, properties, and applications,» Departament de Ciència dels
Materials i Enginyeria Metal·lúrgica, Journal of Energy Storage Volume 3, Pages 18-24 ,
October 2015.
- [74 I. A. Matthias Haase, «Thermal Mass Concepts,» SINTEF Building and Infrastructure.
]
- [75 X. L. ., S. D. J. Y. Qu Minglu, «Improved indoor thermal comfort during defrost with a
] novel reverse-cycle defrosting method for air source heat pumps,» *Building and
Environment*, 2010.
- [76 M. J. A. R. D. ., K. H. K. Ángel Á. Pardiñas, «State-of-the-Art for the use of Phase-
] Change Materials in Tanks Coupled with Heat Pumps,» Department of Energy and
Process Engineering, NTNU , SINTEF Building and Infrastructure.
- [77 J. Y. Q. M. N. L. Y. Y. D. S. Hu Wenju, «An experimental study on the operating
] performance of a novel reverse-cycle hot gas defrosting method for air source heat
pumps,» *Applied Thermal Engineering*, Februar 2011.
- [78 J. Y. D. S. Dong Jiankai, «Improving reverse cycle defrosting performance of air source
] heat pumps using thermal storage-based refrigerant sub-cooling energy,» *Building
Services Engineering Research and Technology*, 2011.
- [79 H. J. J. J. K.-S. L. D. R. K. Chang Sung Heu, «Recent progress on developing anti-frosting
] and anti-fouling functional surfaces for air source heat pumps,» *Energy and Buildings
Volume 223*, 2020.

- [80 S. L. Z. Y. A. J. V. B. R. S. K. V. a. M. D. P. Willem Faes, «Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers,» Juni 2018. [Internett]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/196519648.pdf>. [Funnet 11 Mars 2021].
- [81 Z. Q. Q. W. J. C. J. S. Yu Zhao, «Experimental Thermal and Fluid Science Volume 37, Pages 98-103,» 2012. [Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0894177711002111>. [Funnet 22 Mars 2021].
- [82 Kjemen stemmer, «Kjemen stemmer,» cappelendamm, [Internett]. Available: https://kjemenstemmer.cappelendamm.no/elevreal/tekst.html?tid=1882749&sec_tid=1991051. [Funnet 08 Mars 2021].
- [83 M. Ystenes, «Pourbaix-diagrammer,» 1998, [Internett]. Available: <https://folk.ntnu.no/ystenes/pedagogikk/tmt4105/pourbaix/>. [Funnet 08 Mars 2021].
- [84 Industrilakkering AS, «Industrilakkering AS,» [Internett]. Available: <http://www.industrilakkering.no/behandlinger/korrosjonsklasser/>. [Funnet 13 Mars 2021].
- [85 Alphacomact, [Internett]. Available: <https://docplayer.me/2670533-Nyhetsbrev-varmepumpe-varmepumpe-moderne-energiteknikk-hete-varmepumpe-erstatter-oljekjelen-utgave-1-2006-videre-side-6-side-4.html>. [Funnet 09 Mai 2021].
- [86 ModineCoatings, Januar 2020. [Internett]. Available: https://www.modinecoatings.com/wp-content/uploads/2020/01/INS_White_Paper_1-9.pdf. [Funnet 09 Mai 2021].
- [87 L. Ø. A. S. H. V. L. C. S. Karel Janak, «Helsemessig vurdering av tredjepartsinstallasjoner i drikkevannsforsyningssystemer,» MATTILSYNET, 2019.
- [88 SINTEF, «Metaller til bygningsbruk. Bruksformål og prosjektering,» Desember 2013. [Internett]. Available: https://www.byggforsk.no/dokument/4092/metaller_til_bygningsbruk_bruksformaal_og_prosjektering. [Funnet 09 Mars 2021].
- [89 HYDAL, [Internett]. Available: https://hap.hydal.com/download-routerfile.php?temp_id=96&file_id=1777. [Funnet 11 Mars 2021].
- [90 H. Rustad, «Varmepumpeveileder fra statsbygg,» Statsbygg og NVE.
]
- [91 polarenergi, «Polarenergi.com,» [Internett]. Available: <https://www.polarenergi.com/vp3801>. [Funnet 10 Mai 2021].
- [92 T. S. N. Storbækken, «Varmepumpe: Drift eller vedlikehold?,» 2015. [Internett]. Available: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/295552/Storbakken2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Funnet 21 April 2021].
- [93 J. Stene, «Varmepumper for oppvarming og kjøling av bygninger,» SINTEF Energiforskning AS, 2000.
- [94 451.021, «Klimadata for termisk dimensjonering og frostsikring,» [Internett]. Available: https://www.byggforsk.no/dokument/204/klimadata_for_termisk_dimensjonering_og_frosstsikring. [Funnet 29 April 2021].

[95 VVS forum, «Naturlige kuldemedier: – Forutsetter tydelig bestilling,» [Internett].
] Available: <https://www.vvsforum.no/2017/kuldemedier/>. [Funnet 05 Mai 2021].

[96 NIBE, «ABKQviller,» [Internett]. Available:
] <https://www.abkqviller.no/globalassets/global/markedsmateriell-brosjyrer-priskataloger-annonser-etc/kataloger-uten-priser/katalog-vaske-vann-luft-vann-og-avtrekksvarmepumper-2020.pdf>.

[97 NGU, «Varmeledningsevner målt på bergarter,» [Internett]. Available:
] <https://www.ngu.no/filearchive/91/Varmeledningstabell.pdf>. [Funnet 13 Mai 2021].

[98 NGU, Kart, «Karttjeneste,» [Internett]. Available:
] <http://geo.ngu.no/kart/minkommune/?kommunenr=4601>. [Funnet 12 Mai 2021].

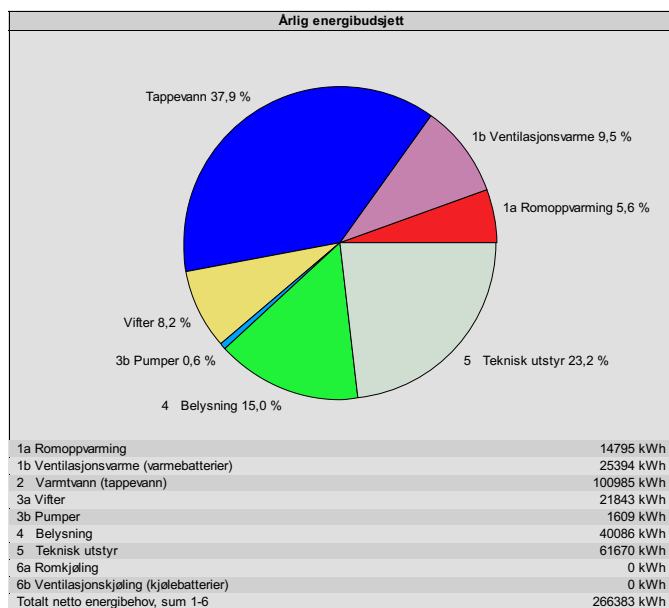
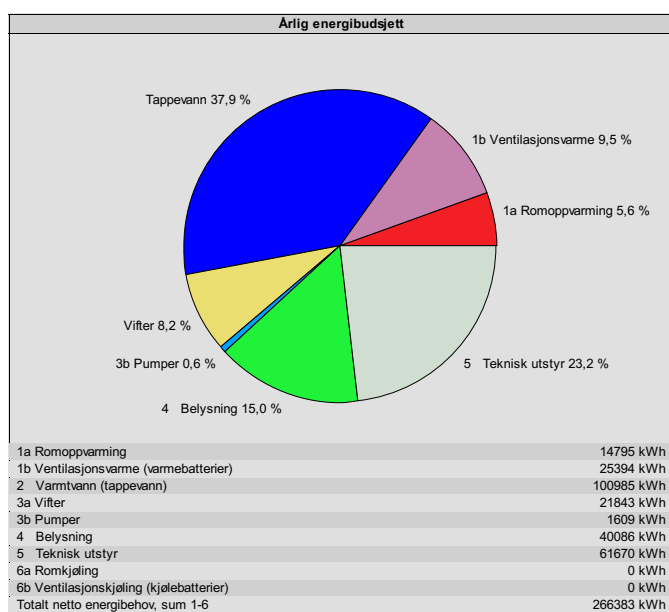
[99 NVE/strømpris, «Strømvtales, strømpriser og faktura,» [Internett]. Available:
] <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/stromkunde/stromavtaler-strompriser-og-faktura/>.

[10 S. A. Stokvik, «Bygg.no,» 2013. [Internett]. Available: <http://www.bygg.no/article/52845.0>
] [Funnet 15 Mai 2021].

Vedlegg A SIMIEN

Resultater fra simulering gjort i SIMIEN

| Energipost | Energibudsjett | Energiebehov | Spesifikt energiebehov |
|---|----------------|-------------------|-------------------------------|
| 1a Romoppvarming | | 14795 kWh | 4,2 kWh/m ² |
| 1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier) | | 25394 kWh | 7,2 kWh/m ² |
| 2 Varmt vann (tappevann) | | 100985 kWh | 28,7 kWh/m ² |
| 3a Vifter | | 21843 kWh | 6,2 kWh/m ² |
| 3b Pumper | | 1609 kWh | 0,5 kWh/m ² |
| 4 Belysning | | 40086 kWh | 11,4 kWh/m ² |
| 5 Teknisk utstyr | | 61670 kWh | 17,5 kWh/m ² |
| 6a Romkjøling | | 0 kWh | 0,0 kWh/m ² |
| 6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier) | | 0 kWh | 0,0 kWh/m ² |
| Totalt netto energiebehov, sum 1-6 | | 266383 kWh | 75,7 kWh/m² |



Tabell A Vedlegg Dokumentasjon av sentral inndata

| Dokumentasjon av sentral inndata | Verdi |
|---|--------------|
| Areal tak [m ²] | 864 |
| Areal gulv [m ²] | 3520 |
| Areal vinduer og ytterdører [m ²] | 326 |
| Oppvarmet bruksareal [m ²] | 3520 |

Beregning av dimensjonerende effekt av ventilasjonsaggregat

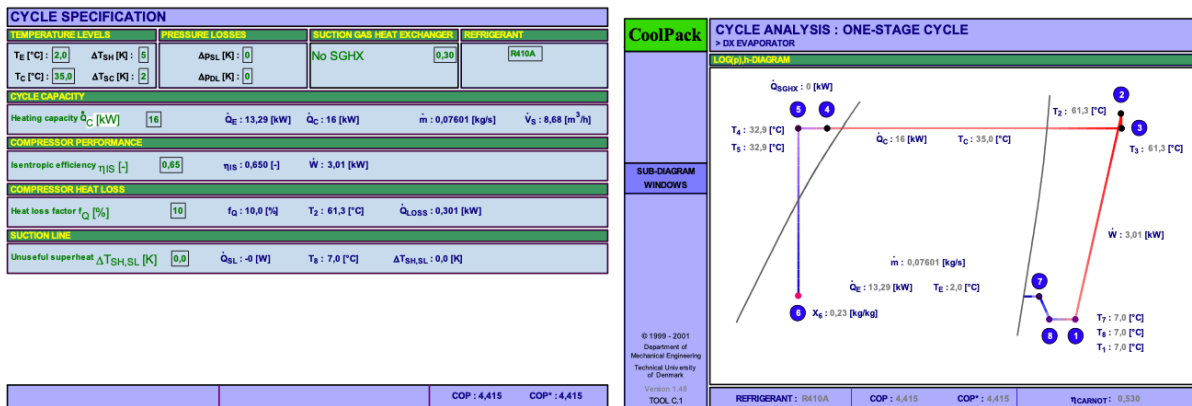
$$\begin{aligned} \dot{Q} &= L \cdot c_p \cdot \rho \cdot \Delta T \\ &= 0,4155 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3 (44)\text{K} = 22 \text{ kW} \end{aligned}$$

Vedlegg B Coolpack

Simuleringen i Coolpack ble gjennomført for å simulere varmepumpeprosessen. Prosessen ble forenklet simulert i programmet med konstant kondenseringstemperatur og trykk.

Tabell B Input verdier for simulering av varmepumpeprosessen i Coolpack

| Beskrivelse | Verdi |
|--|-------|
| Arbeidsmedium | R410A |
| η_v (sugegassvarmeveksler) | - |
| η_{is} (isentropisk virkningsgrad) | 0,65 |
| Trykktap: Δp_{sl} Δp_{dl} | - |
| f_Q (Varmetapsandel) | 10 % |
| T_k (kondenseringstemperatur) | 40 |
| ΔT_{SH} (Overheting) | 5K |
| ΔT_{SC} (Underkjøling) | 2K |



Figur B Skjerm bilde av simulering i CoolPack

Vedlegg C Kostnader

Kostnadene knyttet til de ulike varmpumpealternativene er basert på personlig kommunikasjon Steinar Raastad ved ABK AS. Kostnader benyttet i den økonomiske analysen kan avvike fra reelle kostnader. Tabell D viser oversikt kostnadene knyttet til varmpumpealternativene eksklusiv mva.

| Alt. 1 (Luft/vann) | Kostnader | Alt. 2(Væske/vann) | Kostnader |
|----------------------------------|------------------|-----------------------------------|------------------|
| Varmepumpe | 214 620 | Varmepumpe | 197 100 |
| Kondensvannslange | 4600 | Påfyllingssett | 2 040 |
| Styremodul | 11 160 | Samlestokk m/R50 og tilkobling | 11 940 |
| Sirkulasjonspumpe | 5 880 | Akkumulatortank | 7 230 |
| Akkumulatortank | 7230 | Reduksjonsnippel i messing | 340 |
| Reduksjonsnippel | 510 | Plugg i messing | 440 |
| Plugg i messing | 220 | Kuleventil 192 med hendel | 780 |
| Kuleventil | 1 170 | | |
| Spiralbereder | 63 980 | Spiralbereder | 63 980,00 |
| Varmtvannsbereder | 36 190 | Varmtvannsbereder | 36 190,00 |
| Vekselventil | 3570 | | |
| El.kjel | 32 890 | El.kjel | 32 890 |
| Innreguleringsventil | 1 330 | Innreguleringsventil | 1 330 |
| Kuleventil | 780 | Kuleventil | 780 |
| Sikkerhetsventil | 120 | Sikkerhetsventil | 120 |
| Elektrokjemisk vannbehandling | 18 570 | Elektrokjemisk vannbehandling | 18 570 |
| Sirkulasjonspumpe | 2 350 | Sirkulasjonspumpe | 2 350 |
| Unionkoblingssett | 330 | Unionkoblingssett | 330 |
| Avgift kuldemedium | 7404 | Avgift kuldemedium | 4193 |
| Miljøavgift | 155 | Miljøavgift | 155 |
| SUM | 413 059 | SUM | 380 758 |

Beregninger basert på SIMIEN resultater levert av ABK AS.

| Beskrivelse | Luft/vann- varmepumpe | Væske/vann- varmepumpe |
|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Samlet energibehov | 141 174 | 141 174 |
| Tilført energi VP | 37136 | 39348 |
| Tot tilleggsenergi | 1444 | 622 |
| Tilført energi til sirk.pumpe | 704 | 3097 |

Vedlegg D Excel

Nåverdi og årskostnad beregning

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| kalkulasjonsrente, r | 1,04 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| År | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| kontantstrøm per år (inkl rente) | -661 709 | 35015 | 33668 | 32373 | 31128 | 29931 | 28780 | 27673 | 26608 | 25585 | 24601 | 23655 | 22745 | 21870 | 21029 | 20220 | 19442 | 18695 | 17976 | 17284 | 16620 |
| Summen av kontantstrøm | 494897,17 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Nettonverdi, NNV | -166 812 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Strømkostnad for varmepumpe, Kr | 34 454 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| FDV, Kr | 7 615 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Årlig besparelse, kr | 78 485 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Årlig kontantstrøm, Kr | 36 415 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Investeringskostnad, I | 380 759 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Energibrønn | 315 750 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| tilskudd | -34 800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sum | 661 709 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | |
|------------------------|-------|
| Forutsetninger | |
| Energipris, øre/kWh | 0,8 |
| Energi å kjøpe, kWh | 43068 |
| Energi besparelse, kWh | 98106 |

| År | | Energibrønn | FDV Kostnader | Årlig energikostnader | Summen av FDV+årlig energi Kostnader | Levetidskostnad, LK (årlig avskrivning) | b | Årskostnad, ÅK |
|----|------------------------------------|-------------|---------------|-----------------------|--------------------------------------|--|--------|----------------|
| 1 | Investeringskostnad, varmepumpe kr | 380758 | | 7322 | 33129 | 571737 | | 93320 |
| 2 | investering, energibrønn kr | 315750 | | 7040 | 31855 | | 696508 | |
| 3 | SUM av inv, kr | 696508 | | 6770 | 30630 | | | |
| 4 | | | | 6509 | 29452 | | | |
| 5 | Årlig energikostnader, kr | 43068 | | 6259 | 28319 | | | |
| 6 | FDV, kr | 7615 | | 6018 | 27230 | | | |
| 7 | Energipris, øre/kWh | 0,8 | | 5787 | 26183 | | | |
| 8 | Kalkulasjonsrente, % | 0,04 | | 5564 | 25175 | | | |
| 9 | | | | 5350 | 24207 | | | |
| 10 | | | | 5144 | 23276 | | | |
| 11 | | | | 4947 | 22381 | | | |
| 12 | | | | 4756 | 21520 | | | |
| 13 | | | | 4573 | 20692 | | | |
| 14 | | | | 4397 | 19897 | | | |
| 15 | | | | 4228 | 19131 | | | |
| 16 | | | | 4066 | 18395 | | | |
| 17 | | | | 3909 | 17688 | Årlig energikostnader | 34454 | FDV kostnader |
| 18 | | | | 3759 | 17008 | | 7615 | Årskostnad |
| 19 | | | | 3614 | 16354 | | | 93320 |
| 20 | | | | 3475 | 15725 | | | |
| | | | SUM | 103490 | 468247 | | | |

