

Institutt for bygg- og energiteknikk — Energi og miljø i bygg*Postadresse:* Postboks 4 St. Olavs plass, 0130 Oslo*Besøksadresse:* Pilestredet 35, Oslo*Webside:* www.oslomet.no**MASTEROPPGAVE**

OPPGAVENS TITTEL: Analyse av en integrert CO ₂ – varmpumpe koblet til et vannbårent gulvvarmesystem i et bolighus i Norge	DATO: 08.06.2021
	ANTALL SIDER OG VEDLEGG: 103/42
FORFATTERE: Bjørn Alexander Hovland	VEILEDER: Per Erik Holm Dr. Moon

UTFØRT I SAMARBEID MED: ISOLVE AS	KONTAKTPERSON: Bjørn Alexander Hovland
--------------------------------------	---

KORT SAMMENDRAG:

Elektrifisering av energisystemene er en viktig del av det grønne skiftet. Byggenæringen står for opp mot 40 % av det globale klimagassutslippet og utnyttelse av lavtempererte løsninger, som skaper energieffektive og klimavennlige bygg vil være en viktig del i prosessen for å senke klimagassutslippene. Feltmålinger er blitt utført for den nyutviklede inneklimasentralen Isolve Air for å teste hvordan en integrert CO₂-varmpumpe for romoppvarming og varmt tappevann kan brukes i bolighus med fokus på analyse av effektfaktor for romoppvarming (COP) og termisk komfort i et bolighus bygget etter TEK 17. Fokuset var å analysere hvordan effektiviteten til en slik varmpumpe for romoppvarming var og hvordan den termiske komforten utviklet seg med det vannbårne gulvvarmesystemet koblet i serie med baderomskursen. På bakgrunn av resultatene vil varmpumpeenheten klare å oppnå høyere effektfaktor(COP) for romoppvarming enn konvensjonelle luft til vann – varmpumper og andre «state – of – the – art» CO₂ – varmpumper. COP – verdi for romoppvarming varierte fra 6,0 – 7,35 med respektive settpunkt satt til 27 – 30 °C turtemperatur og 19 – 22 °C romtemperatur målt over 24 t for hvert settpunkt. Varmesystemet leverer lave returtemperaturer slik den er designet for og sørger for god varmeutnyttelse rundt i distribusjonssystemet. Romtemperatursettpunkt oppnås kun ved de laveste settpunkttemperaturene (19 – 20 °C romtemperatur), mens turtemperaturen klarte aldri å oppnå sine settpunkt. Termisk komfort endres ikke i særlig stor grad ved endring av settpunkttemperatur og er tilfredsstillende i henhold til krav for termisk komfort. På tross av resultatene vil en videre analyse av enheten være nødvendig for å konkludere i henhold til anbefalt bruk sammenlignet med konvensjonelle varmpumper brukt i bolighus.

NØKKELOD

CO₂-varmpumpe
Vannbåren gulvvarme
Termisk komfort

Prosjektbeskrivelse

Følgende oppgavetekst ble utviklet i samarbeid med Isolve AS.

Elektrifisering av energisystemene er en viktig del av det grønne skiftet. Varmepumper anses som en del av løsningen grunnet de kan erstatte fossile energikilder brukt til oppvarming. Men de tradisjonelle syntetiske kuldemediene brukt i varmpumper har sterke drivhusgasser som påvirker klimaet negativt. Bruk av naturlige kuldemedier som CO₂(R744), hydrokarboner eller ammoniakk kan være løsningen på dette grunnet deres lave GWP og ODP – verdier (Global Warming Potential & Ozon Depletion Potential). De naturlige kuldemediene har sine begrensinger med at de er brennbare, giftige og har lavt kritisk punkt for trykk og temperatur(CO₂), brennbare(hydrokarboner) eller giftige(ammoniakk). CO₂(R744) er en svært lovende kandidat for bruk i varmpumper og kan bidra til å oppnå klimamålene med sine gode termodynamiske egenskaper. Det er dog utfordringer som lav temperatur (31,1 °C) i kritisk punkt, som gjør design av varmpumper med dette kuldemediet utfordrende.

Den nyutviklede inneklimasentralen «Isolve Air» er en integrert ventilasjons-, varmpumpe- og energilagringseenhet, som baserer seg på det naturlige kuldemediet R744(CO₂) og er koblet opp mot et vannbårent gulvvarmesystem. På grunn av den lave kritiske temperaturen på CO₂ ønskes det lavest mulig returtemperatur på vannet inn på gasskjøler (kondensator i tradisjonelle varmpumper). Gulvvarmesløyfene for badrom er her koblet i serie med de øvrige rom. Grunnen til det er at badrommene alltid er varmere enn de øvrige rom i huset, og restvarmen i returvannet etter badrom skal i teorien være tilstrekkelig høy som turtemperatur for øvrige rom. Resultatet av en slik seriekobling er at en samlet sett skal få lavere sirkulert mengde vann og høyere temperaturdifferanse mellom tur –og returvannet. En skal dermed få levert samme energimengde til huset som en tradisjonell parallellkobling av gulvvarmekursene. Det er derfor av interesse å se på hvordan en ved bruk av CO₂ som kuldemedium i varmpumper kan gjøre den energieffektiv for boligoppvarming samt hvordan den termiske komforten vil være ved et slikt system.

Nøkkelinformasjon

Tittel: Analyse av en integrert CO₂ – varmepumpe koblet til et vannbårent gulvvarmesystem i et bolighus i Norge

English title: Analysis of an integrated CO₂ – heat pump connected to a water-based underfloor heating system in a residential house in Norway

Hovedveileder: Dr. Moon

Samarbeid/biveileder: Per Erik Holm

Bakgrunn

I en varmepumpe ønskes lavest mulig temperaturløft for høyest mulig COP (effektfaktor). I en CO₂ – varmepumpe ønskes det lavest mulig returtemperatur på vannet inn på gasskjøler (kondensator i tradisjonelle varmepumper) for å oppnå høy COP. Teoretiske beregninger viser at reduksjon i én grad returtemperatur vil kunne gi økning på 2,5 % i COP (Stene, 2004). Den nyutviklede inneklimasentralen «Isolve Air» er en integrert ventilasjons-, varmepumpe- og energilagringseenhet, som baserer seg på det naturlige kuldemediet R744(CO₂).

Inneklimasentralen er koblet opp mot et vannbårent gulvvarmesystem, der gulvvarmesløyfene for baderom er koblet i serie med de øvrige rom. Hovedgrunnen til denne løsningen er at baderom i Norge tradisjonelt er varmere enn øvrige rom i huset, som betyr at det i teorien skal være høy nok varme i returvannet etter baderom til bruk som turtemperatur for øvrige rom.

Resultatet av en slik seriekobling er at en samlet sett skal få lavere sirkulert mengde vann og en større temperaturredifferanse mellom tur -og returvann, sammenlignet med den tradisjonelle parallellkoblingen av gulvvarmekurser. Det er derfor interessant å se hvordan den nyutviklede inneklimasentralen kan sørge for økt energieffektivitet og komfort i et bolighus bygget etter gjeldende Byggteknisk forskrift (TEK17).

Hensikt/mål

Hensikten med oppgaven er å se hvordan den nyutviklede inneklimasentralen bestående av en integrert ventilasjons-, varmepumpe- og energilagringseenhet, som baserer seg på det naturlige kuldemediet R744(CO₂) skal kunne gi god termisk komfort og energieffektivitet i et bolighus bygget etter dagens Byggteknisk forskrift (TEK17).

Fokuset vil snevre seg inn på hvordan varmepumpen fungerer til romoppvarming og hvordan det seriekoblede distribusjonssystemet kan sørge for tilfredsstillende komfort i bolighus.

Oppgaven skal gi beskrivelse av hvordan et slikt system regulerer i henhold til effektivitet rundt romoppvarming, og hvordan det klarer å oppnå god termisk komfort med en gulvvarmekurs der baderomskursen er koblet i serie med de øvrige rom i et bolighus.

Metode/Arbeidsoppgaver

- Vil den termiske komforten endres ved justering av rom – og turtemperatur?
- Hvordan vil effektiviteten til varmepumpen endres ved endring av settpunkttemperatur?
- Vil romtemperaturen oppnå sitt romtemperatursettpunkt ved bruk av et seriekoblet gulvvarmesystem?
- Hvordan vil det integrerte systemet, som er laget for å levere lavest mulig returtemperatur fungere i praksis?
- Klarer enheten å levere stabil turtemperatur til oppholdsrom ved innstilt nivå når disse er koblet i serie med baderommet?
- Ved hvilke settpunkttemperaturer vil COP være på sitt høyeste?

Forord

Masteroppgaven ble utført ved OsloMet – Storbyuniversitetet i samarbeid med Isolve AS. Oppgaven er gjennomført ved institutt for bygg –og energiteknikk og ble utført våsemesteret 2021.

Det ble tidlig i masterstudiet inngått et arbeidsforhold med Per Erik Holm der han trengte hjelp til dokumentasjon av hans nye oppfinnelse Isolve Air. Utforming av oppgaven ble derfor på bakgrunn av dette arbeidsforholdet til etter ønske om å finne ut hvordan hans nyutviklede inneklimasentral, som baserer seg på en integrert CO₂-varmepumpe for romoppvarming og varmt tappevann kombinert med et vannbårent distribusjonssystem koblet i serie med baderomskursen i et bolighus fungerte i henhold til effektivitet for romoppvarming og dens termiske komfort .

Takk til ekstern veileder, Per Erik Holm, som alltid har vært tilgjengelig, gitt god veiledning og bidratt med god hjelp til den praktiske gjennomføringen av oppgaven. Takk til intern veileder Professor Moon samt labingeniør ved OsloMet, Nils Ledermann, for god hjelp ved beskrivelse av hvordan utstyr rundt termisk komfort fungerte.

Til slutt ønsker jeg takke kjæresten min som har støttet meg og alltid spredd sitt gode humør gjennom hele prosessen. Takk til tidligere medstudent og masterstudent ved NTNU Lasse Simonsen for gode samtaler og drøfting når det har dukket opp spørsmål underveis.

Bjørn A H

Oslo, 08.06.2021

Signert av: Bjørn Alexander Hovland

Sammendrag

Elektrifisering av energisystemene er en viktig del av det grønne skiftet. Varmepumper anses som en del av løsningen grunnet de kan erstatte fossile energikilder brukt til oppvarming.. Byggenæringen står for opp mot 40 % av det globale klimagassutslippet og utnyttelse av lavtempererte løsninger, som skaper energieffektive og klimavennlige bygg vil være en viktig del i prosessen for å senke klimagassutslippene.

Isolve Air er en nyutviklet inneklimasentral med integrert ventilasjons -, varmepumpe- og energilagringseenhet, som baserer seg på det naturlige kuldemediet R744(CO₂). Feltnmålinger er blitt utført for å teste hvordan en integrert CO₂ – varmepumpe for romoppvarming og varmt tappevann kombinert med et vannbårent gulvvarmesystem, koblet i serie med baderomskursen, kan brukes i et helt nytt bolighus bygget etter TEK17. Fokuset var å analysere hvordan effektiviteten til en slik varmepumpe for romoppvarming var og hvordan den termiske komforten utviklet seg med denne type distribusjonssystem. Bakgrunnen for analysen var å undersøke hvorfor en slik inneklimasentral basert på kuldemediet CO₂ skal bli benyttet i bolighus sammenlignet med andre konvensjonelle luft til vann – varmepumpesystemer.

På bakgrunn av resultatene vil varmepumpeenheten klare å oppnå høyere effektfaktor(COP) for romoppvarming enn konvensjonelle luft til vann – varmepumper og andre «state – of – the – art» CO₂ – varmepumper. COP – verdi for romoppvarming varierte fra 6,0 – 7,35 med respektive settpunkt satt til 27 – 30 °C turtemperatur og 19 – 22 °C romtemperatur målt over 24 t for hvert settpunkt. Varmesystemet leverer lave returtemperaturer slik den er designet for og sørger for god varmeutnyttelse rundt i distribusjonssystemet. Romtemperatursettpunkt oppnås kun ved de laveste settpunkttemperaturene (19 – 20 °C romtemperatur), mens turtemperaturen klarte aldri å oppnå sine settpunkt. Termisk komfort endres ikke i særlig stor grad ved endring av settpunkttemperatur og er tilfredsstilt i henhold til krav for termisk komfort. På tross av resultatene vil en videre analyse av enheten være nødvendig for å konkludere i henhold til anbefalt bruk sammenlignet med konvensjonelle varmepumper brukt i bolighus.

Abstract

Electrification of energy systems is an important part of “The green shift”. Heat pumps are considered as a part of this solution because they can replace fossil energy sources used for heating. The construction industry accounts for up to 40 % of the global greenhouse gas emissions and utilization of low-temperature solutions, which create energy-efficient and climate-friendly buildings will be an important part of the process to lower the greenhouse gas emissions.

Isolve Air is a newly developed indoor climate control unit with integrated ventilation –, heat pump – and energy storage unit, which is based on the natural refrigerant R744 (CO₂). Field measurements have been carried out to test how an integrated CO₂ heat pump for space heating and hot tap water combined with a water – based underfloor heating system, connected in series with the bathroom course, can be used in a brand new residential building built according to the Norwegian building regulations (TEK17). The focus was to analyse how the efficiency for space heating in the heat pump was, and how the development of the thermal comfort was with this type of distribution system. The background for the analysis was to investigate why the new developed indoor unit, based on the refrigerant CO₂ should be used in residential buildings compared to other conventional air to water – heat pump systems.

Based on the results, the heat pump unit will be able to achieve a higher Coefficient of performance factor (COP) for space heating than conventional air to water – heat pumps and other «state – of – the – art» CO₂ – heat pumps. The COP – value for room heating varies from 6,0 – 7,35 with the respective setpoint set to 27 – 30 °C supply temperature and 19 – 22 °C room temperature measured over 24 h for each setpoint. The distribution system delivers low return water temperatures (as it is designed for) and ensures good heat utilization around the distribution system. Setpoint for room temperature is only achieved at the lowest setpoint temperatures (19 – 20 °C room temperature), while the supply temperature never managed to reach its setpoints. Thermal comfort does not change to a particularly great extent when changing the setpoint temperature and is satisfied with the thermal comfort requirements. Despite the results, a further analysis of the heat pump unit is necessary for further recommendations compared to conventional heat pumps.

Innholdsfortegnelse

Prosjektbeskrivelse.....	i
Nøkkelinformasjon	ii
Bakgrunn.....	ii
Hensikt/mål	iii
Metode/Arbeidsoppgaver.....	iii
Forord	iv
Sammendrag	v
Abstract	vi
Innholdsfortegnelse	vii
Definisjoner.....	xi
Figurliste.....	xiii
Tabeller.....	xv
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Aktualitet.....	2
1.3 State – of – the – art: CO ₂ – varmepumper	3
1.4 Målsetting og problemstilling	5
1.5 Metode	6
1.6 Begrensinger	6
2 Teori	7
2.1 Termisk komfort	7
2.1.1 PMV & PPD.....	9
2.1.2 Oppholdssone	10
2.1.3 Operativ temperatur.....	10
2.1.4 Middelstrålingstemperatur	11
2.1.5 Lufthastighet & Trekkhastighet	12
2.1.6 Relativ Fuktighet.....	12
2.1.7 Krav, vurdering og anbefaling av termisk inn klima.....	13
2.2 Lavtemperatur varme og høytemperatur kjøling	15
2.2.1 Eksergi og Anergi.....	16
2.2.2 Energifleksibilitet og energieffektivitet	17
2.3 Varmepumper	18

2.3.1	Arbeidsmedium	19
2.3.2	Effektfaktor	20
2.4	CO ₂ -varmepumpe	22
2.4.1	CO ₂ som kuldemedium i varmepumper	22
2.4.2	Karakteristikk	23
2.4.3	Integrert CO ₂ -varmepumpe for romoppvarming og varmt tappevann	24
2.4.4	Lorentz-effektivitet.....	27
2.5	Vannbåren gulvvarme	29
2.5.1	Virkemåte	29
2.5.2	Prosjektering og dimensjonering.....	30
2.5.3	Fordeler og utfordringer	32
2.6	Målenøyaktighet	34
2.6.1	Måleusikkerhet – Beregning av usikkerhet	35
2.6.2	Validitet og reliabilitet	36
3	Systembeskrivelse & måleobjekt	37
3.1	Måleobjektet	37
3.1.1	Energiberegning	38
3.2	Beskrivelse av Varme -og kjølesystemet i huset	39
3.2.1	Isolve Air.....	39
3.2.2	Systembeskrivelse	41
3.3	Varmestyring og distribusjon.....	43
3.3.1	Varmestyring	43
3.3.2	Distribusjonssystemet.....	43
3.3.3	Gulvoppbygging.....	44
4	Eksperimentell metode	50
4.1	Utstyr.....	50
4.2	Måleperiode og beskrivelse	54
4.3	Målepunkter	55
4.3.1	Målepunkter - Termisk komfort.....	55
4.3.2	Målepunkter - Varmepumpeenhet.....	58
4.4	Fremgangsmåte- varmepumpeenhet	59

4.5	Fremgangsmåte- Termisk komfort	60
4.6	Luftmengdemåling	61
4.7	Gjennomføring av målinger	61
5	Resultater & Diskusjon	65
5.1	Analyse av data	65
5.1.1	Termisk komfort	65
5.1.2	Inneklimasentral	66
5.1.3	Funksjonstesting – Kvalitetssikring av datamateriale	67
5.2	Resultater - Termisk komfort	70
5.2.1	Termisk komfort rigg	70
5.2.2	Termisk komfort – Påvirkning fra distribusjonssystemet	74
5.3	Resultat - Varmepumpeenhet	77
5.3.1	Måledag 1 – 30 °C turtemperatur badrom og 22 °C øvrige rom	78
5.3.2	Måledag 2 – 29 °C turtemperatur badrom og 21 °C øvrige rom	80
5.3.3	Måledag 3 – 28 °C turtemperatur badrom og 20 °C øvrige rom	82
5.3.4	Måledag 4 – 27 °C turtemperatur badrom og 19 °C øvrige rom	84
5.3.5	Analyse av COP for romoppvarming	87
6	Konklusjon	97
7	Forslag til videreføring av arbeid	99
8	Referanser	100
9	Vedlegg	103
	Vedlegg A – Teknisk datablad ISOLVE	104
	Vedlegg B – Teknisk datablad Carel thT	105
	Vedlegg C – Swema 05 – Black Globe	106
	Vedlegg D – HC2A-S -Relativ fuktighetssensor	107
	Vedlegg E – Swema 03 – Draught sensor for lufthastighet og temperatur	108
	Vedlegg F - Model 8375 Accubalance – måletrakt	109
	Vedlegg G – Varmepumpens moduler med respektive mål	110
	Vedlegg H - Plantegning 1.etg & 2.etg	112
	Vedlegg I - Energiberegning: TEK-Sjekk (TEK17 Fullstendig kontroll)	114
	Vedlegg J – Krav til boligbygning – Byggteknisk forskrift (TEK17)	117
	Vedlegg K – Eksempel på analyse av termisk komfort i Excel	119
	Vedlegg L – Formler benyttet i Excel for analyse av varmpumpeenhet	120
	Vedlegg M – Eksempel: Kompressoreffekt og levert effekt til romoppvarming som funksjon av utetemperatur	121

Vedlegg N – Eksempel: Tur-returtemperatur som funksjon av utetemperatur og kompressoreffekt.....	122
Vedlegg O – Luftmengdemåling	123
Vedlegg P – Luftmengdemåling med formeloppbygning i Excel	124
Vedlegg Q – Resultat fra testmåling: Termisk komfort.....	125
Vedlegg R – Resultater fra termisk komfort rigg	126

Definisjoner

Forkortelse/uttrykk	Beskrivelse	Enhet
KFK	Klorfluorkarbon [R-12]	-
HKFK	Hydrofluorkarbon [R-22]	-
HFK	Hydrofluorkarbon [R134a, R404a osv..]	-
U-verdi	Varmegjennomgangskoeffisient	W/(m ² ·K)
GWP	Global Warming Potential (100 år), relativ innvirkning på drivhuseffekten der referansen er i CO ₂ , hvor GWP _{CO2} = 1	-
ODP	«Ozone Depletion Potential» er en referanseverdi som angir hvilken evne et stoff har til å bryte ned ozon i forhold til kuldemediet R11(Nydal, 2013a).	-
BRA	Bruksareal	m ²
n ₅₀	Luftlekkasjetall per time ved 50 Pa trykkforskjell	Pa
Grunnventilasjon	Avtrekkventilasjon som boligen har hele døgnet	m ³ /h, l/s
Forsert ventilasjon	Økende avtrekk ved behov, f.eks. ved påslått avtrekksvifte på bad	m ³ /h, l/s
PID-regulator	Proporsjonal-Integrering-Derivering regulator som sørger for kontinuerlige justeringer av pådraget til elektriske eller mekaniske apparater.	-
Mengderegulering	Endring av vannmengde i et varmeanlegg for regulering av romtemperatur.	-
Temperaturregulering	Endring av temperatur på vannet i et varmeanlegg for regulering av romtemperatur.	-
TABS	Thermally Active Building Systems (Termisk aktive dekker)	-

Latent varme	Energi bundet opp i vanndamp, frigjøres ved kondensasjon.	J
Følbar varme	Energien som trengs for å endre temperaturen til et stoff uten faseendring	J
Ideell dampkompresjonssyklus	Når kuldemediet inntar kompressoren som metta damp og avkjøles ned til metta væske i kondensatoren.	-
Våtkuletemperatur	Temperaturen gir et mål for fuktighet i lufta ved den gitte tørrkuletemperaturen endring av følbar varme	°C
Tørrkuletemperatur	Temperaturen som måles direkte på et vanlig termometer dekket for stråling og fukt.	°C
PLS	Programmerbar logisk styring	-
%RF _{inne}	Relativ luftfuktighet innendørs	%
%RF _{ute}	Relativ luftfuktighet utendørs	%

Figurliste

Figur 1: Varmetap fra kroppen hentet fra SINTEF Byggforsk 421.501	8
Figur 2: Respektive mål for oppholdssone for måling av termisk komfort	10
Figur 3: Sammenheng mellom PMV og PPD hentet fra SINTEF Byggforsk 421.501	14
Figur 4: Kretsprosess for enkel varmepumpesyklus	18
Figur 5: Fasediagram for CO ₂ (Bitjungle, 2010).....	22
Figur 6: log(p)-h diagram for R744(CO ₂)	25
Figur 7: Prinsippskisse for R744(CO ₂) fremstilt i et T-s- diagram	26
Figur 8: Modifisert Lorentz syklus (Stene, 2004)	27
Figur 9: Prosent misfornøyde som funksjon av gulvtemperatur, hentet fra SINTEF Byggforsk (Mysen & Segtnan, 2017)	31
Figur 10: Skisse av huset, med tillatelse fra Isolve A/S.....	37
Figur 11: Isolve Air med varmtvannstank.....	40
Figur 12: Systemtegning for distribusjonssystemet med temperatur- og trykksensorer.....	42
Figur 13: Sponplate med spor til PEX – rørsløyfer.....	45
Figur 14:Eksempel på en fordelerstokk	46
Figur 15: Rørkurser plan 1	47
Figur 16: Rørkurser plan 2	49
Figur 17: Carel thT termostat - Romtermostat for temperatur og fuktighet montert i huset....	50
Figur 18: Termisk komfort rigg	51
Figur 19: Carel PLS; c.pCO mini high end + 2stk c.pCo extension	52
Figur 20: Swema3000 og SWA 31 for måling av luftmengder	52
Figur 21: Kimo - Måletrakt	53
Figur 22: Plasseringer av sensorer for måling av termisk komfort med respektive høyder....	56
Figur 23: Rommet det utføres målinger i markert rødt på figur.....	57
Figur 24: Fremstilling av hvordan tilkoblingen til Carel-PLS ble utført	59
Figur 25: Måleoppsett med PC, oppmåling med meterstokk og markering av høyde (hvit teip) for termisk rigg.....	60
Figur 26: Måletrakt med anemometer	61
Figur 27: Vegg Sør–Vest og Nord–Vest	62
Figur 28: Vegg Nord–Øst og Sør–Øst.....	62
Figur 29: Plassering av Termisk komfort rigg i rommet.....	62

Figur 30: Carel – Romtermostat satt til 22°C romtemperatur & 30°C turtemperatur	63
Figur 31: Carel – Romtermostat satt til 21°C romtemperatur & 29°C turtemperatur	64
Figur 32: Carel – Romtermostat satt til 20°C romtemperatur & 28°C turtemperatur	64
Figur 33: Carel – Romtermostat satt til 19°C romtemperatur & 27°C turtemperatur	64
Figur 34: Testmåling - Varmepumpe	68
Figur 35: Kompressoreffekt vs. levert effekt til oppvarming fra testmåling	68
Figur 36: Utvikling av operativ temperatur ved ulike settpunkttemperaturer, (farge for heltrukken linje tilhører stiplet linje).....	73
Figur 37: Regulering av varmesystemet sett opp mot operativ temperatur	76
Figur 38: Temperaturforløp gjennom døgnet med settpunkt 30°C turtemperatur og 22 °C romtemperatur	78
Figur 39: Utvikling av COP over døgnet med settpunkt 30 °C turtemperatur og 22 °C romtemperatur	79
Figur 40: Temperaturforløp gjennom døgnet med settpunkt 29 °C turtemperatur og 21 °C romtemperatur	80
Figur 41: Utvikling av COP over døgnet med settpunkt 29 °C turtemperatur og 21 °C romtemperatur	81
Figur 42: Temperaturforløp gjennom døgnet med settpunkt 28 °C turtemperatur og 20 °C romtemperatur	82
Figur 43: Utvikling av COP over døgnet med settpunkt 28 °C turtemperatur og 20 °C romtemperatur	83
Figur 44: Temperaturforløp gjennom døgnet med settpunkt 27 °C turtemperatur og 19 °C romtemperatur	84
Figur 45: Utvikling av COP over døgnet med settpunkt 27 °C turtemperatur og 19 °C romtemperatur	85
Figur 46: COP ved ulike settpunkttemperaturer	87
Figur 47: COP som funksjon av utetemperatur ved ulike settpunkttemperaturer.....	89
Figur 48: $\Delta T_{\text{tur-retur}}$ vs. COP som funksjon av utetemperatur ved ulike settpunkttemperaturer	91
Figur 49: Levert effekt vs. kompressoreffekt ved ulike utetemperatur	92
Figur 50: Levert effekt vs. kompressoreffekt ved ulike utetemperatur	93
Figur 51: Levert effekt vs. kompressoreffekt ved ulike utetemperatur	93
Figur 52: Levert effekt vs. kompressoreffekt ved ulike utetemperatur	94

Tabeller

Tabell 1: Faktorer som påvirker termisk komfort	7
Tabell 2: PPD-skala for vurdering av termisk inn klima.....	9
Tabell 3: Anbefalte grenseverdier for operativ temperatur basert på aktivitet	13
Tabell 4: PPD, PMV og lokal diskomfort (trekkhastighet) basert på forventningskategori	14
Tabell 5: Temperaturområde for vannbårne distribusjonssystemer	15
Tabell 6: Fordeler med lavtemperatur systemer versus konvensjonelle høytemperatur systemer.....	17
Tabell 7: Fordeler og utfordringer med CO ₂ -varmepumper versus konvensjonelle.....	23
Tabell 8: Faktorer som påvirker COP i en CO ₂ -varmepumpe	28
Tabell 9: Fordeler og utfordringer med vannbåren gulvvarme	32
Tabell 10: Oversikt over de vanligste typer av målefeil	34
Tabell 11: Romoversikt med respektive arealandeler til huset	37
Tabell 12: Resultat etter energiberegning i TEK – sjekk	38
Tabell 13: Hovedkomponenter til inneklimasentralen, se Figur 11 for modulhenvisning.....	40
Tabell 14: Beskrivelse av gulvoppbygning	44
Tabell 15: Teknisk data på det vannbårne gulvvarmesystemet i 1.etasje	48
Tabell 16: Teknisk data på det vannbårne gulvvarmesystemet 2.etasje	49
Tabell 17: Parameter for Carel thT termostat med tilhørende instrumentusikkerhet.....	50
Tabell 18: Parametere for termisk komfort rigg med tilhørende instrumentusikkerhet.....	51
Tabell 19: Parameter med tilhørende usikkerhet for SWA 31 og Swema3000	52
Tabell 20: Parametere for Kimo - Måletrakt.....	53
Tabell 21: Måledager	54
Tabell 22: Måleparameter termisk komfort	55
Tabell 23: Måleparametere varmepumpeenhet	58
Tabell 24: Måleplan varmepumpeenhet.....	58
Tabell 25: Gjennomsnittverdier fra inneklimasentral over en 10 min periode	69
Tabell 26: Snittverdier for parametere over måleperioden på 2t	69
Tabell 27: Gjennomsnittsverdier for termisk komfort under måledag 1 & 2.....	71
Tabell 28: Gjennomsnittsverdier for termisk komfort under måledag 3 & 4.....	71
Tabell 29: Gjennomsnittsverdier for inneklimasentral under måledag 1 & 2.....	74

Tabell 30: Gjennomsnittsverdier for inneklimasentral under måledag 3 & 4.....	74
Tabell 31: Eksempelberegning av kompressoreffekt og levert effekt.....	94

1 Introduksjon

I dette kapittelet presenteres bakgrunn og motivasjon for oppgaven. Søkelyset vil være å beskrive årsakene til hvorfor en skal utarbeide en feltundersøkelse rundt energieffektivitet og termisk komfort ved bruk av den nyutviklede inneklimasentralen Isolve Air med tilhørende distribusjonssystem. Det vil bli presentert «state – of – the – art» på hva status på CO₂-varmepumper til bruk i bolighus er ved å presentere hva andre har utført av tidligere forskning og hva de fant. Dette for å gi en dypere forståelse av hvorfor det skal utføres videre forskning på området. Det vil videre i kapittelet bli presentert målsetting og problemstilling samt metode og begrensinger.

1.1 Bakgrunn

I en varmepumpe ønskes lavest mulig temperaturløft for høyest mulig COP (effektfaktor). I en CO₂ – varmepumpe ønskes det lavest mulig returtemperatur på vannet inn på gasskjøler (kondensator i tradisjonelle varmepumper) for å oppnå høy COP. Teoretiske beregninger viser at reduksjon i én grad returtemperatur vil kunne gi økning på 2,5 % i COP (Stene, 2004). Den nyutviklede inneklimasentralen «Isolve Air» er en integrert ventilasjons-, varmepumpe- og energilagringseenhet, som baserer seg på det naturlige kuldemediet R744(CO₂).

Inneklimasentralen er koblet opp mot et vannbårent gulvvarmesystem, der gulvvarmesløyfene for baderom er koblet i serie med de øvrige rom. Hovedgrunnen til denne løsningen er at baderom i Norge tradisjonelt er varmere enn øvrige rom i huset, som betyr at det i teorien skal være høy nok varme i returvannet etter baderom til bruk som turtemperatur for øvrige rom. Resultatet av en slik seriekobling er at en samlet sett skal få lavere sirkulert mengde vann og en større temperaturdifferanse mellom tur -og returvann, sammenlignet med den tradisjonelle parallellkoblingen av gulvvarmekurser. Det er derfor interessant å se hvordan den nyutviklede inneklimasentralen kan sørge for økt energieffektivitet og komfort i et bolighus bygget etter gjeldende Byggeteknisk forskrift (TEK17).

1.2 Aktualitet

Energibruk i bygg

Rapporten «Global status for bygninger og konstruksjoner» viser til at bygningssektoren står for hele 38 % av globale energirelaterte CO₂-utslipp i verden når en inkluderer utslipp fra start til slutt i byggeprosessen (United Nations Environment Programme, 2020). BP sin statistikk, som tar for seg verdens energiforbruk og energiproduksjon, viser heldigvis til at bruk av fornybare energiressurser øker (bp Statistical Review of World Energy 2020, 2020). På tross av det, er det fremdeles rundt om i verdens bolig- og næringsbygg brukt konvensjonelle aktive systemer, som bruker høyeksergi(høytemperatur) løsninger for varme og kjøling, som f.eks. høytemperatur radiatorer. Da den største andelen av energibruk i bygninger kommer fra varme, kjøling og ventilasjon er det derfor viktig å benytte varme -og kjølesystemer som er energieffektive for å få ned energibruken. Dette vil sørge for at energimålsetninger om bygg som holder krav til å klassifiseres som plusshus eller nesten nullenergibygg kan oppnås. Antar en at energiforbruket øker og energikonverteringen intensifieres, vil aktualiteten rundt bruk av varmepumpeteknologi i kombinasjon med fornybare energisystemer være viktig for bruk i flere sammenhenger enn hva det gjør per dags dato (Redko et al., 2020b).

Miljø og helse

Mennesker bruker majoriteten av sin tid innendørs, og økt fokus på inneklima er viktig for å skape god livskvalitet (Nicholas Clements, 2020). Kvaliteten av innemiljøet har derfor en stor innvirkning på hver enkeltes helse. Covid-19-pandemien, forårsaket av viruset sars-CoV-2, gjør at hver enkelt person må følge strenge restriksjoner med minst mulig sosial kontakt, minimal nærkontakt og bruk av munnbind. Dette fører til at befolkningen generelt bruker mer tid innendørs i leiligheter, hus eller hytter. Det er derfor særs viktig at inneklimaet oppleves tilfredsstillende og ventilasjonen er god i rom for varig opphold.

Det norske folkehelseinstituttets (FHI) rapport med anbefalte faglige normer for inneklima oppgir faktorer, som er viktig å tenke på rundt inneklima med tanke på sykdommer og plager. Noen mennesker er mer følsomme for miljøeksponeringer enn andre grunnet de av arvelige årsaker er mer mottakelige, eller fordi de er mindre motstandsdyktige enn befolkningen generelt. Plagene og sykdommene kan typisk være hud- og slimhinneirritasjoner, hodepine og luftplager, luftveissykdommer og allergiske reaksjoner i luftveiene (Nasjonalt

Folkehelseinstitutt, 2015). Derfor er et godt termisk inneklima som sørger for nedgang av sykdomsforekomsten blant befolkningen et klart mål å arbeide mot. Resultatet vil kunne føre til positive ringvirkninger, som økt produktivitet på arbeidsplassen og derav økt økonomisk gevinst for arbeidsgiver og samfunn. Betydningen av å ha et godt inneklimasystem som sørger for å kunne skape et godt termisk inneklima samtidig som det er energieffektivt er derfor viktig ved valg av tekniske løsninger innenfor varme, kjøling og ventilasjon.

1.3 State – of – the – art: CO₂ – varmepumper

Forskning viser at bruk av det naturlige kuldemediet R744(CO₂), versus de tradisjonelle syntetiske kuldemedier i varmepumpesystemer er fordelaktig på flere områder. Saikawa et al. analyserte ytelsen av en luftbasert varmepumpe for oppvarming av varmtvann med ulike kuldemedier opp mot den ideelle dampkompresjonssyklusen (se definisjon side vi). De syntetiske kuldemediene (R22, R32, R134a, R407C, R410A) og de naturlige kuldemediene (CO₂, propan, Isobutan og propylen) ble brukt. Resultatet viste at CO₂ ga klart høyest COP ved oppvarming av varmt tappevann. Det ble så utviklet en prototyp CO₂-varmepumpe for oppvarming av varmt tappevann til bolighus. Prototypen ga da en COP på 3,4 ved testbetingelser ved oppvarming av varmtvann fra 8 – 65 °C ved 8 °C omgivelsestemperatur. Videre studier viste at ved oppvarming av varmtvann fra 17 – 65 °C ved tørrkuletemperatur på 16 °C/ 12 °C våtkuletemperatur ga et resultat med COP - verdi på 6 i vår-/høstsesongen i Japan (Michiyuki & Shigeru, 2016).

Richter et al. utførte en eksperimentell analyse der det ble utført sammenligning av en prototyp CO₂ – varmepumpe versus R410A varmepumpe til romoppvarming. Resultatet viste at CO₂-varmepumpen hadde litt lavere COP, men høyere kapasitet ved lavere utetemperaturer. Dette igjen ville redusere behovet for ekstra spisslast ved bruk av CO₂ versus R410A (Richter et al., 2003).

Zhijia et al. utførte en analyse av en transkritisk CO₂-varmepumpe kombinert med termisk energilagring i et småhus i Kina under vintersesongen. Ved bruk av simuleringssystemet TRNSYS sammenlignet de resultatene med en CO₂-varmepumpe uten termisk energilager en hel varmesesong. Simuleringsresultatene viste at bruk av termisk energilager bidro til økning av varmepumpesystemets effektfaktor for romoppvarming (Zhijia et al., 2019).

Jørn Stenes doktoravhandling gikk nærmere på analyse av en brine – til – vann CO₂ – varmepumpe for romoppvarming og varmt tappevann til bruk i småhus (Stene, 2004). Denne varmepumpen var basert på en 3-parts gasskjøler med henholdsvis 3 varmemoduser. (1) romoppvarming, (2) varmtvann og (3) kombinert romoppvarming og varmtvann. Resultatet viste at en slik varmepumpe ville oppnå lik eller høyere SPF(Seasonal Performance Factor) enn de fleste energieffektive «state – of – the – art» brine – til – vann – varmepumper med grensebetingelser definert i Stenes avhandling (Stene, 2004). I motsetning til konvensjonelle varmepumpesystemet for kombinert romoppvarming og varmt tappevann, vil en integrert CO₂-varmepumpe oppnå høyest COP i kombinert modus og modus for varmt tappevann. Lavest COP vil bli oppnådd ved kun romoppvarmingsmodus. For å minske eksergitapet ved romoppvarming ble det funnet ut at eneste mulighet var å senke vanntemperaturene. Dette betyr at vannbåren gulvvarme, Fan Coils og konvektorer er anbefalt versus tradisjonelle høytemperatur radiatorer. Stene (2004) fant videre ut at desto lavere returtemperaturer i romoppvarmingssystemet og jo lavere varmtvannstemperatur ville resultere i at en kan drifte varmepumpen i kombinert modus for å dekke romoppvarmingsbehovet. Dette vil sørge for en total økning av COP (Stene, 2004).

Forskning viser at det samlet sett gir gode resultater ved bruk av CO₂ som kuldemedium i varmepumper versus bruk av syntetiske kuldemedier, men at det enda er lite forskning rundt bruk av integrert CO₂-varmepumpe for romoppvarming og varmt tappevann i bolighus. Derfor vil det å utføre feltnmålinger på en nyutviklet inneklimasentral med en varmepumpe basert på kuldemediet CO₂ være høyaktuelt å sette i videre søkelys.

1.4 Målsetting og problemstilling

Målsetting

Målet med oppgaven er å undersøke om den nyutviklede inneklimasentralen som baserer seg på en integrert CO₂-varmepumpe for romoppvarming og varmt tappevann, kombinert med en seriekoblet gulvvarmekurs, kan sørge for god termisk komfort og ytelse til bruk i bolighus bygget etter dagens Byggteknisk forskrift (TEK17). Oppgaven skal gi beskrivelse av hvordan et slikt system regulerer i henhold til effektivitet rundt romoppvarming, og hvordan det klarer å oppnå god termisk komfort med en gulvvarmekurs der baderomskursen er koblet i serie med de øvrige rom i et bolighus. Kunnskapen fra målinger og analyse i etterkant kan benyttes til å gi økt bruk av slike inneklimasentraler i bolighus og brukes som inspirasjon til videre utvikling.

Problemstilling

«Vil den nyutviklede inneklimasentralen klare å oppnå like god effektivitet og sørge for god komfort sammenlignet med konvensjonelle luft til vann –varmepumper?»

Det er flere forskningsspørsmål som skal besvares i tillegg til problemstillingen:

- Vil den termiske komforten endres ved justering av rom- og turtemperatur?
- Hvordan vil effektiviteten til varmepumpen endres ved endring av settpunkttemperatur?
- Vil romtemperaturen oppnå sitt romtemperatursettpunkt ved bruk av et seriekoblet gulvvarmesystem?
- Hvordan vil det integrerte systemet, som er laget for å levere lavest mulig returtemperatur fungere i praksis?
- Klarer enheten å levere stabil turtemperatur til oppholdsrom ved innstilt nivå når disse er koblet i serie med baderommet?
- Ved hvilke settpunkttemperaturer vil COP være på sitt høyeste?

1.5 Metode

Metoden som blir brukt er å utføre en litteraturstudie over tidligere forskning der hovedmålet er å sørge for å få en helhetlig oversikt innenfor temaene varmepumpe, CO₂-varmepumper, laveksergi systemer, termisk komfort, vannbåren gulvvarme samt hvordan måleusikkerhet må tas med i betraktning ved feltmålinger. Kvantitativ metode blir brukt ved innsamling og analyse av data til å teste hypotesene og delspørsmålene. Ved undersøkelse av den termiske komforten i huset vil det bli valgt et rom, der gulvvarmesløyfene er koblet i serie med baderomskursen. Her vil det bli tatt målinger der settpunkt for henholdsvis rom – og turtemperatur blir endret med én grad ved samme tidspunkt for hvert døgn over en 4 – dagers periode. Det vil være totalt 6 – dager med måling der to av dagene blir brukt for funksjonstesting av utstyr for termisk komfort og for å sikre at alt går som planlagt ved endring av settpunkttemperatur i varmepumpesystemet. Varmepumpens PLS (styringssystem) vil logge aktuelle parametere til bruk i analyse. Målingene skal kunne gi bakgrunn for videre analyse av termisk komfort og effektivitet for romoppvarming ved bruk av et slikt system. Det er også viktig å dokumentere nødvendige begrensinger ved feltmålingene ved å definere og validere instrumenter som blir benyttet med nødvendig dokumentasjon i henhold til usikkerhet.

1.6 Begrensinger

Hovedmålet var å undersøke hvordan den nyutviklede inneklimasentralen påvirket termisk komfort og energieffektivitet til varmepumpen. Ved beregning av energieffektivitet for varmepumpen ble den totale leveransen av varme til romoppvarming sett på. Total effektfaktor for hele gulvvarmesystemet ble beregnet da det ikke var praktisk mulig å se på kun en gulvvarmesløyfe. Det ble valgt ut et kritisk rom for analyse av termisk komfort da det ikke var praktisk gjennomførbart å måle i hvert rom i huset. I denne oppgaven ble termisk komfort begrenset til måling ved referanse høyde 0,6 m for termisk komfort.

2 Teori

Kapittelet er ment for å kunne gi relevant bakgrunnsinformasjon og teori rundt temaene termisk komfort, lavtemperatur varme & høytemperatur kjøling, varmpumper, CO₂-varmpumper, vannbåren gulvvarme samt målenøyaktighet og usikkerhet rundt feltmålinger.

2.1 Termisk komfort

Termisk komfort er definert som en subjektiv følelse eller sinnstilstand der vi er tilfreds med det termiske innklimaet (Mysen & Segtnan, 2017). Termisk komfort avhenger av beklledning, aktivitetsnivå, metabolisme og sinnstilstand til hvert enkelt menneske, samt det termiske innklimaet som baserer seg på de fysiske parameterne:

- Lufttemperatur
- Lufthastighet i oppholdssonen
- Strålingstemperatur fra omkringliggende flater
- Relativ fuktighet

Påvirkning fra rommet og klimaanlegget er også med på å bestemme den termiske komforten i rommet. Ønsket komfort i bygget oppnås som et resultat av å ha kontroll på luftens temperatur, hastighet, stråling fra omgivelser og temperatur på overflater slik Tabell 1 viser.

Tabell 1: Faktorer som påvirker termisk komfort

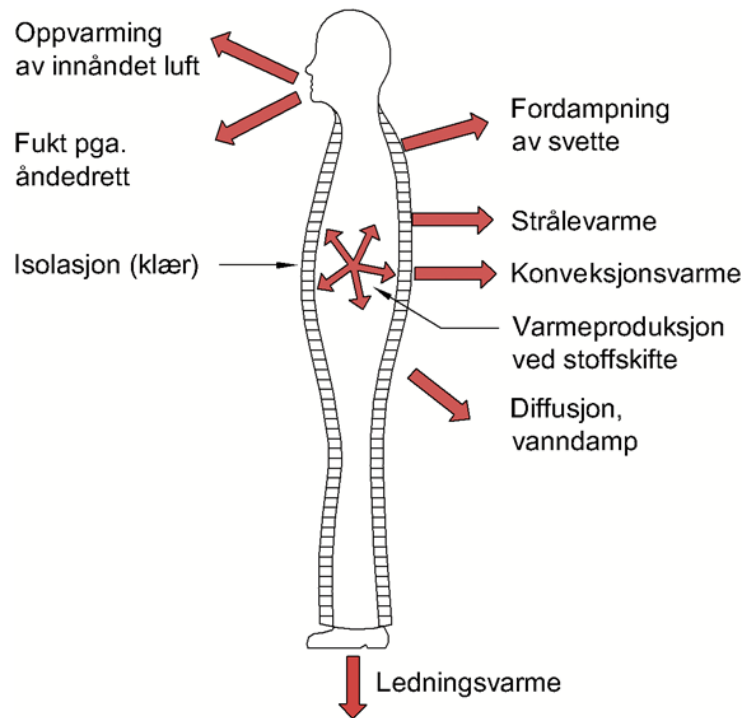
Påvirkning	Faktorer
Menneske	Bekledning, aktivitetsgrad, oppholdstid
Rom	Temperatur på begrensingsflater og strålingskilder
Klimaanlegg	Lufttemperatur, Luftbevegelse og luftfuktighet

(Sintef & Norges teknisk-naturvitenskapelige, 2007a)

Kroppens varmebalanse

Byggforsk 421.501 har beskrevet to betingelser for at kroppen skal opprettholde god termisk komfort i kroppen som helhet (Mysen & Segtnan, 2017).

- Kroppens kjerne- og hudtemperatur må gi en følelse av termisk nøytralitet.
- Varmeproduksjon må være lik varmeavgivelse fra kroppen til omgivelsene. Figur 1 viser aktuelle varmetap fra kroppen.



Figur 1: Varmetap fra kroppen hentet fra SINTEF Byggforsk 421.501

2.1.1 PMV & PPD

Det er umulig å oppnå et romklima som tilfredsstillende alle mennesker. Ved vurdering av termisk innesklima avviker ofte det termiske innesklimaet fra det optimale for hver enkelt person i praksis. PMV – og PPD – indeksen er derfor utviklet til å kunne gi en vurdering av det termiske innesklimaet. Disse to standardiserte indeksene uttrykker hvor varm eller kald kroppen føles som helhet, og kan si hvor akseptabelt det termiske innesklimaet føles (Mysen & Segtnan, 2017).

PMV – indeks

PMV står for «Predicted Mean Vote», og gir en gjennomsnittlig vurdering av det termiske innesklimaet hos en gitt gruppe mennesker (Sintef & Norges teknisk-naturvitenskapelige, 2007a). Indeksen er basert på en psykofysisk sjutrinns skala presentert i Tabell 2. En PMV-verdi på 0 vil da innebære termisk nøytralitet.

Tabell 2: PPD-skala for vurdering av termisk innesklima

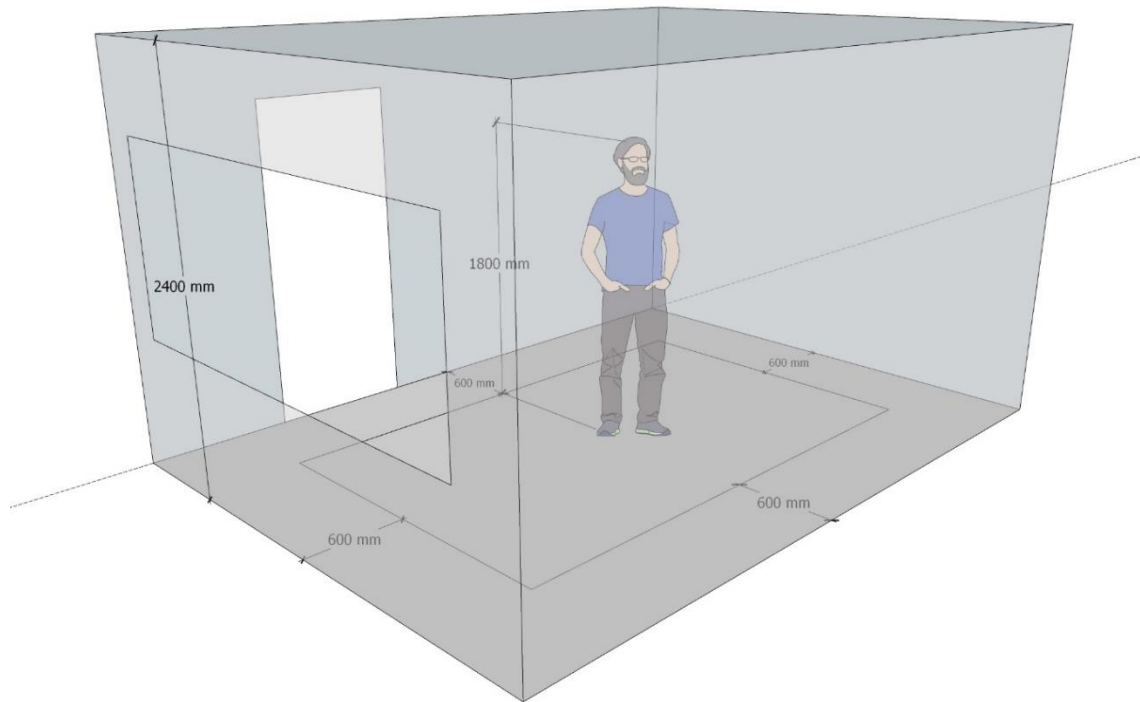
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
kaldt	kjølig	noe kjølig	nøytralt	noe varmt	varmt	hett

PPD – indeks

PPD står for «Predicted Percentage of Dissatisfied» og gir et kvantitativt anslag for hvor mange prosent av en større gruppe mennesker som vil være misfornøyd med det termiske innesklima ved gitt bekledding og aktivitet (Sintef & Norges teknisk-naturvitenskapelige, 2007a).

2.1.2 Oppholdssone

Kravene til termisk komfort gjelder i en definert oppholdssone slik SINTEF Byggforsk beskriver det i datablad 421.501 (Mysen & Segtnan, 2017). Oppholdssone defineres 1,8 m over gulv og 0,6 m ut fra veggflater, se Figur 2.



Figur 2: Respektive mål for oppholdssone for måling av termisk komfort

2.1.3 Operativ temperatur

Operativ temperatur er et gjennomsnitt av lufttemperatur og middelstrålingstemperatur og er det viktigste målet for beregning av termisk komfort (Holøs & Segtnan, 2016).

Middelstrålingstemperatur kan beregnes etter formel (3) eller (4) side 11. Operativ temperatur beregnes etter formel (1) forutsatt en relativ lufthastighet lavere enn 0,2 m/s, der forskjellen mellom middelstrålingstemperaturen og lufttemperaturen er mindre enn 4 K (Standard Norge, 2001).

$$T_o = \frac{T_a - \bar{T}_r}{2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1)$$

\bar{T}_r = Middelstråletemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

T_a = Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

Ved høyere lufthastighet kan formel (2) benyttes for beregning av relativ lufthastighet (Ingebrigtsen, 2019).

$$v_{ar} = v + 0,005 * (M - 58) \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

Der:

$$v = \text{Lufthastighet} [\text{m/s}]$$

$$M = \text{Aktivitet} [\text{W/m}^2]$$

2.1.4 Middelstrålingstemperatur

Middelstrålingstemperaturen er like viktig for varmebalanse og termisk komfort som lufttemperaturen. Den avhenger av temperaturer på de omliggende flatene i forhold til om en person er stående eller sittende, og hvor personen befinner seg i fra de omliggende flatene (Ingebrigtsen, 2019).

Middelstrålingstemperatur beregnes etter formel (3) hentet fra NS EN 7726 (Standard Norge, 2001):

$$\bar{T}_r^4 \bar{T}_r = \bar{T}_r^4 F_{P-1} + \bar{T}_r^4 F_{P-2} + \dots + \bar{T}_N^4 F_{P-N} \quad [\text{K}] \quad (3)$$

Der:

$$\bar{T}_r = \text{Middelstrålingstemperatur} [\text{K}]$$

$$T_n = \text{Overflatetemperatur på flate N} [\text{K}]$$

$$F_{p-n} = \text{Vinkelfaktor fra person til flate N i rommet} [-]$$

(Ingebrigtsen, 2019)

Ved målt globetemperatur på høyde 0,6 m over gulv kan formel (4) benyttes gitt av SINTEF Byggforsk 421.501 (Mysen & Segtnan, 2017).

$$t_{fm} = t_g + 2,2 \cdot (t_g - t_L) \cdot v^{0,5} \quad [^\circ\text{C}] \quad (4)$$

Der:

$$t_g = \text{målt globetemperatur} [^\circ\text{C}]$$

$$t_L = \text{lufttemperatur} [^\circ\text{C}]$$

$$v = \text{lufthastighet} [\text{m/s}]$$

2.1.5 Lufthastighet & Trekkhastighet

Luftbevegelse i oppholdssonen har stor betydning for vår termiske komfort. Ved for høy lufthastighet ($> 0,15$ m/s) kan trekk oppfattes som ubehagelig mot bar hud, som ankler og nakke. Trekk er luftbevegelse som gir avkjøling av kroppen og kan forårsake sterkt ubehag (Ingebrigtsen, 2019).

Trekkhastighet (Draught rate) er en funksjon basert på lokal lufthastighet og temperatur og er et mål på hvordan den termiske komforten føles som helhet. Denne kan beregnes etter formel gjengitt fra NS-EN ISO7730 (Standard Norge, 2005).

$$DR = (34 - t_{a,l}) \cdot (\bar{v}_{a,l} - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot \bar{v}_{a,l} \cdot Tu + 3,14) \quad (5)$$

For $\bar{v}_{a,l} < 0,05 \frac{m}{s}$ bruk $\bar{v}_{a,l} = 0,05$ m/s

For DR $> 100\%$ benytt DR = 100%

Der:

$t_{a,l}$ = lokal lufttemperatur, fra 20- 26 °C

$\bar{v}_{a,l}$ = Lokal gjennomsnittlig lufthastighet, $< 0,5$ m/s

T_u = Lokal turbulensintensitet, 10-16% (Hvis ukjent kan 40% som verdi benyttes)

2.1.6 Relativ Fuktighet

Relativ fuktighet (%RF) er et mål på innholdet av vanndamp i luften i forhold til vanndampinnholdet ved metning ved aktuell temperatur (Holøs & Segtnan, 2016). Ved relativ fuktighet under 20 %RF vil ubehag oppstå i form av økt avgassing og uttørking av slimhinner. Ved for høy %RF ($>70\%$) vil det skape gode vekstforhold for muggsopp og husstøvmidd over tid (Becher et al., 2016). Mennesket har generelt god toleranse for variasjon i %RF, og optimal %RF ligger en plass mellom 20 – 60 %, og lavere enn 40 % de to – tre kaldeste vintermånedene grunnet fuktproblematikk (Mysen & Segtnan, 2017).

2.1.7 Krav, vurdering og anbefaling av termisk inneklima

Krav

For boliger er det krav til termisk komfort angitt etter § 13 – 4 i Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning.

- «Termisk inneklima i rom for varig opphold skal tilrettelegges ut fra hensynet til helse og tilfredsstillende komfort ved forutsatt bruk» (DIBK, 2017d).
- «I rom for varig opphold skal minst ett vindu eller én dør kunne åpnes mot det fri og til uteluft» (DIBK, 2017d).

Anbefaling – TEK17

I boliger har brukerne mulighet til å tilpasse seg høy innetemperatur, ved å ta på seg lettere bekledning eller ved å åpne vindu/dør for gjennomlufting i oppholdssonen. § 13 – 4 kommer med disse anbefalingene:

- Lufttemperatur bør holdes under 22 °C ved oppvarmingsbehov
- Maks lufttemperaturforskjell over 3 – 4 °C mellom føtter og hode
- Daglig periodisk temperaturvariasjon utover 4 °C gir uakseptabelt ubehag

TEK17 anbefaler grenseverdier for operativ temperatur med en begrensing på å kunne overstige denne opp mot 50 timer i et normalår. Dette spesielt med tanke på de varme sommermånedene.

Tabell 3: Anbefalte grenseverdier for operativ temperatur basert på aktivitet

Aktivitetsgruppe	Lett arbeid	Middels Arbeid	Tungt Arbeid
Temperatur [°C]	19 – 26 °C	16 – 26 °C	10 – 26 °C

(DIBK, 2017d)

Vurdering av termisk inneklime: NS – EN ISO 7730

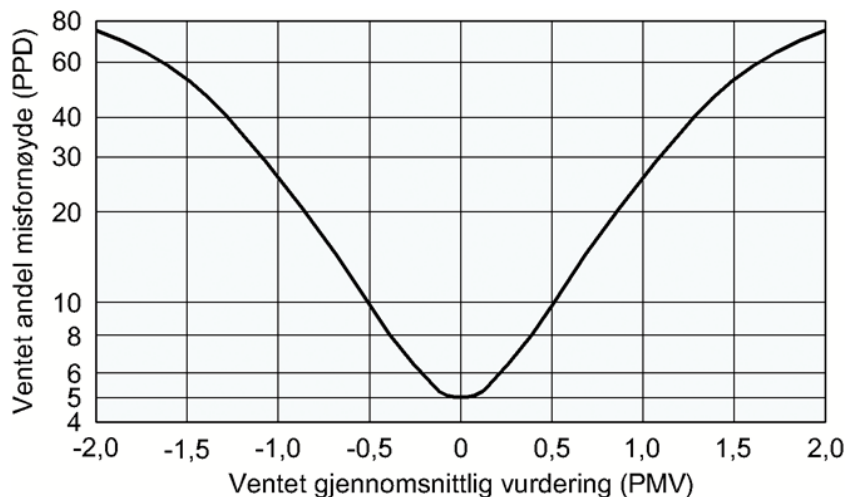
Tabell 4 viser henholdsvis kategori basert på forventningsnivå, PPD, PMV og operativ temperatur. Vurdering av parametere er klassifisert etter kategori I – IV for boligbygning med aktivitetsnivå 1,2 Met gjengitt i NS – EN ISO 7730.

Tabell 4: PPD, PMV og lokal diskomfort (trekkhastighet) basert på forventningskategori

Kategori (Boligbygning)	Termisk tilstand til kroppen som helhet		Lokal diskomfort
	PPD [%]	PMV	
Boligbygg, oppholdsrom.	PPD [%]	PMV	DR [%]
I	< 6	-0,2 < PMV < +0,2	< 10
II	< 10	-0,5 < PMV < +0,5	< 20
III	< 15	-0,7 < PMV < +0,7	< 30
IV	< 25	-1,0 < PMV < +1,0	-

Disse verdiene er angitt etter 50 %RF og < 0,1m/s lufthastighet (Standard Norge, 2005).

NS – EN ISO 7730 anbefaler grenseverdier for PMV i området $-0,5 < PMV < +0,5$ som tilsvarer en verdi på PPD < 10 %. Dette vil si at minimum 90 % er fornøyde med det termiske inneklimate (se Figur 3).



Figur 3: Sammenheng mellom PMV og PPD hentet fra SINTEF Byggforsk 421.501

2.2 Lavtemperatur varme og høytemperatur kjøling

Kjøling ved høy temperatur (14 – 22 °C) og oppvarming ved lave temperaturer (25 – 45 °C) er hovedprinsippet til lavtemperatur varme -og kjølesystemer. Systemet opererer da ved temperaturer i anlegget nær romtemperatur (Hepbasli, 2012). Dette oppnås ved å redusere temperaturforskjell i varmeoverføring –og energitransportprosessen, som øker energieffektiviteten på det tekniske inneklimatestet ved utnyttelse av fornybare energikilder. Resultatet er et mer behagelig og sunt inneklimatestet (Yi Jiang, 2015).

Teknisk utvikling

Byggenæringen står for ca. 38 % av det totale energiforbruket i verden (bp Statistical Review of World Energy 2020, 2020). Utvikling av tekniske løsninger i retning høytemperatur til lavtemperatur er derfor viktig for å senke energiforbruket. Ved bruk av et slikt system vil det være gunstig i henhold til reduksjon av CO₂-utslipp, som er en av hovedårsakene til global oppvarming. Forskning viser at ved reduksjon i én grad turtemperatur i varmesystemet, vil CO₂-utslippet reduseres med 1,6 % (Arefeh Hesaraki, 2015).

Temperaturområde

Tradisjonelle lavtemperaturanlegg opererer i området 25 – 45 °C der det typisk er en reduksjon på 5 °C over heteflaten. En heteflate kan eksempelvis være gulvoverflaten ved vannbåren gulvvarme. Tabell 5 viser typiske temperaturområder i ulike vannbaserte systemer (Petr et al., 2017). Typisk konvensjonelle radiatorsystemer er kjent for å bruke høye temperaturer, derav mye eksergi, mens gulvvarme er typisk laveksergi – system.

Tabell 5: Temperaturområde for vannbårene distribusjonssystemer

Vannbaserte systemer	Vanntemperaturer		System
	Tur [°C]	Retur [°C]	
Høytemperert	>55	70	Radiatorer
Medium temperert	45 – 55	35 – 40	Lavtempererte radiatorer
Lavtemperert	25 – 45	35 – 25	Vegg-/gulv-/takvarme

2.2.1 Eksergi og Anergi

Benyttelse av lavtemperatur – systemer, også kalt laveksergi – systemer, trenger en liten andel termisk energi (varme) til å produsere mekanisk arbeid sammenlignet med høyeksergi løsninger, eksempelvis høytempererte radiatorer.

Energi består av to deler – Eksergi og Anergi. Eksergi er den utnyttbare delen av termisk energi, som teoretisk kan omsettes til mekanisk arbeid (Çengel et al., 2015a). Anergi er energi som teoretisk ikke kan utnyttes til arbeid, men varme (Delphin, 2018). Eksergi følger termodynamikken to hovedsetninger (Çengel et al., 2015b)

- 1. hovedsetning – Energi kan ikke lages eller ødelegges; den kan bare endre seg i form.
- 2. hovedsetning – Energi beveger seg alltid fra høytemperert til lavtemperert sted.

Summen av eksergi og anergi er uforanderlig. Det er derfor viktig å benytte lave temperaturer i varmeanlegg, som har lavt eksergiinnhold for bedre utnyttelse av energien. Beregning av varmeleveranse kan ses i Formel (6):

$$Q = \dot{m} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (6)$$

Der:

Q = Varmeleveranse [W]

\dot{m} = Massestrøm [kg/s]

C_p = Spesifikk varmekapasitet vann, 4183 [J/(kg*K)]

ρ = massetetthet for vann, 1000 [kg/m³]

ΔT = Temperaturdifferanse mellom tur –og returvann [K]

2.2.2 Energifleksibilitet og energieffektivitet

Fordelene ved benyttelse av lave temperaturer i varmeanlegg skaper større fleksibilitet og frembringer større mulighet for bygninger av høy kvalitet både energi –og komfortmessig. Sammenlignet med konvensjonelle høytemperatur systemer er det mange fordeler ved benyttelse av et lavtemperert varmesystem som vist i Tabell 6 (Hepbasli, 2012).

Tabell 6: Fordeler med lavtemperatur systemer versus konvensjonelle høytemperatur systemer

System	Fordel
Lavtemperert	<ul style="list-style-type: none">• Økt komfort• Økt energieffektivitet• Romeffektiv• Stort applikasjonsområde• Reduksjon av total sirkulert vannmengde• Selvregulering

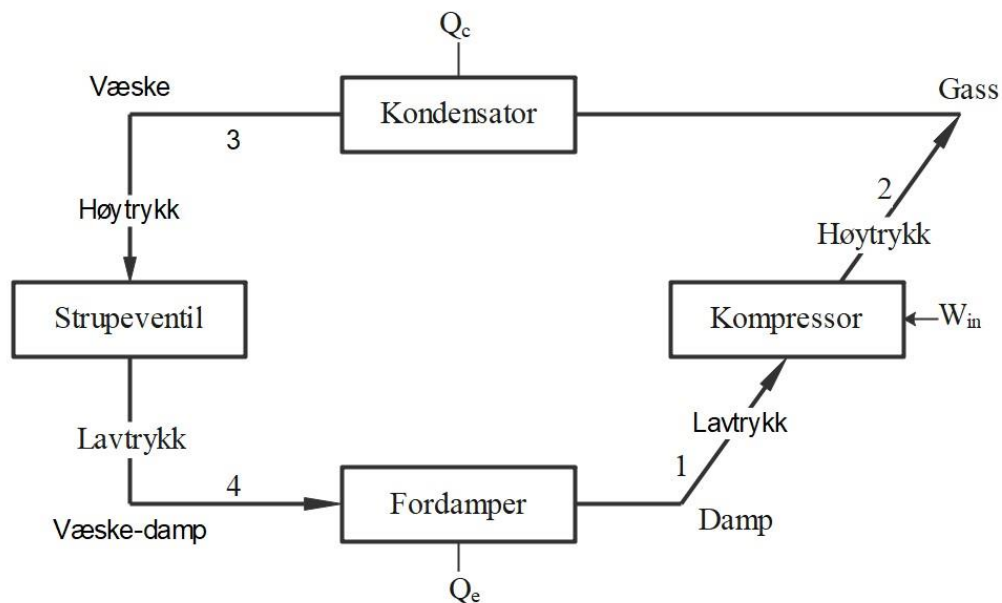
Analyser av energi og eksergi rundt varmeproduksjon og varmeemisjon viser at varmesystemer med lave temperaturer er mer energieffektive å bruke, sammenlignet med konvensjonelle varmesystemer (Arefeh Hesaraki, 2015). Dette vil også være fordelaktig for andre energikilder som solfangere eller kondenserende gasskjelsystemer med lave temperaturer (SINTEF 552.102). Ved eksempelvis bruk av 40 °C turtemperatur på vannet istedenfor 55 °C, vil en varmepumpe øke effekten med 25 % og minske CO₂ – utslippet med 24 %. Grunnet de lave temperaturløftene mellom varm og kald side er det derfor særdeles gunstig i kombinasjon med en varmepumpe, der en vil oppleve å gå fra en typisk Coefficient of Performance (COP) i området 3 – 6 helt til verdier opp mot 6 – 13 (Forrest Meggers, 2012). Kort fortalt vil det si at for hver kilowatt elektrisitet som tilføres varmepumpesystemet produseres det 6 – 13 kWh varme til bygget.

2.3 Varmepumper

En varmepumpe henter termisk energi, vanligvis fra omgivelsene i form av uteluft, grunnvann eller sjøvann og leverer varme med en høyere temperatur ved hjelp av tilført elektrisitet. En varmepumpe kan benyttes til romoppvarming, oppvarming av ventilasjonsluft, oppvarming av varmt forbruksvann og til kjøling av bygg. De kan også benyttes i fjernvarme – og fjernkjølesystemer, samt inngå i industrielle prosesser slik SINTEF Byggforsk beskriver det (Stene & Chr.Krohn, 2009).

Oppbygning

En varmepumpe består forenklet av fire hovedkomponenter (Figur 4): Strupeventil, fordamper, kompressor og kondensator (gasskjøler ved CO₂ som arbeidsmedium). Alt dette er koblet sammen i et lukket rørsystem hvor det sirkulerer et arbeidsmedium av naturlige eller syntetiske væsker (se kap. 2.3.1). Figur 4 viser varmepumpeprosessens kretsløp. Arbeidsmediet sirkulerer ut fra fordamper med lavt trykk (1) gjennom kompressoren, som skyter ut ved høyt trykk (2) før det går videre til kondensator der det avgis varme for deretter å strupe arbeidsmediet gjennom en strupeventil (3 – 4) slik at trykket synker, og omdannes til en væske – dampblanding før den sirkulerer inn i fordamper igjen.



Figur 4: Kretsprosess for enkel varmepumpecyklus

2.3.1 Arbeidsmedium

Arbeidsmedium også kalt kuldemedium, er brukt i alle typer varmepumpeprosesser. Kuldemediet får et nummer basert på den kjemiske sammensetningen som stoffet er bygget opp av med antall fluor, karbon, hydrogen, klor eller bromatomer (Nydal, 2013a). Hvert enkelt arbeidsmedium har egne egenskaper i henhold til trykk, temperatur, volumetrisk ytelse, energieffektiviteten og miljø- og sikkerhet (Stene & Chr.Krohn, 2009). Selve varmepumpeprosessen presenteres vanligvis i et fasediagram for trykk – entalpi for arbeidsmediet slik Figur 6 side 25 viser for arbeidsmediet R744 (CO₂).

Dagens arbeidsmedium er i hovedsak delt inn i to hovedgrupper – syntetiske og naturlige:

1. Syntetiske arbeidsmedier er halogenerte hydrokarboner (HFK) typisk R134a, R410A, R407C. Ved utslipp har HFK – mediene 1300 til 2000 ganger høyere påvirkning på drivhuseffekten enn CO₂.
2. Naturlige arbeidsmedier har ingen negativ innvirkning på det globale miljøet ved utslipp grunnet de finnes naturlig i jordas biosfære. De største utfordringene er giftighet (ammoniakk), brennbarhet (hydrokarboner) og høye anleggstrykk (CO₂)

(Stene & Chr.Krohn, 2009)

2.3.2 Effektfaktor

Effektiviteten av en varmepumpe blir målt etter «Coefficient of Performance» (COP) og er forholdet mellom avgitt termisk effekt og elektrisk effekt tilført varmepumpen.

Temperaturløftet (ΔT) til en varmepumpe har mye å si for driften av en varmepumpe. Altså hvor mye varmepumpen må heve temperaturen fra energikilden for å levere varme med riktig temperatur. Lavest mulig ΔT vil resultere i høy COP. En tommelfingerregel er at for hver grad ΔT synker vil teoretisk COP øke med 2 – 3 %. Typiske COP – verdier for varmepumper i Norge ligger mellom 2 – 4.

Carnot-syklus

Den teoretisk maksimale effektfaktoren en varmepumpe kan oppnå mellom lavtemperatur kilde og høytemperatur kilde er definert av Carnot-prosessen. Der temperaturen er målt i Kelvin.

$$COP_{Carnot} = \frac{T_H}{T_H - T_L} \quad (7)$$

Der:

T_H = Høytemperaturkilde [K]

T_L = Lavtemperaturkilde [K]

En mer praktisk tilnærming av effektfaktoren til varmepumpen er beregnet etter formel (8):

$$COP_{HP} = \frac{Q}{W} = \frac{\dot{V} \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{tur} - T_{retur})}{W} = \frac{\text{Levert effekt}}{\text{Tilført effekt}} \quad (8)$$

Der:

\dot{V} = Volumstrøm [m^3/s]

ρ = Densitet vann [kg/m^3]

C_p = Spesifikk varmekapasitet [$\text{kg}/(\text{kJ} \cdot \text{K})$]

W = Kompressoreffekt [kW]

Q = Levert effekt [kW]

2.3.2.1 Årsvarmefaktor

Varmepumper blir også målt etter teoretisk årsvarmefaktor (SCOP), som gjengir hvor mye gjennomsnittlig effekt en varmepumpe bruker på å levere (kun) varme gjennom et helt år. Beregning av SCOP er basert på fabrikkdata etter kald, medium eller varm klimasone og angir hvor stor energigevinst du i beste fall kan forvente ved optimale forhold. I Norge er de fleste steder å betrakte som kald klimasone. Når varmepumpen derimot er satt i drift i et bygg er det normalt å se på faktisk årsvarmefaktor SPF (Seasonal Performance Factor) når en ser på energiforbruket over et år for et anlegg som kun leverer varme, og beregnes etter Formel (9).

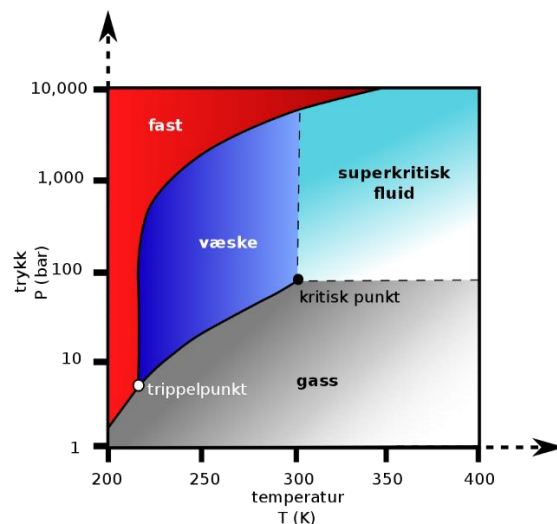
$$SPF = \frac{\text{Total årlig varmeleveranse fra varmepumpe}}{\text{Totalt årlig tilført energimengde}} \quad (9)$$

Åsvarmefaktoren er i praksis lavere enn COP – verdien som produsenter bruker å oppgi i teknisk datablad for den enkelte varmepumpe. Det er derfor viktig å se på hva årsvarmefaktor til varmepumpen er ved kjøp av disse. Norsk VVS Energi – og Miljøteknisk Forening på oppdrag fra ENOVA utførte en analyse av feltmålinger på varmepumper i boliger i området Oslo/Bærum i 2012 –2013. Resultatet viste at det kan forventes en gjennomsnittlig årsvarmefaktor på 1,73 med en variasjon fra 1,14 – 2,27 i luft til vann - varmepumpeanlegg (Linda P. Haugerud, 2015). Det viser seg derfor at selv om eksempelvis COP – verdien er testet under ideelle forhold til å være 4, vil årsvarmefaktoren være betraktelig lavere og må tas med i betraktning ved valg av varmepumpeanlegg.

2.4 CO₂-varmepumpe

2.4.1 CO₂ som kuldemedium i varmepumper

Varmeoverføringsegenskapene til karbondioksid er spesielt gunstige i forhold til andre kuldemedier. Fasediagrammet for CO₂ (Figur 5) viser trippelpunktet hvor fasene fast, væske og gassform ligger på ca. 5,2 bar og -56,6 °C. Under denne temperaturen vil gassen kondensere til en væske som ved -78 °C fryser til fast stoff, kalt tørris. Det kritiske punktet ligger på 73,8 bar og 31,1 °C (Haakon Haraldsen, 2021). Over dette punktet vil det være en superkritisk væske. En veksling over/under kritisk punkt kalles transkritisk, og er i dette området en CO₂-varmepumpe som oftest opererer.



Figur 5: Fasediagram for CO₂ (Bitjungle, 2010)

Subkritisk prosess

Subkritisk prosess er den vanlige varmepumpeprosessen der varmeavgivelse skjer ved hjelp av faseovergang i kondensatoren. Her vil CO₂ gå fra gass – til væskeform via latent varme frigjort i faseovergangen. Grunnet den lave kritiske temperaturen til CO₂ vil en kun kjøre subkritisk når temperaturen ut av gasskjøler er under 31,1 °C. Her vil da gasskjøler fungere likt som en kondensator i en tradisjonell varmepumpe.

Transkritisk prosess

Forskjellen mellom CO₂ – varmepumper versus tradisjonelle varmepumper er at den kan avgi varme i den superkritiske fasen. Dette gjør at arbeidsmediet ikke gjennomgår noen faseovergang ved varmeavgivelse. All energien blir da overført som følbare varme.

2.4.2 Karakteristikk

En CO₂ – varmepumpe opererer med 30 – 120 bar sammenlignet med en varmepumpe med syntetiske kuldemedier, som opererer med 5 – 10 ganger mindre trykk (20 – 40 bar) (Stene, 2008). Dette gjør at CO₂ har stor volumetrisk ytelse sammenlignet med andre kuldemedier, derav vil dimensjoner på rør og komponenter bli tilsvarende mindre (Nydal, 2013b). Fordelen med CO₂ versus syntetiske arbeidsmedier er at kuldemediet finnes naturlig. Tabell 7 viser videre fordeler og utfordringer med bruk av CO₂ som kuldemedium.

Tabell 7: Fordeler og utfordringer med CO₂-varmepumper versus konvensjonelle

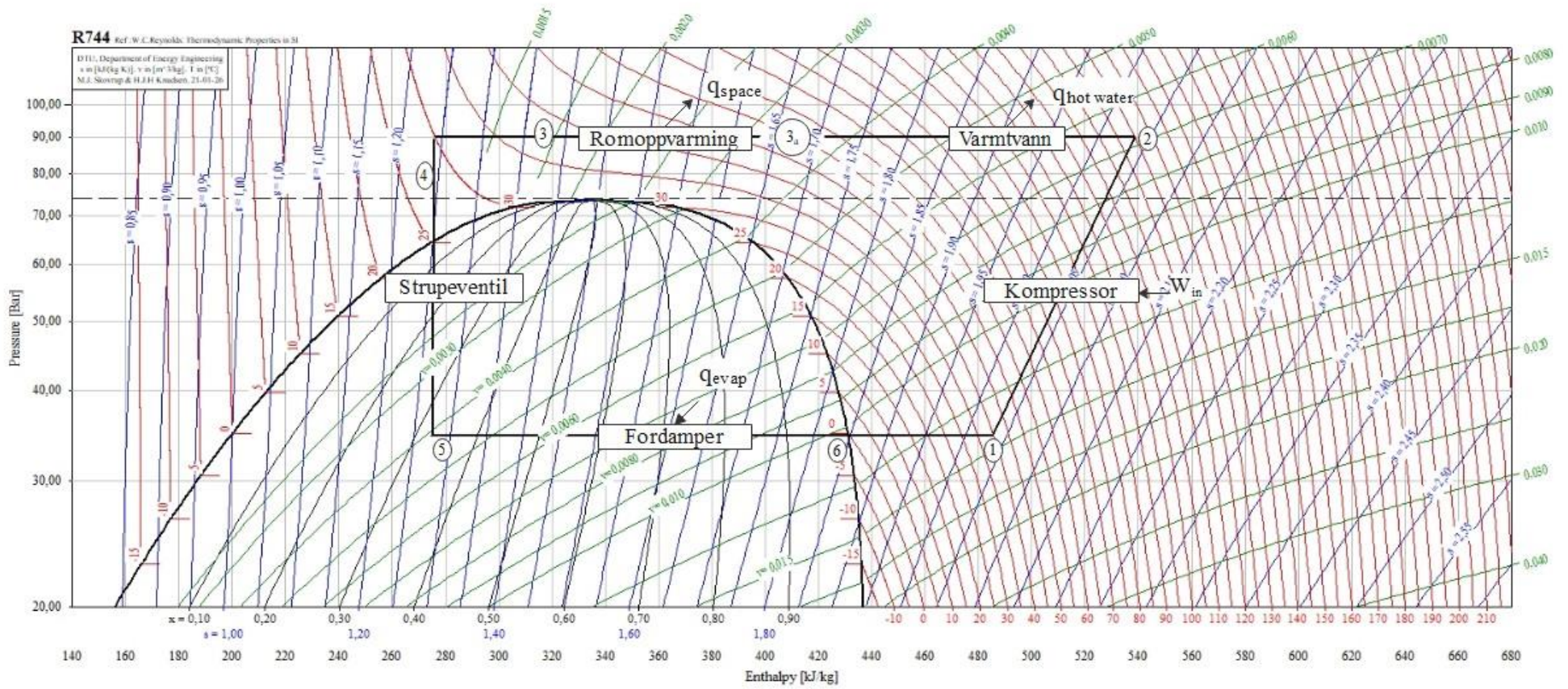
Arbeidsmedium	Fordeler	Utfordringer
R744 (CO₂)	<ul style="list-style-type: none">• Ikke giftig• Ubrennbar• Lav GWP og ODP• Redusert vannforbruk• Lavere kapitalkostnad• Høy varmekapasitet og termisk konduktivitet• Lav viskositet• Høy COP	<ul style="list-style-type: none">• Høye anleggstrykk• Kvelning• Optimalt trykk i gasskjøler

*GWP – Global Warming Potential (100 år), relativ innvirkning på drivhuseffekten der referansen er i CO₂, hvor $GWP_{CO_2} = 1$
ODP – Ozone Depletion Potential er en referanseverdi som angir hvilken evne et stoff har til å bryte ned ozon i forhold til kuldemediet R11 (Nydal, 2013a) (Redko et al., 2020a).*

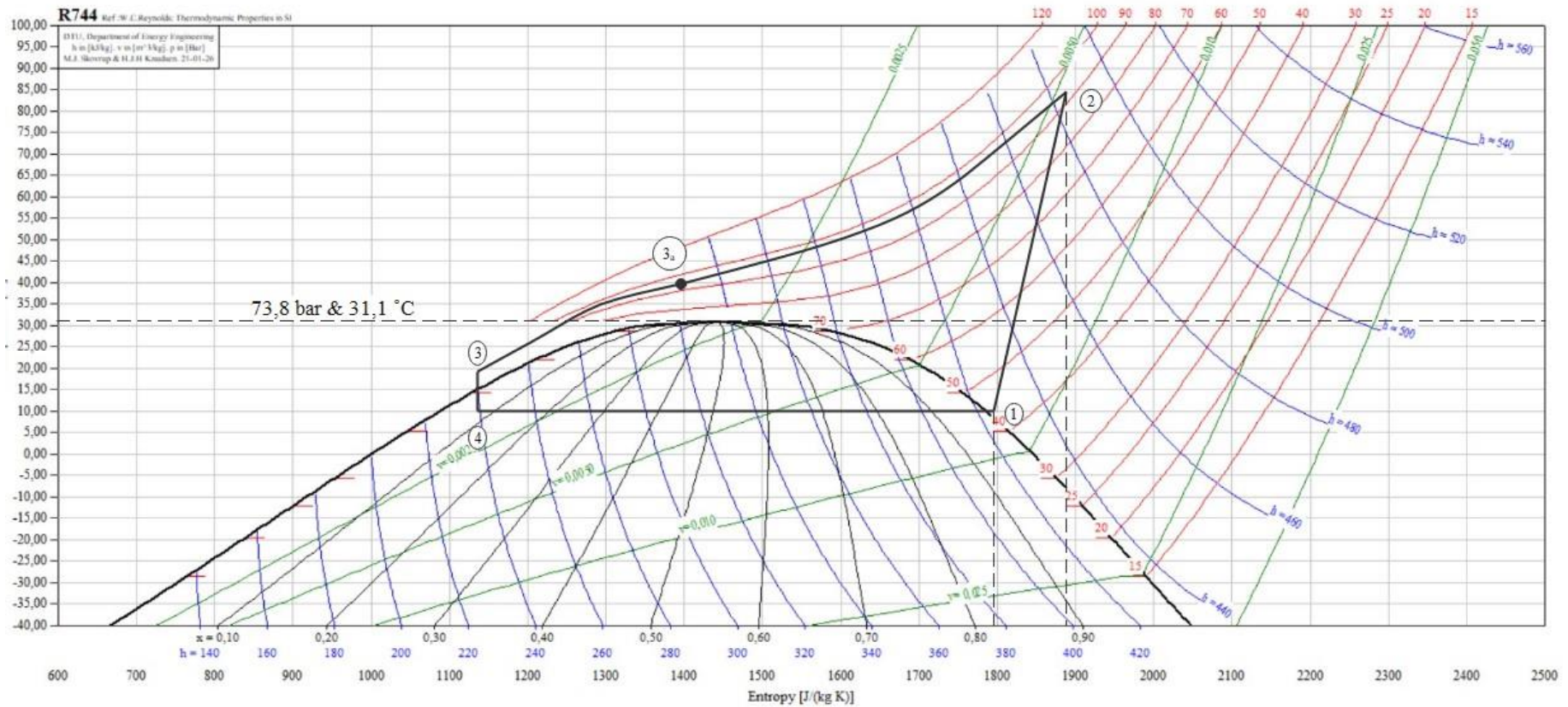
Tabell 7 viser at CO₂ som arbeidsmedium gir mange fordeler ved at den verken er giftig, brennbar eller har en sterk drivhuseffekt (GWP, ODP), sammenlignet med de tradisjonelle kuldemediene. Utfordringene derimot er å ha kontroll på de høye anleggstrykkene, som gir økt eksplosjonsfare. Grunnet CO₂ sin evne til å fortrenge luft kan en lekkasje i et lukket rom verste fall forårsake kvelning (Nydal, 2013b).

2.4.3 Integrert CO₂-varmepumpe for romoppvarming og varmt tappevann

En tradisjonell integrert CO₂ – varmepumpe for romoppvarming og varmt tappevann vil operere i tre moduser: (I) romoppvarming, (II) oppvarming av varmt tappevann og (III) kombinert romoppvarming og oppvarming av varmt tappevann. Siden CO₂ har lav kritisk temperatur vil en varmepumpe basert på dette operere i en transkritisk syklus hvis trykket på gassen fra kompressoren (2) stiger over 73,8 bar, se Figur 6. Varmepumpen vil levere varme ved å kjøle ned CO₂ ved tilnærmet konstant transkritisk trykk i gasskjøler til henholdsvis varmtvann og romoppvarming (Stene, 2008). En transkritisk varmepumpe har ingen kondenseringstemperatur, men en temperaturglidning i gasskjøleren(e) slik Figur 7 viser med eksempelvis en glidning gjennom gasskjøler fra 85 – 20 °C. Sammenlignet med en konvensjonell varmepumpe der varme avgis ved kondensering av arbeidsmediet vil en CO₂ – varmepumpe avgi varme ved kjøling i gasskjøler da temperaturen synker underveis i kjølemediet (Industrial heat pumps, 2021). Gasskjøleren for høyest trykk vil da levere varme til varmt tappevann først før det leveres til romoppvarming (se Figur 6). Grunnet temperaturen kan oppnå helt opp mot 90 °C vil behovet for ettervarming og legionella – sikring være dekket.



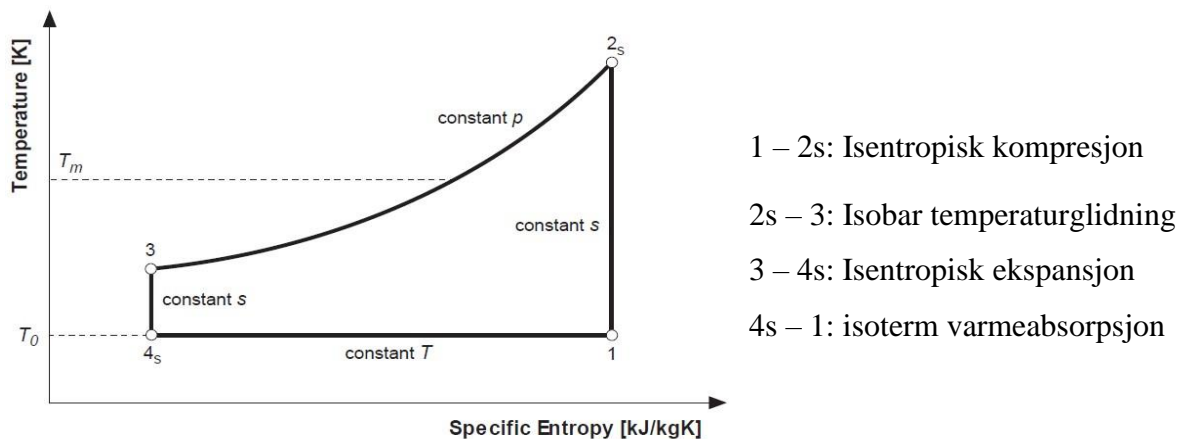
Figur 6: $\log(p)$ - h diagram for R744(CO₂)



Figur 7: Prinsippskisse for R744(CO₂) fremstilt i et T-s- diagram
 (1-2): Kompresjonssyklus, (2-3a): Varmeavgivelse i gasskjøler (temperaturglidning), (3-4) Struping/ekspansjon fra overkritisk til subkritisk trykk og (4-1): Fordampning

2.4.4 Lorentz-effektivitet

En varmepumpe basert på karbondioksid opererer ikke etter den tradisjonelle *reverserte Carnot – syklusen*, som bestemmes av kondenserings- og fordampningstemperaturen. CO₂ opererer i en transkritisk syklus, som betyr at det ikke er noen kondenseringstemperatur. Dermed vil den maksimale teoretiske effekten for en slik varmepumpe være gjengitt av Lorentz syklusen slik temperatur – entropi (T–s) diagrammet i viser.



Figur 8: Modifisert Lorentz syklus (Stene, 2004)

COP for den modifiserte Lorentz syklusen er definert som:

$$COP_{Lorentz} = \frac{T_m}{T_m - T_0} \quad \text{der} \quad T_m = \frac{T_{2s} - T_3}{\ln\left(\frac{T_{2s}}{T_3}\right)} \quad [\text{K}] \quad (10)$$

Der:

T_m = Gjennomsnittstemperatur for gasskjøler [K]

T_{2s} = Temperatur inn i gasskjøler [K]

T_3 = Temperatur ut av gasskjøler [K]

T_0 = Fordampertemperatur [K]

For å finne den reelle effektfaktoren til varmpumpen må virkningsgraden tas med i betraktning da friksjonstap, kompressortap, varmetap etc. har påvirkning på COP_{HP} . Denne beregnes etter formel (11):

$$COP_{HP} = \eta_{LZ} \cdot COP_{Lorentz} \quad (11)$$

Der:

$$\eta_{LZ} = \text{Termodynamisk virkningsgrad}$$

COP_{HP} vil i denne oppgaven bli beregnet med differansen i temperatur mellom tur –og retur vannet for romoppvarmingssystemet etter formel (8).

Maksimal COP

For å oppnå en høy COP må nyttig varme avgis over et stort temperaturområde, noe som vil resultere i en nokså lav utløpstemperatur av CO_2 fra gasskjøler. En ønsker derfor lavest mulig returtemperatur på vannet inn på gasskjøler for høyest mulig effektivitet. Tabell 8 viser flere faktorer som påvirker endelig COP.

Tabell 8: Faktorer som påvirker COP i en CO_2 -varmpumpe

Påvirkningsfaktorer
Fordampningstemperatur
Kompressoreffekt (isentropisk effekt)
Gasskjølertrykk
Utgangstemperatur fra gasskjøler
Temperaturdifferanse og returtemperatur

2.5 Vannbåren gulvvarme

Vannbåren gulvvarme er en energifleksibel oppvarmingsløsning som kan veksle mellom ulike fornybare varmekilder som biokjel, solfanger og varmepumpe. Et vannbårent varme – og kjølesystem refererer til et system hvor vannet transporterer varme, og mer enn halvparten av varmeutvekslingen i det aktuelle rommet skjer via stråling (Babiak et al., 2009).

2.5.1 Virkemåte

Et vannbårent gulvarmesystem har en fordelerstokk, som samler rørsløyfene fra de aktuelle rom. Fordelerstokken plasseres som oftest på teknisk rom med sluk eller inne i et fordelerskap for å unngå unødvendig varmeavgivelse til rom for varig opphold (se definisjon (DIBK, 2017a)).

Varmebehovet i en bygning varierer og for at det skal kunne reguleres, må bygget deles opp i soner med hver sin rørkurs som går i fra et fordelerskap der fordelerstokken er.

Hvor mye varme som leveres til respektive rom, reguleres ved å endre temperaturen på vannet og/eller vannmengden inn i de sirkulerende rørsløyfene. Ved regulering av pådraget endres så vannmengden via en romtermostat. Termostaten gir så beskjed til reguleringsventilen (ofte motorventil) til den aktuelle rørsløyfen om å åpne/lukke seg etter behov. Termostaten føler på lufttemperaturen i rommet, mens i våtrom kan det også brukes temperaturføler i gulvet. Det er også vanlig å bruke en termostat i større rom eller temperatursoner, som skal styre flere kurser samtidig (Standard Norge, 2020).

Karakteristikk

God varmeoverføring fra vann til varmeoverflate er viktig for å kunne utnytte lave vanntemperaturer. Parametere som rørdiameter, rørvastand og materialvalg i oppbygningen av heteflaten er viktig, og riktig utforming av varmefordelingsplater er derfor helt essensielt for å få god effekt fra det vannbårne systemet (Bjørn-Roar Krog et al., 2003). Varmerør av plast med diffusjonssperre (hindrer korrosjon og bakterievekst) av PEX, AluPEX eller PE – RT blir vanligvis benyttet, og utvendig diameter på 12 – 20 mm med godstykkelse på 1,5 – 2 mm er det vanligste. Leggemønsteret og senteravstand påvirker varmefordeling i rommet, og typiske senteravstander varierer fra 100 – 300 mm og jo nærmere avstand mellom rør jo høyere blir varmeavgivelsen. Leggemønster har også noe å si for varmeoverføringen og typiske mønstre kan være alt fra spiralmønster, Enkelt S – mønster og Dobbelt S – mønster (Stråby & Aasbø,

2020). Det aktuelle leggemønsteret i testboligen kan ses i Figur 15: Rørkurser plan 1 og Figur 16: Rørkurser plan 2. En annen viktig faktor å tenke på er at ved valg av hvordan oppbygningen av gulvet skal være vil påvirke den termiske tregheten, altså hvor fort gulvet kan avgi varme.

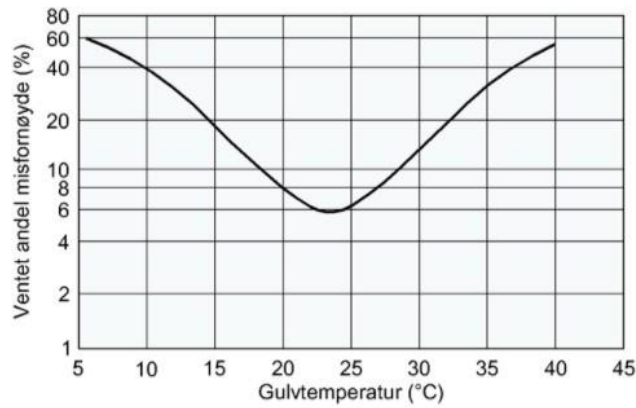
2.5.1.1 Romtemperaturregulering - Termisk treghet

Termisk treghet vil si hvordan temperaturutviklingen fra en side til en annen endrer seg over tid. Typiske tunge(våte) konstruksjoner der gulvvarmerørene ligger nedstøpt i betong vil trenge lenger responstid på å regulere temperaturen i et rom versus en lett(tørr) konstruksjon der gulvvarmerørene ligger integrert i gulvkonstruksjonen ved økende internlast. Riktig vanntemperatur og installasjon av gulvrør er derfor essensielt for å ha god kontroll på temperaturreguleringen. Vannbårne systemer har ofte gode selvregulerende egenskaper, som vil si at avgitt varmeeffekt avtar/øker når romtemperaturen stiger/synker. Systemer som har lav temperaturforskjell mellom vannet og gulvoverflaten vil derfor oppnå gode selvregulerende egenskaper samt når varmeeffektbehovet minker, som ofte er tilfelle i nyere bygg som er bedre isolert (Standard Norge, 2020).

2.5.2 Prosjektering og dimensjonering

Lavtemperatursystemer som vannbåren gulvvarme har et anbefalt turtemperaturområde 25 – 45 °C. Samt vil en temperaturdifferanse (ΔT) mellom tur- og retur på 1 – 2 K være optimalt (maks 5 K). Lav turtemperatur og lav ΔT er gunstig, grunnet man kan benytte energi av lavere kvalitet, og potensiell virkningsgrad til en varmpumpe vil forbedres samt kunne gi et redusert varmetap i godt isolerte bygg (Bjørn-Roar Krog et al., 2003). Det vil også være fordelaktig for andre energikilder som solfanger eller kondenserende gasskjelsystemer med lave temperaturer (SINTEF 552.102).

Det anbefales at varmeanlegget dimensjoneres for å kunne holde en innetemperatur på minimum 23 °C. I våtrom er det ønsket høyere gulvtemperatur enn i andre rom, her er det ofte ønskelig med 28 °C eller mer (Standard Norge, 2020). Gulv med ujevn overflatetemperatur kan oppleves ubehagelig, derfor har valg av leggemønster og temperaturdifferanse mellom tur- og retur mye å si. Figur 9 viser at gulvtemperatur bør ligge rundt 23-24 °C for å få best mulig komfort.



Figur 9: Prosent misfornøyde som funksjon av gulvtemperatur, hentet fra SINTEF Byggforsk (Mysen & Segtnan, 2017)

Veileder til vannbåren varme sier at et gulv gir ca. 10 W/m^2 varmeeffekt for hver grad forskjell mellom overflaten på gulvet og lufttemperaturen. Eksempelvis vil da temperaturen på gulvets overflate være $2 - 3 \text{ }^\circ\text{C}$ varmere enn rommet i nyere bygg og $7 - 8 \text{ }^\circ\text{C}$ i eldre bygg (Standard Norge, 2020). I nyere bygg vil det si at dersom ønsket innnetemperatur er $27 \text{ }^\circ\text{C}$ på bad, må overflatetemperaturen på gulvet være $29 - 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Det er videre viktig å forutsette ved dimensjonering og prosjektering at maks effekt på parkettgulv er ca. $50 - 60 \text{ W/m}^2$ da overflatetemperatur over $27 \text{ }^\circ\text{C}$ vil en risikere at trevirke tørker og sprekker opp (Standard Norge, 2020).

2.5.3 Fordeler og utfordringer

Fordelen med gulvvarme er at det gir mindre temperaturforskjeller mellom gulv og himling enn oppvarmingssystemer, som er helt eller delvis basert på luftpåvarming, noe som gjør at lufttemperaturen kan senkes med 1 til 2 °C (Stene & Chr.Krohn, 2010).

Det er mange andre fordeler samt noen utfordringer med en slik oppvarmingsløsning.

Veiledning for vannbåren gulvvarme, NS-EN 1264 kommer med gode punkter på dette (Standard Norge, 2020);

Tabell 9: Fordeler og utfordringer med vannbåren gulvvarme

Fordeler	Utfordringer
Høy termisk komfort	<i>Kaldras:</i> Viktig at gulvvarmesløyfene ligger tett nok opp mot kritisk punkt(vindusflater) med turledning først inn mot denne flaten. Ellers kan kaldras oppstå dersom luftstrømmen blir kraftig nok og det er dårlig U-verdi på vinduet.
Større møbleringsfrihet	<i>Kostnader:</i> Installasjon varierer ved materialkostnader og tidsbruk avhengig av løsning
Lave vanntemperaturer for å gi ønsket komfort, som resulterer i gode driftsforhold for en lavtemperert energikilde som varmepumpe og solvarme.	<i>Romtemperaturregulering:</i> Holde innnetemperaturen stabil når intern varmetilførsel varierer som ved økt personbelastning eller soltilskudd.
Selvregulerende som vil si at det er avgitt varmeeffekt med økende romtemperatur og motsatt	-
Høy evne til energilagring, slik at det kan lagres energi til tider på døgnet hvor energikostnad er høyere. (TABS)	-
Gir høyere verdiøkning for en bolig – Økonomisk fordel	-

Grunnet de lave vanntemperaturene vil en varmepumpe kombinert med vannbåren gulvvarme gi bedre uttelling jo lavere turtemperatur som leveres ut i distribusjonssystemet. Resultatet blir økt effektfaktor og energieffektivitet for en varmepumpe. Så lenge trekk fra vindu unngås ved bruk av vinduer med lave U-verdier vil et vannbårent gulvvarmesystem være en av de beste løsningene når det kommer til termisk komfort og inn klima grunnet lave vertikale temperaturgradienter, lav lufthastighet, turbulenshastighet og liten støvbevegelse (Stene, 2004).

2.6 Målenøyaktighet

Alle målinger har begrenset nøyaktighet, og for å ha kontroll på usikkerheten i tallverdiene er det viktig å ha kontroll på kilder til usikkerhet. Grovt sett kan målefeil deles inn i tre hovedtyper slik Tabell 10 viser.

Tabell 10: Oversikt over de vanligste typer av målefeil

Type målefeil	Beskrivelse
Grove feil, U_G	Eksempelvis avlesningsfeil
Systematiske feil, U_S .	Eksempelvis hysteresis og friksjon i måleinstrument, bruk av ukalibrerte instrumenter, ukorrekt utført måling eller bruk av feil funksjonssammenheng. Skiller mellom instrumentfeil og metodefeil.
Tilfeldige feil, U_T .	Gjentatte målinger av samme størrelse kan gi ulikt resultat uavhengig av forsiktighet.

(Sintef & Norges teknisk-naturvitenskapelige, 2007b)

Det vil i dette prosjektet prøve å unngå grove feil og metodefeil slik at nøyaktighet rundt tallverdiene har god validitet og reliabilitet. Da måleinstrumentet i forsøket er av digitalt format vil hvert apparat ha sin enkelte måleusikkerhet, se kap. 4.1 side 50.

2.6.1 Måleusikkerhet – Beregning av usikkerhet

Ved målinger må en ta hensyn til instrumentnøyaktighet (U_S) i henhold til hva den er oppgitt fra leverandør. Dette kan bli utført ved å beregne middelerdi (\bar{x}) og standardavvik (s), instrumentnøyaktighet, tilfeldig feil (U_T) og resulterende usikkerhet (U_R). Dette vil gi oss nøyaktighet av resultatene.

Middelerdi:

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad (12)$$

Der:

n = antall målinger

x = måleverdi

\bar{x} = middelerdi

Standardavvik:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (13)$$

Der:

s = standardavvik

Usikkerhet – middelerdi (U_R)

$$U_r = \pm \frac{s}{\sqrt{n}} = \text{tilfeldig tall} \quad (14)$$

Usikkerhet – tilfeldig feil (Metodefeil) (U_T)

$$U_T = \pm \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{(n - 1) \cdot n}} \quad (15)$$

Usikkerhet – resulterende (U_R)

$$U_R = \pm \sqrt{U_T^2 + U_S^2} \quad (16)$$

(Sintef & Norges teknisk-naturvitenskapelige, 2007b)

2.6.2 Validitet og reliabilitet

Validitet forteller hvor nøyaktig en metode måler noe. Hvis en metode måler den hensikt, og resultatet korrelerer med realistiske verdier, vil det antas valid. Reliabilitet forteller hvor konsekvent en metode måler noe (Middleton, 2019). Dette betyr at en skal få det samme resultatet basert på den samme metoden under like betingelser for målingene; hvis ikke vil målemetoden som er brukt være av dårlig reliabilitet. Ved lav reliabilitet kan variabler som har sammenheng ikke bli oppdaget og det er derfor viktig å ha høy reliabilitet i målingene. For å styrke påliteligheten vil det blitt utført funksjonstest av utstyr for sikring av at måledata blir målt korrekt. Det er lett å manipulere måledata, og derfor er det viktig å utforme måleprosessen slik at det ikke er ytre faktorer som påvirker målingene, selv om det selvsagt i dette måleprosjektet vil være ytre faktorer som vær, sol og vind som kan påvirke resultatet er dette en av faktorene som skal bli drøftet videre og tas i betraktning.

3 Systembeskrivelse & måleobjekt

I dette kapitlet blir det gitt nærmere beskrivelse av måleobjekt med tilhørende grensebetingelser og energiberegning samt systembeskrivelse av varmesystemet brukt i huset. Det vil bli gitt overordnet informasjon om hvordan systemet fungerer og hvordan gulvvarmen i huset er lagt opp, samt hvordan styringsprinsippene for regulering av temperatur i huset er.

3.1 Måleobjektet

Huset det skal utføres målinger i er lokalisert ved Heggedal i Asker kommune. Totalt BRA er 163,8 m² og er definert som småhus etter TEK17.



Figur 10: Skisse av huset, med tillatelse fra Isolve A/S

Plantegning i vedlegg H viser detaljerte mål i henhold til lengder og arealer for respektive rom. Oppsummert deles huset inn slik Tabell 11 viser.

Tabell 11: Romoversikt med respektive arealandeler til huset

Plan 1	Areal [m ²]	Plan 2	Areal [m ²]
TV-Stue	13,9	Soverom 1	11,9
Bad	8,6	Bad	4,2
Vask	4,6	WC	2,9
Bod (Teknisk rom)	5,2	Gang	2,3 + 1,7
Gang/Trapp	11,3	Stue/Kjøkken/Trapp	58,2
Soverom 2	7,0	-	-
Soverom 3	7,0	-	-
Soverom 4	7,2	-	-

3.1.1 Energiberegning

Det ble utført en kontrollberegning etter TEK17 i henhold til energibehov og inneklime av huset. Beregningsprogrammet TEK – sjekk ble benyttet der energiforsyningen ble endret, ved å legge inn Isolve Air – enheten med en SCOP på 4,4 ved normalklima hentet fra teknisk datablad i vedlegg A. Beregningen ble utført for å se hva en kan forvente av energibehov og varmetapstall for huset. Beregningen resulterte i at innetemperaturen var tilfredsstillende og oppfylte energikrav etter TEK17. Netto spesifikt energibehov ble 109 kWh/(m²·år) ved normalklima og varmetapsbudsjettet resulterte i et varmetapstall (H'') på 0,67 (W/K)/m². Se grensebetingelser og sentrale inndata for energiberegning i vedlegg I.

Tabell 12: Resultat etter energiberegning i TEK – sjekk

Spesifikt energibehov [kWh/(m²·år)]	Bygningens varmetapstall [(W/K)/m²]
109	0,67

3.2 Beskrivelse av Varme -og kjølesystemet i huset

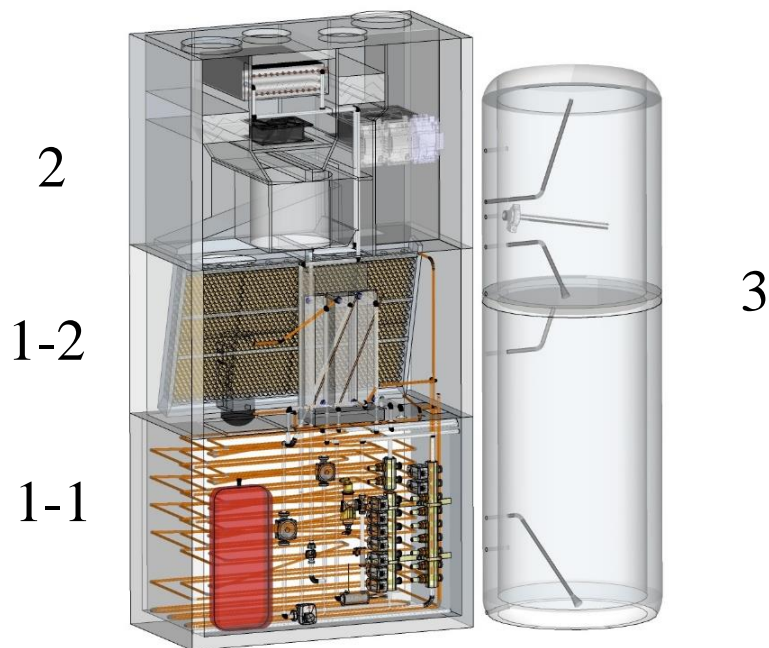
3.2.1 Isolve Air

Inneklimasentralen «Isolve Air» (Figur 11) er varmesystemet brukt i kombinasjon med det vannbårne gulvvarmesystemet i huset. Isolve Air er et energieffektivt inneklimasystem som består av en integrert ventilasjons-, varmepumpe- og energilagringseenhet, som baserer seg på det naturlige kuldemediet R744(CO₂). Varmepumpen er tilkoblet et ventilasjonssystem og energilager som skal sørge for at varmepumpen skal gi god effektivitet. Den er videre utstyrt med mengdemålere og temperaturfølere, som kan gi et mål på hvordan energiproduksjonen er. Ved å sammenholde energiforbruk med energiproduksjon vil systemet da gi en god indikasjon på om driften er god eller ikke.

Energilageret rommer 150 liter vann og fungerer slik at på dagtid vil uteluften være varmekilde og produsere varmtvann og oppvarming/kjøling av huset, samtidig som overskuddsvarme brukes til opplading av energilageret. Om natten når uteluften er kald, vil varmepumpeenheten hente energi fra energilageret og forvarme alt tappevann som skal brukes kommende døgn. Dette er takket være dens kompresjonssyklus, som gjør det mulig å bruke energilageret som varmekilde om natten når luften utendørs er kaldere. Hovedkomponenter som Isolve – enheten består av er delt inn etter moduler slik som Tabell 13 og Figur 11 viser:

Tabell 13: Hovedkomponenter til inneklimasentralen, se Figur 11 for modulhenvisning

Isolve	Komponenter (Overordnet)
Modul 1-1	Energilager, Ekspansjonskar, Coil med R744, Fordelerstokk, 2 stk pumper, spisslast, mikrobobleutskiller, volumstrømmåler, 3-veis motorventil med aktuator
Modul 1-2	Kompressor, Fordamper, 3 stk gasskjølere; (Pre-Heating, Romoppvarming, Tappevann)
Modul 2	Varmegjenvinner, 2stk vifter, 2 stk filter, styringsenheter(PLS), varmebatteri
Modul 3	Todelt varmtvannstank - Forvarmingstank i bunn og varmtvannstank på topp med el-element.



Figur 11: Isolve Air med varmtvannstank

3.2.2 Systembeskrivelse

Den integrerte CO₂ – varmepumpen for romoppvarming og tappevann er delt inn i 5 deler:

-
- | | |
|--------------------------------------|----------------|
| 1. Ventilasjon | 2. Varmepumpe |
| 3. Distribusjonsdel | 4. Energilager |
| 5. Forvarmingstank og varmtvannstank | |
-

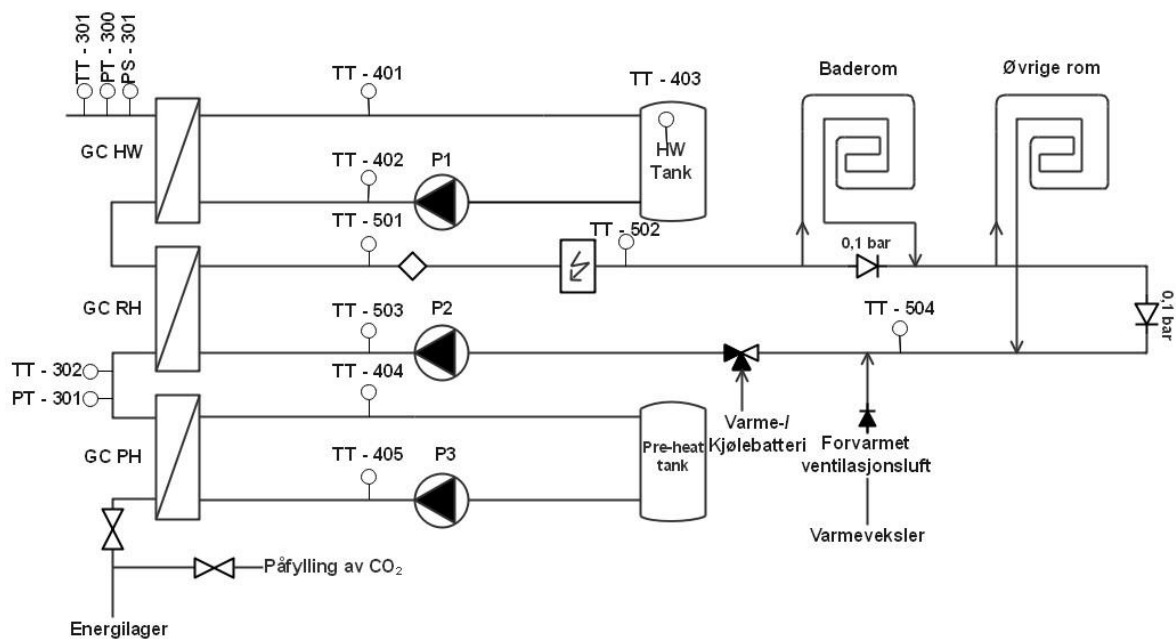
Ventilasjonen i systemet (1) ligger integrert i enheten med et eget ventilasjonsaggregat med balansert ventilasjon. Dette betyr at det er mulig å forvarme eller kjøle tilluften avhengig av behov. Ventilasjonen fungerer slik at uteluft blir hentet inn ved inntakskanalen og inn gjennom en varmegjenvinner som sørger for at tilluften blir oppvarmet. Et vannbasert varmebatteri, som er tilkoblet en tilluftsvifte i nedstrøms retning skal sørge for at luften kan forvarmes ved behov. Noe av uteluften vil også bli sendt inn på fordampere til varmepumpen. Fraluften blir sugd tilbake til fraluftskanal der det er et anemometer (luftmengdemåler) og vil etter varmegjenvinner bli sendt gjennom fordampere og ut til avkast. Styringssystemet sørger for regulering av de turtallstyrte viftene slik at luftmengden tilsvarer den dimensjonerte luftmengde for boligen, med et aggregat som kan yte mellom 100 – 360 m³/h med en varmegjenvinning på > 80 % (se vedlegg A for teknisk datablad).

Energilageret (5) er i hovedsak fylt med vann og blir oppladet på dagtid og vil ved utladning fryse til is. Da det er kaldere uteluft på nattestid, vil varmepumpeenheten hente energi fra energilageret og for å øke gasskjøling i systemet blir alt tappevannet som skal brukes kommende døgn forvarmet på natten. Denne gasskjølingen skjer i en motstrømsvarmeveksler. Kretsen som kuldemediet R744 sirkulerer i opererer slik at når CO₂ går fra fordampere i gasstilstand vil den suges inn i kompressor som hever trykket frem til gasskjøler slik at CO₂ kan operere i transkritisk område. Dette blir så nedkjølt slik at den høye temperaturen utnyttes til å levere varme til henholdsvis varmt tappevann og romoppvarming.

Det er tre gasskjølere i systemet, koblet i serie på CO₂ – siden, som gjør at en kan utnytte temperaturglidningen som skjer ved nedkjøling av CO₂. Figur 12 viser at en først utnytter den høye temperaturen til oppvarming av varmt tappevann gjennom HT – gasskjøler før en utnytter temperatur etter RH – gasskjøler for romoppvarming. Dette gjør at en kan få høyere utnyttelse av temperaturglidningen, som skjer ved kjøling av kuldemediet. Når det kjølede mediet (vann) har en temperatur godt under den kritiske temperatur for CO₂, og

temperaturtilnærmingen i gasskjølers kalde ende er liten (helst så liten som 1 K) vil en i teorien kunne få en høy COP – verdi i varmepumpen.

Figur 12 gir videre en detaljert tegning for distribusjonssystemet. Det er en gasskjøler som er koblet til forvarmingstanken («PH tank») av varmt tappevann i en lukket sløyfe med tanken. En pumpe sørger for sirkulasjon av vann fra bunn av forvarmingstanken til gasskjøler og tilbake til topp av tanken. «GC PH» er gasskjøler til forvarming av varmt tappevann der det sirkulerer vann fra «Pre – Heat tank» før det sendes tilbake høytemperert vann inn på varmtvannstanken. «GC RH» – gasskjøler leverer varme til romoppvarming, og har et el – element som spisslast, som sørger for at varmebehovet blir tilfredsstilt ved høyeste dimensjonerte varmebehov. «GC HW» gasskjøler sørger for at temperaturen til varmtvann er høy nok. Dette sikrer at vannet er varmet til over 65 °C som da hindrer legionellabakterier å vokse (vekst for legionella ligger mellom 20 – 50 °C).



Figur 12: Systemtegnning for distribusjonssystemet med temperatur- og trykksensorer

3.3 Varmestyring og distribusjon

3.3.1 Varmestyring

Hensikten med varmestyringen til Isolve er:

- 1) Øke temperaturdifferansen mellom tur – og returvannet i varmeanlegget uten at det påvirker varmesystemets komfort egenskaper.
- 2) Sørge for at det alltid produserer varmtvann med lavest mulig temperatur til å tilfredsstille behovet.

3.3.2 Distribusjonssystemet

Løsningen med vannbåren gulvvarme er godt egnet for å gi høy termisk komfort og fungerer slik at det blir avgitt varme til et rom via PEX – rør fylt med vann som ligger under gulvoverflaten. Dette vannet ligger i en lukket krets og blir oppvarmet av CO₂ – varmepumpen. Generelt benyttes hele eller deler av boligens gulvflate som heteflate, og det meste av varmen avgis som strålevarme. Temperaturen på vannet skal sørge for at nok varme sendes ut til heteflatene i boligen, dette sørger varmepumpen for ved å levere vann som er 5 °C varmere enn behovet i rommet.

Romtermostater forteller hva ønsket temperatur er og hva virkelig temperatur er i rommet. Denne differansen regulerer motorventilene som styrer vannstrømmen til hver enkelt rørsløyfe. Ønsket temperatur (settpunkt) for det rommet som ønskes varmast, typisk badrom, bestemmer temperatur ut fra varmepumpen da badrommene er de som skal ha høyest temperatur. Resterende rom er koblet i serie med badrommenes gulvvarmesløyfer slik at vannet først blir sendt til badrom før det blir sendt til resterende rom.

I Isolve Air er gulvvarmesløyfene for badrom koblet i serie med de resterende rommene, som gjør at det kan defineres som et tottrinns system. Grunnen til denne koblingen er at badrommene alltid er varmere enn de øvrige rom i huset, og restvarmen i returvannet etter badrom skal i teorien være tilstrekkelig til bruk som turtemperatur for øvrige rom. Dette vil si at varme først tilføres badrom før det avgis til stue, gang og andre oppholdsrom. Resultatet av en slik seriekobling er at en i teorien skal få lavere sirkulert mengde vann, og en samlet større ΔT , sammenlignet med tradisjonelle parallellkoblede rørkurser.

3.3.3 Gulvoppbygging

Baderom skal generelt ha høyere temperatur enn de andre rommene i huset, og i Norge er det vanlig å tilføre varme til baderoms gulvet hele året. Valg av gulvbelegg og gulvoppbygning på badet er derfor dimensjonerende vanntemperatur til varmeanlegget. Tabell 14 gir oversikt over gulvoppbygningen til de ulike rom i huset.

Tabell 14: Beskrivelse av gulvoppbygning

	Rom	Gulvoppbygning + overgulv
Etasje 1	Baderom & gang	500 mm isopor + 100 mm armert Betong +0,5 mm membran+ 15 mm Flis
Etasje 1	Resterende rom	500 mm isopor + 100 mm armert Betong +0,5 mm membran+ 15 mm Parkett
Etasje 2	Baderom	13 mm gips+ 300 mm isolasjon +22 mm spongulv + 50 mm Betong + 0,5 mm membran + 15 mm Flis
Etasje 2	Resterende rom	13 mm gips+ 300 mm isolasjon +22 mm spongulv, Betong 50 mm+ 25 mm Sponplater m/spor+ Aluminiums Varmefordelingsplate 0,5 mm + 2 mm ullpapp+ 15 mm Parkett

I 1.etasje er det støpt betong med parkett som gulvbelegg i alle rom utenom gang, bad, WC og bod der den integrerte enheten står på fliser. I 2.etasje er det sporplater av spon med spor for PEX – rør med en varmfordelingsplate av aluminium, glidesjikt med papp og parkett som gulvbelegg. Bildet under (Figur 13) viser hvordan rørene er blitt lagt ned i spor før gulvbelegg med varmfordelingsplater er lagt på.



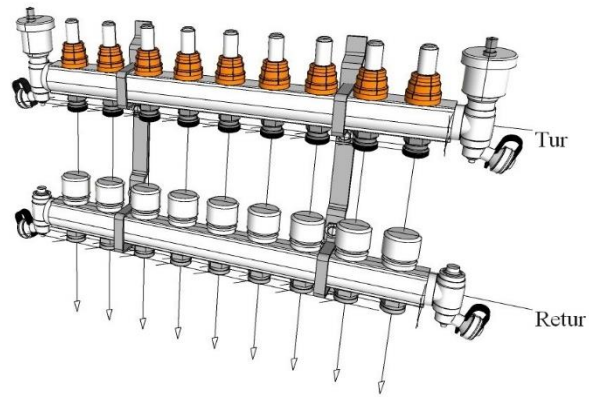
Figur 13: Sponplate med spor til PEX – rørsløyfer

3.3.3.1 Regulering av gulvvarmesystemet

Distribusjonssystemet som blir brukt i boligen er laget slik at varmesystemet skal levere best mulig komfort med lavest mulig energiforbruk. Varme blir først levert til baderommene, som opererer med høye temperaturer, før det fordeles videre i de andre rørkursene i rommet. Dette er løst ved at styringssystemet drifter CO₂ – varmpumpen etter disse to prinsippene:

1. Energi blir levert ved at fordelerstokken sender varmtvann til de rom/soner som trenger tilførsel av varme basert på hva som er innstilt på romtermostat.
2. Varmebehovet registreres av en romtermostat. Dersom romtermostaten sier at det er for kaldt i rommet sammenlignet med innstilt temperatur, gir termostaten beskjed om dette til sentralen. Sentralen slipper da på mer vann til det aktuelle rommet. Denne romtermostaten kan det leses nærmere om i kap. 4.1.

Vannstrømmene til hvert enkelt rom styres av en motorventil basert på en PID – regulering. Styringsparameterne er henholdsvis utetemperatur, romtermostat, varmetreghet i gulv samt informasjon om varmebehovet er økende eller minkende. Reguleringen av varme til de enkelte rom er normalt regulert ved et PÅ/AV signal til motorventilen til hver enkelt kurs. Eksempelvis vil ventilen være i helt åpen tilstand ved dimensjonerende utetemperatur (ved maksimalt varmebehov). Ved lavere varmebehov vil ventilen åpne og stenge på en måte som gir minst mulig svingning av gulvtemperatur, men på samme tid gi ønsket romtemperatur.

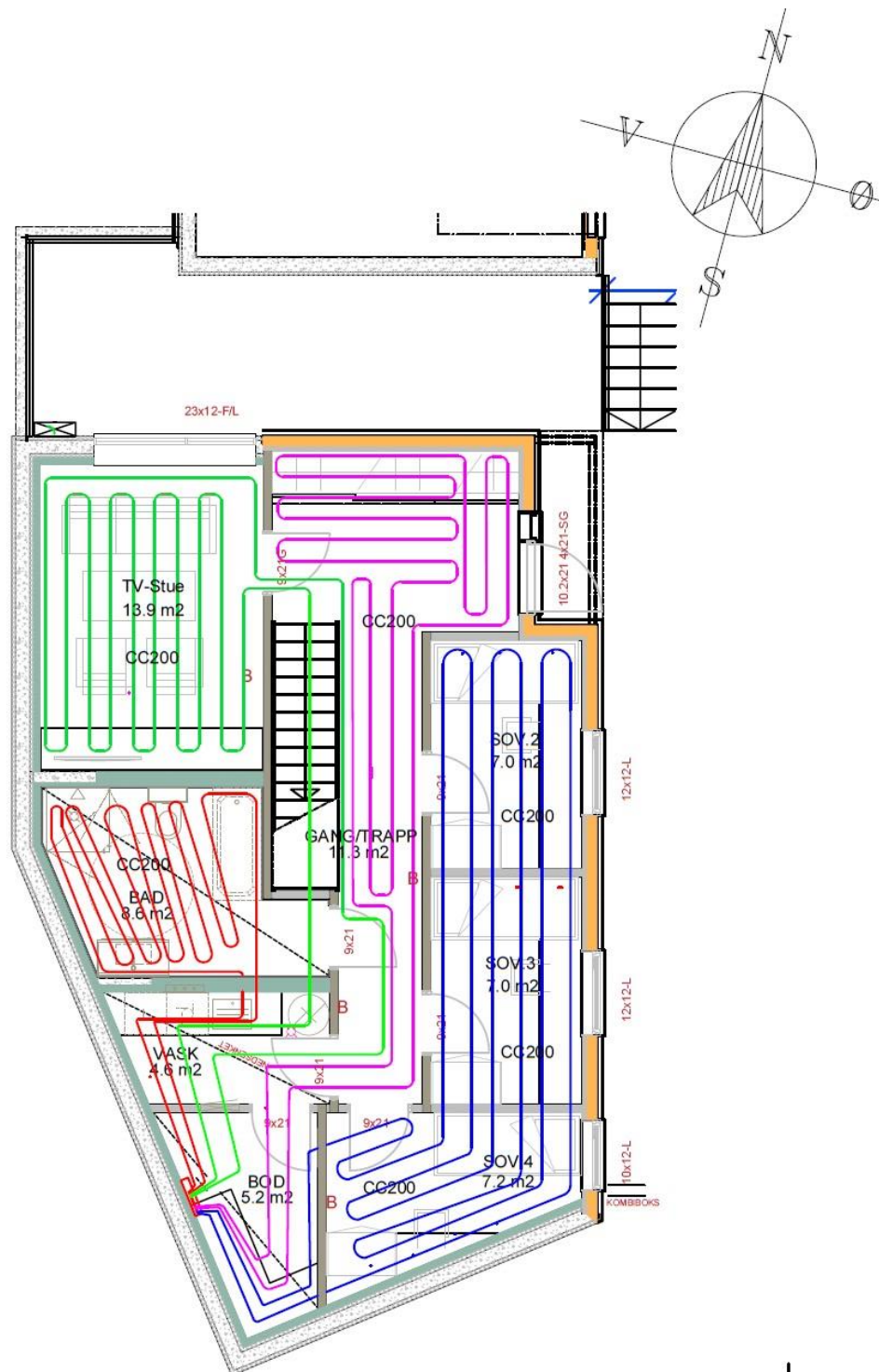


Figur 14:Eksempel på en fordelerstokk

Hver gulvvarmesløyfe er koblet til en fordelerstokk som består av to deler. Det er en del for tilkobling av alle rørendene for sløyfenes turside, og en del til retursiden, se Figur 14. På tursiden er det montert en vannmåler til koblingspunktet for hver enkelt rørsløyfe. Denne vannmåleren har også en strupefunksjon, slik at det er mulig å regulere vannstrømmen direkte på måleren. På returenden av hver rørsløyfe sitter det også en ventil, denne åpnes eller stenges etter signal fra styringssystemet. Grunnet gulvvarmerørene tradisjonelt må være varmere enn den innstilte temperaturen vil ønsket turtemperatur settes 5 °C over den innstilte romtermostatens temperatur for at riktig temperatur skal oppnås i rommet. Dette betyr at hvis romtemperaturen har settpunkt 30 °C, settes turtemperatur 35 °C.

3.3.3.2 Rørkurser og teknisk data

Figur 15 viser henholdsvis rørkurser for 1. etasje med totalt 4 rørkurser. Tabell 15, viser mer detaljert teknisk data for de respektive rørsløyfene.



Figur 15: Rørkurser plan 1

Tabell 15: Teknisk data på det vannbårne gulvvarmesystemet i 1.etasje

Nummer	Rørkurser (farge på rørkurs)	PEX- rør D _o [mm]	Senteravstand (C/C) [mm]	Temperatur [°C]	Reguleringsprinsipp
1	Bad/Vask (Rød)	Ø 20	200	25 – 35	Temperaturregulert
2	Gang/Trapp (Rosa)	Ø 20	200	25 – 35	Mengderegulert
1,2,3,4	Bod	Ø 20	200	25 – 35	Mengderegulert
3	Soverom 2–4 (Blå)	Ø 20	200	25 – 35	Mengderegulert
4	Tv-Stue (Grønn)	Ø 20	200	25 – 35	Mengderegulert

Figur 16 viser henholdsvis rørkurser for 2.etasje med totalt 4 rørkurser. Tabell 16 viser mer detaljert teknisk data for de respektive rørsløyfene.



Figur 16: Rørkurser plan 2

Varmerørene er lagt slik at de ligger tettere i baderommene for å få mer varm flate på rørene til å avgi varme. I stuen/kjøkkenet i 2.etasje (se Figur 16) er rørkursene lagt slik at turvannet blir sirkulert langs østsiden av huset først slik at det varme vannet skal hindre kaldras å oppstå ved vindusflatene.

Tabell 16: Teknisk data på det vannbårne gulvvarmesystemet 2.etasje

Nummer	Rørkurser (farge på rørkurs)	PEX-rør D _o [mm]	Sentera vstand (C/C) [mm]	Temperat ur [°C]	Beskrivelse
5	Soverom 1 & Gang (Blå)	Ø 17	200	25 – 35	Mengderegulert
6	Bad & WC (Rød)	Ø 20	200	25 – 35	Temperaturregulert
7	Stue/Kjøkken/Trapp (Rød)	Ø 17	200	25 – 35	Mengderegulert
8	Stue/Kjøkken/Trapp (Grønn)	Ø 17	200	25 – 35	Mengderegulert

4 Eksperimentell metode

Kapittelet tar for seg måleobjektet det utføres målinger på samt hvordan den eksperimentelle metoden er blitt utført.

4.1 Utstyr

Romtermostat

Carel sin thT termostat brukes til å regulere temperaturen i de ulike soneinndelingene i huset. Denne måler temperatur og fuktighet (i badrom) og sender verdier til det sentrale styringssystemet til inneklimasentralen. Kommunikasjon skjer via Modbus RS485 seriell kommunikasjon. For badrommet i huset er det slik at settpunkttemperatur satt på romtermostat som bestemmer turtemperatur inn på badrom. En differanse mellom innstilt temperatur og virkelig temperatur medfører da at varmpumpen justerer turtall og trykk for å tilpasse varmeproduksjon slik at innstilt turtemperatur oppnås. For alle andre romsoner er det motorstyrte reguleringsventiler som regulerer vannstrømmen inn til rommet. For tekniske data se vedlegg B.



Tabell 17: Parameter for Carel thT termostat med tilhørende instrumentusikkerhet

Parameter	Us
Temperatur [K]	$\pm 0,5$
Temperatur display [K]	$\pm 0,1$
Fuktighet [%RF]	± 5

Figur 17: Carel thT termostat - Romtermostat for temperatur og fuktighet montert i huset

Termisk komfort rigg - SvemaMultipoint

Måleapparatet gir data for PMV, PPD, lufttemperatur, lufthastighet, relativ fuktighet, trykkforhold, globetemperatur og operativ temperatur (se tekniske datablad vedlegg C – E). Apparatet må kobles til PC med nedlastet programvare – Svema Multipoint. Denne programvaren vil da gjøre beregninger etter standarden NS – EN ISO 7730. Data kan bli presentert enten direkte eller bli lagret til en individuell fil og åpnet i Excel. Programmet kan samle data fra de tre type sensorene som vist på Figur 18 og oppsummert her:

1. Swema 03- lufthastighet og lufttemperatur
2. HC2A-S – Fuktighet og temperatur
3. Swema 05 – Globetemperatur

Tabell 18: Parametere for termisk komfort rigg med tilhørende instrumentusikkerhet



Figur 18: Termisk komfort rigg

	U_s
Svart globe	$\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Swema 03	$\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
	<i>Ved 15 – 30 °C:</i>
	$\pm 0.04 \text{ m/s}$ ved 0.05...1.00 m/s
	$\pm 4 \%$ avlesningsverdi 1.00...3.00 m/s
	<i>Ved 20-25 °C:</i>
	$\pm 0.03 \text{ m/s}$ ved 0.05-1.0 m/s
	$\pm 3 \%$ avlesningsverdi ved 1.0-3.0 m/s
HC2A – S	$\pm 0,8 \%$ RF ved 10- 30 °C
	og $\pm 0,1 \text{ K}$ ved 10- 30 °C
Instrument	Kalibreringsdato
Termisk rigg	01 – 12 – 2020

Carel - PLS

Det er tre stk. PLS'er til varmpumpeenheten (c.pCO mini high end og 2 x c.pCO extension). Gjennom oppkobling av PC vil verdier som inntakstemperatur(uteluft), kompressoreffekt, luftmengder, vannmengder, tur –og returtemperatur bli hentet ut herfra. Datamaterialet blir så hentet ut som Excel format ved hjelp av en minnepinne.



Figur 19: Carel PLS; c.pCO mini high end + 2stk c.pCo extension

Luftmengdemåler

Til måling av luftmengder i rommet er det brukt Kimo – måletrakt(Figur 21) samt SWEMA 3000 anemometer for måling av luftmengde ut av tilluftsdon (Figur 20). (se teknisk datablad vedlegg F)

Tabell 19: Parameter med tilhørende usikkerhet for SWA 31 og Swema3000



Us	
Trykk	± 2 % ved absolutt trykk
Hastighet	± 3% ved 0,04 >0,25 m/s
Luftmengde	± 3% ved 12 > 85m ³ /h
Instrument	Kalibreringsdato
SWA 31	2020-10-06
Swema 3000	2020-11-03



Figur 20: Swema3000 og SWA 31 for måling av luftmengder



Figur 21: Kimo - Måletrakt

Tabell 20: Parametere for Kimo - Måletrakt

Parameter	
Luftmengde	10-400 m ³ /h
Dimensjoner	200x200 mm
	Høyde 330mm
Diameter	85 mm
Materiale	Fiberglass 300 PLP

4.2 Måleperiode og beskrivelse

Måleperiode - beskrivelse

Målingene ble utført over en 6 – dagers periode slik Tabell 21 viser. To dager ble satt av til å utføre testmålinger for å sikre at utstyret logget aktuelle data. Dette ble utført for varmpumpeenhet og termisk komfort over en måleperiode på 1 t. Romtermostaten var først satt til 22 °C i øvrige rom og 30 °C turtemperatur. Det ble hentet data fra inneklimasentralen hver dag for å sikre seg at datamaterialet ikke gikk tapt.

Tabell 21: Måledager

Dag	Dato	Tidsperiode	Starttid	Endringstid per dag
Testdag 1	14.04.2021	-	-	-
Testdag 2	15.04.2021	-	-	-
Dag 1	16.04.2021	24 t	10:00	-
Dag 2	17.04.2021	24 t	10:00	09:45
Dag 3	18.04.2021	24 t	10:00	09:45
Dag 4	19.04.2021	24 t	10:00	09:45

Tabell 21 viser at det var totalt 4 dager med målinger over en 24 t periode, der romtermostat ble endret med 1 °C ved samme tidspunkt hver dag til sluttverdi på 27 °C turtemperatur og romtemperatursettpunkt på 19 °C i øvrige rom for måling ved varmpumpeenhet. For termisk komfort ble måleperioden satt til 2 timer ved samme tidspunkt for hver dag med ekstra tid på 15-20 min for innkjøring av instrumentene.

4.3 Målepunkter

Målingene som ble utført ble målt ved hjelp av utstyret beskrevet i kap. 4.1 og måleparameterne er listet i Tabell 22 og Tabell 23 for å gi en oversiktlig fremstilling om hva som ble målt og hvilke måleinstrument som målte de respektive parameterne.

4.3.1 Målepunkter - Termisk komfort

Figur 23 viser rommet det skal utføres termisk komfort målinger i. Det vil være et målepunkt i senter av rommets vegger slik Figur 22 viser med henholdsvis målepunkt 0,6 m over gulv. Denne høyden ble valgt på bakgrunn av datablad 421.501 fra SINTEF Byggforsk for en sittende persons tyngdepunkt (Holøs & Segtnan, 2016). Målingene ble utført med termiske komfort rigg for måling av svart globetemperatur, lufttemperatur, relativ fuktighet, PMV og PPD. Tabell 22 viser måleparametere for termisk komfort, med beskrivelse av sensor, høyde, måleperiode og målefrekvens.

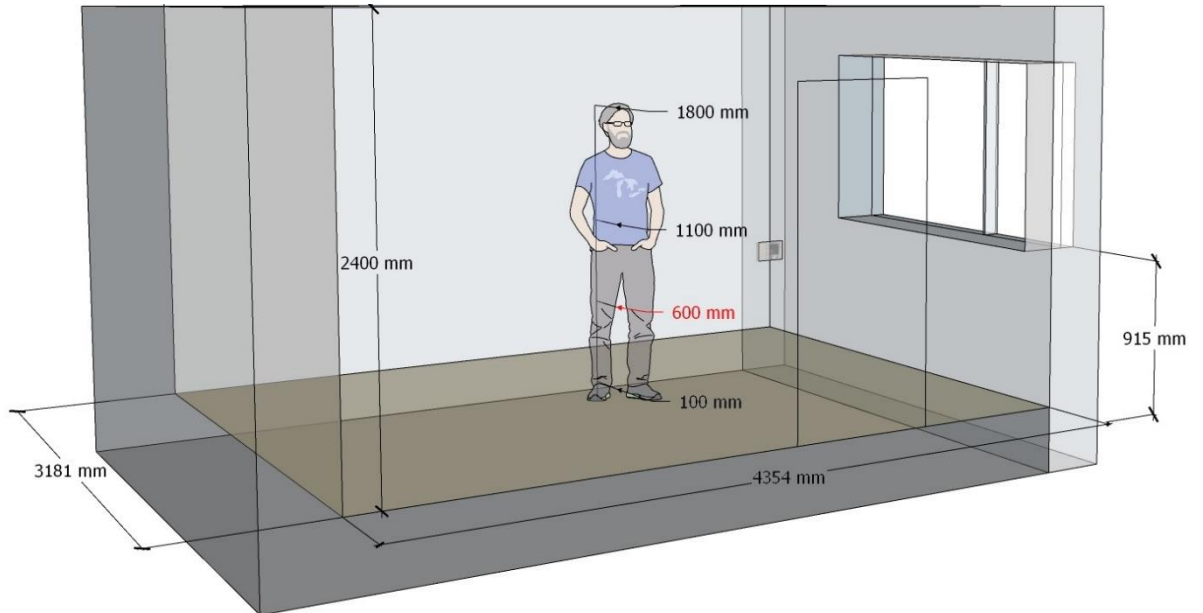
Tabell 22: Måleparameter termisk komfort

Måleparameter	Sensor	Høyde[m]	[t/dag]	Målefrekvens
Hastighet, [v _a]	Swema03 Anemometer	0,6	2,5	0,1sek**
Lufttemperatur [T _a]	Swema03	0,6	2,5	0,1sek**
Relativ fuktighet [%RF]	HC2A-S	0,6	2,5	0,1sek**
Middelstrålingste mperatur [T _r]	Svart globe	0,6	2,5	0,1sek**
PMV*	Termisk komfort rigg	0,6	2,5	10 punkt per 0,5t
PPD*	Termisk komfort rigg	0,6	2,5	10 punkt per 0,5t
Værdata (Utetemp, fuktighet)	Værstasjon nær Asker		-	Hver time
Luftmengde	Accubalance	Ved tilluftsventil	-	Start,midtveis, slutt

* $CLO = 0,7$ (normal innendørs bekledding) og $MET=1,2$ W/m^2 (Stillesittende arbeid), gjennomsnittsverdier er beregnet fra 1800 måleverdier over en måleperiode av 3min og en målefrekvens på 10Hz i SwemaMultipoint.

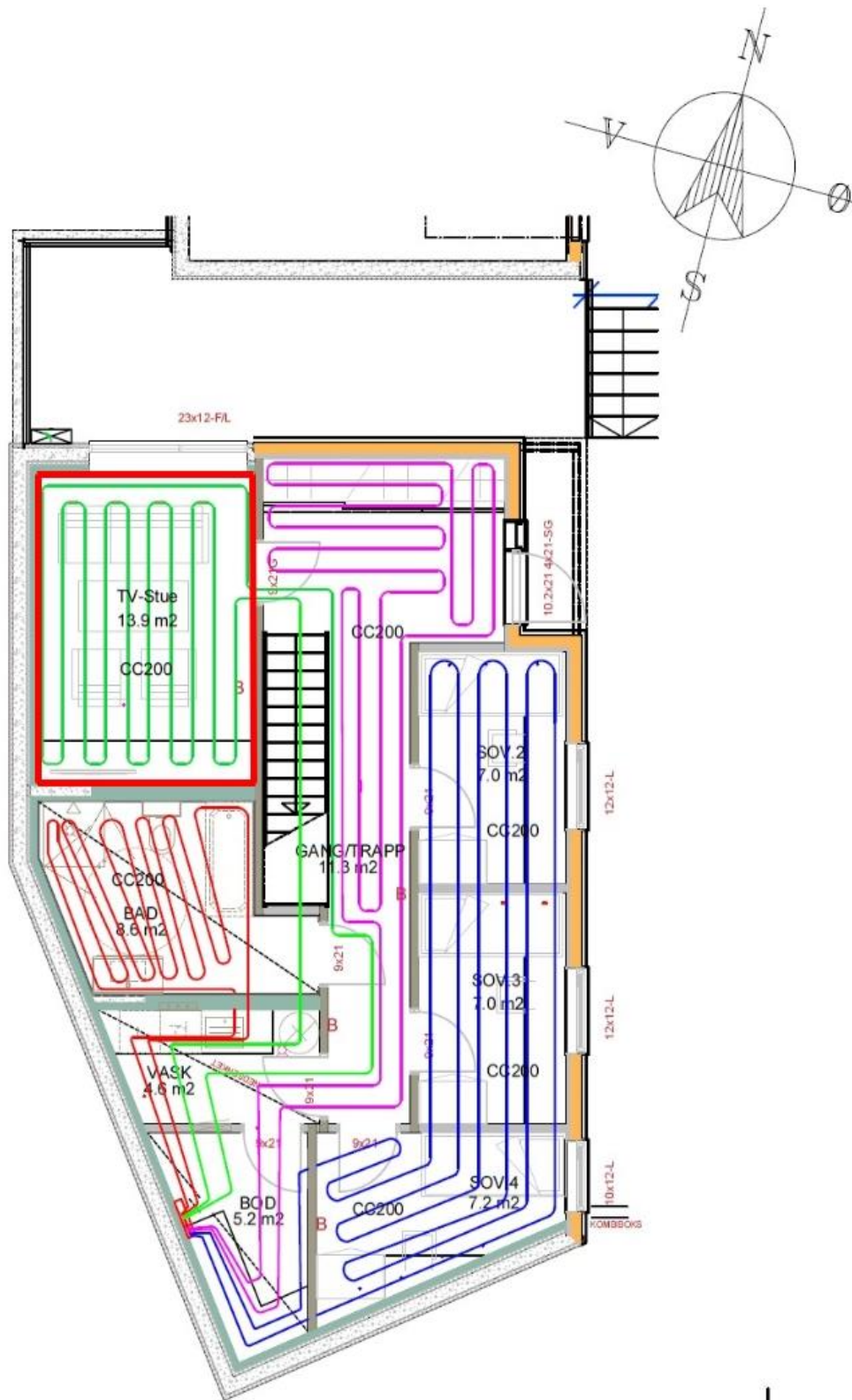
** Målefrekvens anbefalt etter ISO EN NS 7730

Figur 22 viser hvordan stativet for måling av termisk komfort ble plassert i rommet med referanse høyde 0,6 m markert med rød skrift. Målingene ble utført basert på oppholdssone for måling av termisk komfort beskrevet i kapittel 2.1.2.



Figur 22: Plasseringer av sensorer for måling av termisk komfort med respektive høyder

Det aktuelle rommet det ble utført feltmålinger i er markert med rød randsone fremstilt i Figur 23. Her går gulvvarmekursen ut fra «BOD» (markert på figur 23) og gjennom «GANG/TRAPP» før turledning går langs vinduet ut mot nord før den går langs vegg Nord-Vest før det fortsetter i enkelt S-mønster før returledning går ut samme vei gjennom «GANG/TRAPP».



Figur 23: Rommet det utføres målinger i markert rødt på figur.

4.3.2 Målepunkter - Varmepumpeenhet

Målepunktene for varmpumpeenheten er presentert i Tabell 23. Her gis det oversikt over sensorer, måleparametere og hvordan en samler inn de aktuelle data. Tabell 24 gir oversikt over de ulike måledagene med oversikt over måleperiode og målefrekvens.

Tabell 23: Måleparametere varmpumpeenhet

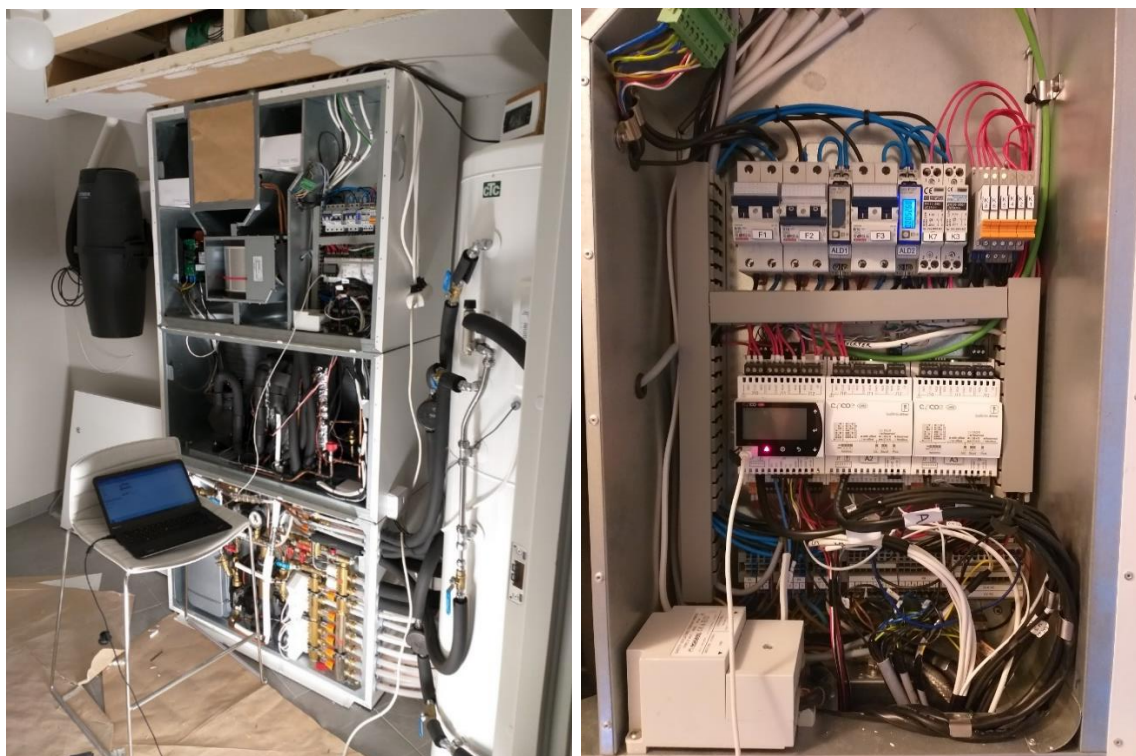
Målepunkter	Sensor	Innsamling av data
Turtemperatur, $[T_{tur}]$	Systemintegrert NTC-sensor	Carel PLS
Returtemperatur $[T_{retur}]$	Systemintegrert NTC-sensor	Carel PLS
Strøm kompressor [A]	Power meter	Carel PLS
Spenning kompressor [V]	Power meter	Carel PLS
Fordampertemperatur $[T_e]$	Systemintegrert NTC-sensor	Carel PLS
Gasskjøler (RH) inngangstemperatur $[T_{gc,inn}]$	Systemintegrert NTC-sensor	Carel PLS
Gasskjøler inngangstrykk [Bar]	Systemintegrert NTC-sensor	Carel PLS
Total vannstrøm fra fordelerstokk $[\dot{V}]$	Grundfos flow måler	Carel PLS
Luftstrøm inn til teknisk rom $[m^3/h]$	Belimo anemometer	Carel PLS
Temperatur i rommet, T_{luft}	Justerbar romtermostat	Carel PLS
Inntaksluft, T_{ute}	Systemintegrert NTC-sensor	Carel PLS
Værdata (Utetemperatur, fuktighet)	Værstasjon nær Asker	Klimadata fra Meteorologisk Institutt

Tabell 24: Måleplan varmpumpeenhet

	Måledag	Turtemperatur (Baderom)	Romtermostat (Øvrige rom)	Måleperiode	Målefrekvens
	Varmepumpeenheten	Dag 1	30°C	22°C	24t
Dag 2		29°C	21°C	24t	Hvert 60 sek
Dag 3		28°C	20°C	24t	Hvert 60 sek
Dag 4		27°C	19°C	24t	Hvert 60 sek

4.4 Fremgangsmåte- varmepumpeenhet

For korrekt utførelse ved innhenting av data fra inneklimasentralen ble det lagt inn aktuelle parameter som skulle bli logget i PLS – styringsenhetene ved hjelp fra en tredjepart (Carel avd. Sverige). Dette ble utført ved oppkobling av PC til PLS. Det ble satt av to dager i forveien for å laste opp dette til styringsenheten og sikre at alle aktuelle parametere ble logget, se Figur 24.

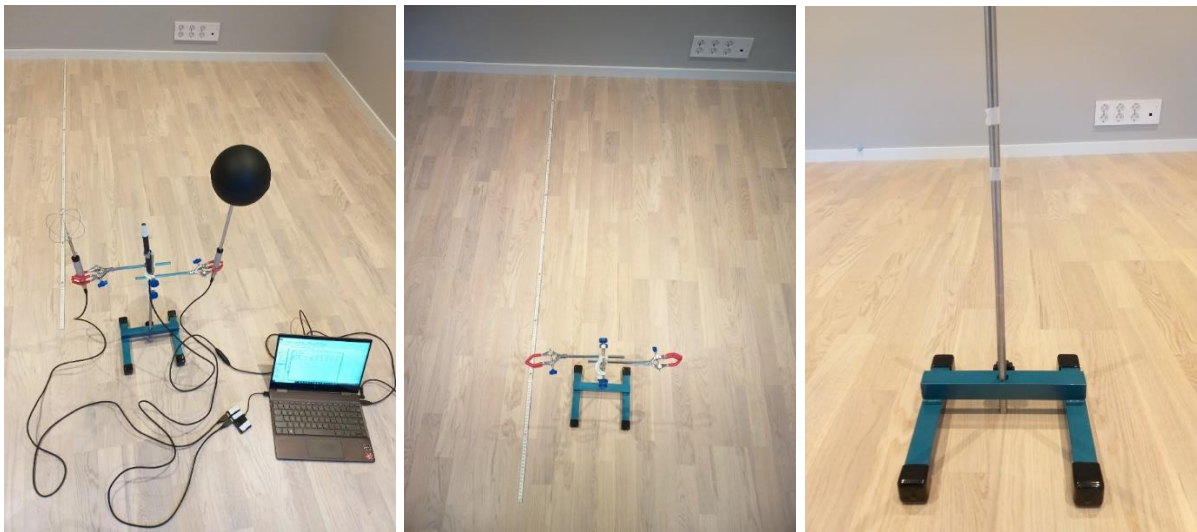


Figur 24: Fremstilling av hvordan tilkoblingen til Carel-PLS ble utført

Hver dag kl. 09.45 ble romtermostat endret med én grad celsius. Ved innhenting av data ble PC koblet inn på inneklimasentralens PLS og lastet ned som Excel – fil for videre analyse. Varmepumpen ble kjørt i dagmodus under målingene, med nattsinking hver dag.

4.5 Fremgangsmåte- Termisk komfort

Ved utførelse av målingene ble det satt opp en termisk rigg i 0,6 m høyde fra gulv. Via USB-tilkobling ble PC koblet opp mot Swema 03, HC2A-S og Swema 05. Bruksanvisning i henhold til SwemaMultipoint ble fulgt for korrekt tilkobling. Målingene ble utført over en tidsperiode på 2,5 timer fra kl. 09.50 – 12.20. Denne prosedyren ble gjentatt de resterende måledagene til samme tidspunkt. Figur 25 viser henholdsvis hvordan termisk komfort rigg var plassert i rommet.



Figur 25: Måleoppsett med PC, oppmåling med meterstokk og markering av høyde (hvit teip) for termisk rigg

4.6 Luftmengdemåling

Det ble målt luftmengder ved hjelp av «Accubalance» og SWEMA3000 med anemometer ved å plassere måletrakten ved tilluftsdonet i rommet 3 ganger i løpet av måleperioden for å sikre at luftmengdene var slik som forventet. Dette ble utført kl. 10.00, 11.00 og 12.00 hver dag.

Anemometer ble plassert i senter av måletrakten slik som vist på bildet og utført etter beskrivelse fra manual for SWEMA3000.



Figur 26: Måletrakt med anemometer

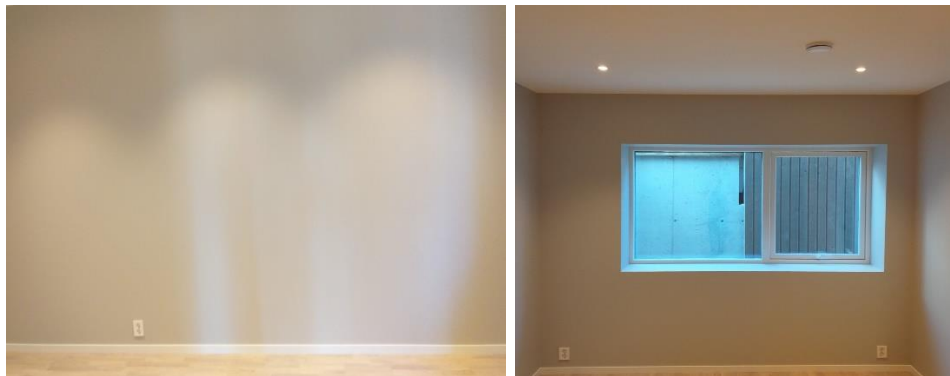
4.7 Gjennomføring av målinger

i. Testdager $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ turtemperatur baderom og $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ øvrige rom

Det ble som nevnt brukt to dager for testing av utstyr. Oppsett av termisk rigg ble plassert ut fra tegning laget i forveien, se Figur 22. Meterstokk ble benyttet for å måle opp hvor riggen skulle stå og for oppmåling av referanse høyde på stativ for termisk rigg. Riggen ble plassert 2 m fra vegg Sør – Øst og Nord – Øst og 1,4 m Sør – Vest og Nord – Vest. Se Figur 27, Figur 28 og Figur 29 for nærmere beskrivelse av rommets design og plassering av termisk komfort rigg.



Figur 27: Vegg Sør–Vest og Nord–Vest



Figur 28: Vegg Nord–Øst og Sør–Øst



Figur 29: Plassering av Termisk komfort rigg i rommet

Testdag 1

Første dag ble det utført en måling over 1 time med den termiske riggen. Denne mislykkes da den ikke målte svart globetemperatur korrekt. Etter feilsøking ble feilen funnet, og ny testmåling for termisk rigg og SWEMA3000 med anemometer og måletrakt ble utført over en 25 min periode for å se at utstyret logget de aktuelle parametere, noe den da gjorde.

Det ble hentet måledata fra inneklimasentralen ved tilkobling til Carel – PLS for å se om data som hadde blitt logget var tilstrekkelig gode nok. Det ble funnet ut at det var flere parametere som manglet. De nødvendige parametere ble så lagt til i etterkant av dette. Det krevdes derfor en ny dag for testing slik at dette skulle bli korrekt og data fra målingen var ikke tilstrekkelig til bruk som analyse.

Testdag 2

Testmåling med termisk rigg over 2 t ble utført med 30 °C turtemperatur & romtemperatursettpunkt 22 °C i øvrige rom (TV – Stue). Data hentet ut fra inneklimasentralen viste at det var to parametere som ikke ble logget korrekt. Det ble en ny dialog med Carel i Sverige for å få orden på dette. Det ble så lastet inn nye logger i enheten og hentet ut nye data over en 10 minutt periode. Alle parametere ble nå logget. Luftmengder ble målt over en 60 sek periode ved start, midtveis og ved slutt. Resultatet av dette kan ses i vedlegg O.

ii. Måledag 1 – 30 °C turtemperatur baderom og 22 °C øvrige rom

Målingene for termisk komfort ble utført over en tidsperiode på 2,5 t, der 15 min av tiden var for å sikre mot instrumentenes «treghet» ved oppstart og sikre at verdiene som ble målt skulle ha god validitet og reliabilitet. Resultater fra målingene kan ses i kapittel 5. Målingene fra inneklimasentralen ble eksportert og lastet opp på egen PC i etterkant av termisk komfort målingene. Figur 30 viser romtermostatens settpunkt ved måling.



Figur 30: Carel – Romtermostat satt til 22 °C romtemperatur & 30 °C turtemperatur

iii. Måledag 2 – 29 °C turtemperatur baderom og 21 °C øvrige rom

Ved start (kl. 09:45) ble romtermostatsettpunkt endret med en grad celsius i alle øvrige rom til 21 °C og turtemperatur 29 °C i baderom (Figur 31). Målingene ble utført over samme tidsperiode og samme fremgangsmåte som første måling. Varmepumpen hadde flere start/stopp underveis ved måling av termisk komfort.



Figur 31: Carel – Romtermostat satt til 21 °C romtemperatur & 29 °C turtemperatur

iv. Måledag 3 – 28 °C turtemperatur baderom og 20 °C øvrige rom

Ved start (kl. 09:45) ble romtermostatsettpunkt endret med en grad celsius i alle øvrige rom til 20 °C og turtemperatur 28 °C i baderom (Figur 32). Samme prosedyre som foregående dager ble utført.



Figur 32: Carel – Romtermostat satt til 20 °C romtemperatur & 28 °C turtemperatur

v. 4. Måledag - 27 °C turtemperatur baderom og 19 °C øvrige rom

Ved start (kl. 09:45) ble romtermostatsettpunkt endret med en grad celsius i alle øvrige rom til 19 °C og turtemperatur 27 °C i baderom (Figur 33). Samme prosedyre som foregående dager ble utført.



Figur 33: Carel – Romtermostat satt til 19 °C romtemperatur & 27 °C turtemperatur

5 Resultater & Diskusjon

En detaljert fremstilling av resultatene vil bli analysert og diskutert i dette kapittelet. Kap. 5.1 beskriver hvordan databehandlingen er blitt utført med detaljert beskrivelse for henholdsvis termisk komfort og varmepumpeenhet. Kap. 5.1.3 viser resultater fra funksjonstesting som ble utført under testdagene.

Fremstilling av de eksperimentelle resultatene for termisk komfort blir gjengitt i kap. 5.2 der det blir presentert en analyse av hvordan termisk komfort utvikler seg med varme- og distribusjonssystemet som er installert.

Kap. 5.3 presenteres resultater fra varmepumpeenhet ved endrede tur- og returtemperaturer fra hvert døgn. En dypere analyse av effektivitet til varmepumpen med påfølgende diskusjon presenteres Kap. 5.4.5.

5.1 Analyse av data

Beskrivelse av hvordan analyse av data er blitt utført vil bli beskrevet nærmere for termisk komfort og inneklimasentral i dette kapittelet.

5.1.1 Termisk komfort

Den termiske riggen logget datapunkter etter anbefaling fra NS – EN ISO 7730 med 10 målepunkter per sekund. Det ble derfor benyttet Microsoft Excel til å sortere datapunkter til et samlet gjennomsnitt over et minutt for lettere å kunne arbeide med data, (dette påvirket ikke resultatet). Sorteringen er blitt utført ved å bruke en «GJENNOMSNIITT(INDEKS)» – funksjon som tar gjennomsnitt basert på hvilken matrise det ønskes å ta gjennomsnitt av med beskrivelse av hvilke rad/kollonnennummer en vil starte og slutte på. Dette ble utført for lufttemperatur, middelstrålingstemperatur, lufthastighet og relativ fuktighet. Vedlegg K gir nærmere beskrivelse av hvordan sorteringen ble utført med tilhørende parameter, formel og beskrivelse.

5.1.2 Inneklimasentral

Det er blitt brukt funksjoner som «GJENNOMSNIITT.HVIS.SETT», «SUMMER.HVIS.SETT» og «ANTALL.HVIS.SETT» ved sortering i Microsoft Excel. Disse funksjonene baserer seg på kriterieområder med satt kriterium for hvert enkelt område som ønskes å gjøres en beregning på. Nærmere beskrivelse av dette kan ses i kommende avsnitt.

Dataanalyse av kompressoreffekt og levert effekt til romoppvarming som funksjon av utetemperatur

Ved analyse av data er det tatt hensyn til når kompressoren er på/av for å få et praktisk bilde av hvordan COP utvikler seg over tid ved ulike utetemperaturer. Datamaterialet over 24 t er sortert basert på hvor mange ganger kompressor er på. Funksjonen «ANTALL.HVIS.SETT» er benyttet til å sortere antall ganger kompressor er på ved ulike utetemperaturer.

Utetemperaturene som inntraff under måledagene, lå mellom intervallet 0 – 16 °C.

Eksempelet i vedlegg M viser tilfellet der det beregnes for utetemperatur 16 °C.

Kriterieområdene som er valgt ved summering av antall ganger temperaturintervallet (16 – 16,99 °C) oppstår i løpet av måleperioden på 24 t er; klokkeslett, utetemperatur og kompressoreffekt. Dette er så brukt til å finne antall ganger kompressor er på i løpet av 24 t. «SUMMER.HVIS.SETT» – funksjonen er blitt brukt for summering av total levert effekt og kompressoreffekt ved gitt utetemperaturintervall. Den totale summen av kompressoreffekt og levert effekt ble så dividert med antall ganger temperaturintervallet oppstod i løpet av døgnet for å finne gjennomsnittlig verdier under tidsperioden. COP ble så beregnet etter formel (8(7) (s.20). Vedlegg L gir nærmere beskrivelse rundt hvordan beregning av volumstrøm, Q_{inn} , W_{kompr} og COP er beregnet ut fra datamaterialet hentet fra styringsenheten i varmpumpen.

Dataanalyse av tur –og returtemperatur som funksjon av utetemperatur og kompressoreffekt

Data ble analysert og sortert for å finne gjennomsnitt av tur –og returtemperatur i løpet av 24 t fra hver enkelt måling. Gjennomsnittsområde for tur –og returtemperatur fra hver måling er blitt brukt og fordelt i hver sin kolonne for beregning. Det er satt kriterier basert på utetemperaturintervall og ved kompressor i drift. Dette ble utført ved å basere seg på utetemperatur og når kompressor går før en deretter beregnet gjennomsnittlig tur –og returtemperatur som funksjon av utetemperatur og kompressoreffekt.

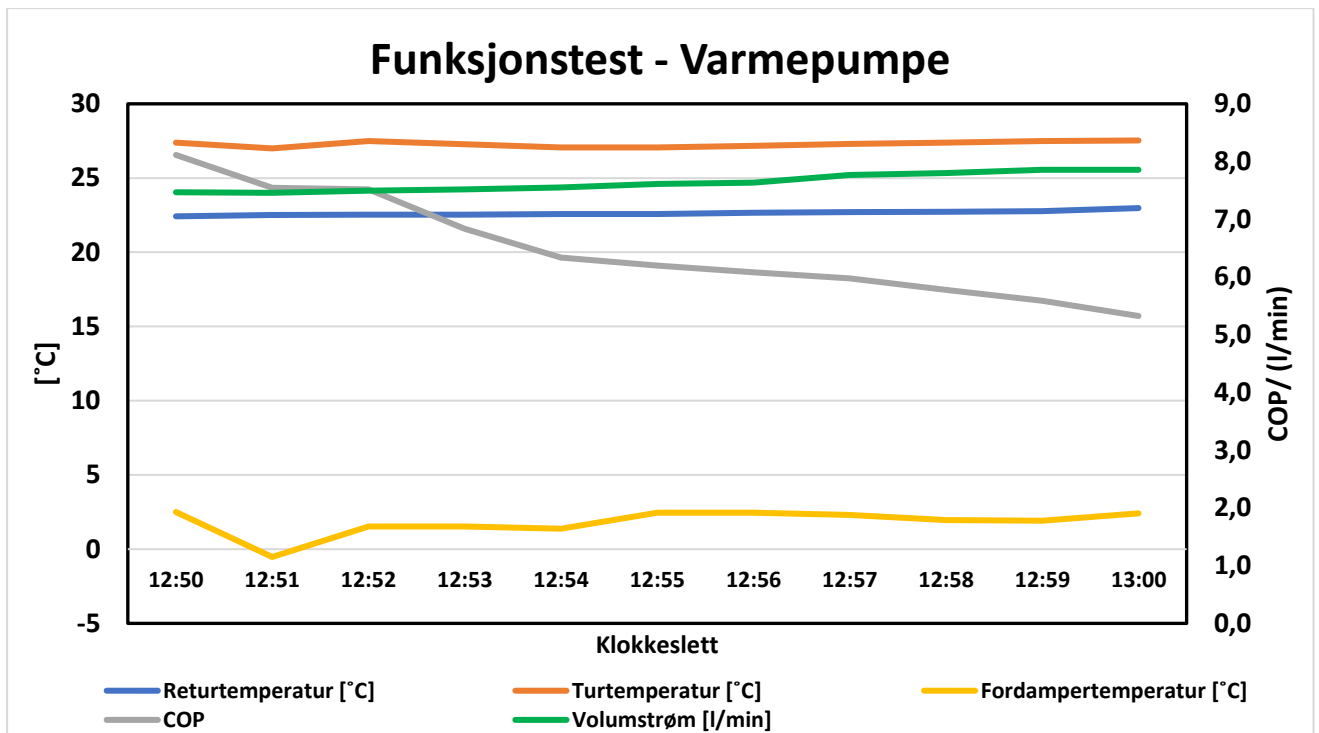
Eksempelvis vil det bli tatt gjennomsnitt av hva tur –og returtemperatur som oppstår ved utetemperaturintervall 16,00 – 16,99 °C i Excel ved hjelp av en «GJENNOMSNIITT.HVIS.SETT» – funksjon. Etter dette er det blitt tatt differansen mellom tur –og returtemperatur for å beregne $\Delta T_{\text{tur-retur}}$ som benyttes til å beregne levert effekt(Q_{inn}). COP er blitt beregnet basert på Q_{inn} og W_{kompr} . Vedlegg N gir nærmere beskrivelse rundt kriterieområde, funksjoner og formler som er brukt.

5.1.3 Funksjonstesting – Kvalitetssikring av datamateriale

Det eksperimentelle oppsettet for varmepumpeenhet og termisk komfort rigg er beskrevet i kap. 4.7, *Gjennomføring av målinger*. Funksjonstesting var hensiktsmessig å utføre på bakgrunn av disse punktene:

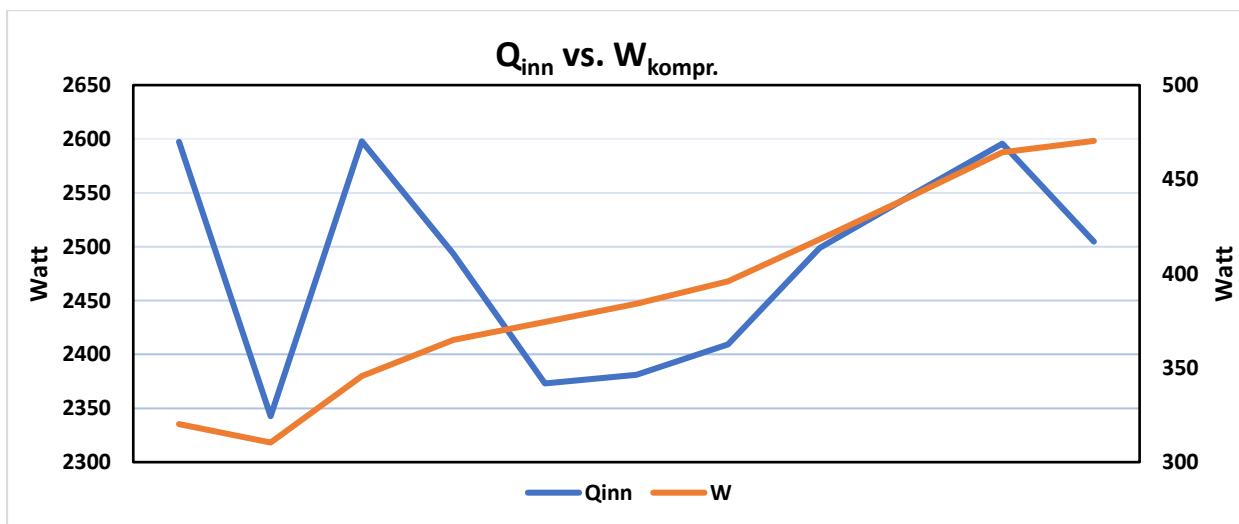
- Finne ut av hvordan instrumentene responderte.
- Sikre at data ble logget ved målinger.
- Se til at problemer ble oppdaget i forveien av de aktuelle måledagene.
- Vise til usikkerhet i målingene.
- Kvalitetssikring av datamaterialet med tanke på måleusikkerhet som gir bakgrunn for å skape god validitet og pålitelighet.

Data fra funksjonstest fra testmåling dag 2 ble hentet ut fra varmepumpen over en 10 min periode. Data fremstilt i Figur 34 og Figur 35 viser hvordan parametere fra varmepumpeenheten endret seg og Tabell 25 gjengir gjennomsnittsverdier fra perioden.



Figur 34: Testmåling - Varmepumpe

I løpet av testperioden var $\Delta T_{\text{tur-retur}}$ vekslende mellom 4,5 – 5 K. Volumstrømmen var svakt økende samt en fordampertemperatur som vekslet mellom 3 K. I hovedsak var det kompressoreffekten som påvirket COP under denne målingen slik Figur 35 viser.



Figur 35: Kompressoreffekt vs. levert effekt til oppvarming fra testmåling

Testmålingen viser at det er en klar sammenheng med COP og økt effekt på kompressor. COP synker ved økende kompressoreffekt og øker med synkende kompressoreffekt.

Effektleveransen (Q_{inn}) derimot endres ikke i like stor grad som kompressoreffekten under måleperioden og vil ikke påvirke COP i særlig stor grad slik måleresultatene viser.

Tabell 25: Gjennomsnittverdier fra inneklimasentral over en 10 min periode

Parameter - Inneklimasentral	Testdag
Volumstrøm [l/min]	7,6
Turtemperatur Baderom [°C]	27,3
Turtemperatur Øvrige rom [°C]	22,6
$\Delta T_{\text{tur-retur}}$ [K]	6,0
Romtermostat [°C]	20,5
Lufttemperatur (Swema 03) [°C]	20,4
COP [-]	6,7

Data fra termisk rigg viser at parameterne som endres i størst grad er utetemperatur, $\%RF_{\text{inne}}$ og $\%RF_{\text{ute}}$. Lufttemperatur inne og middelstrålingstemperatur endres lite under denne målingen.

Operativ temperatur beregnes ut fra formel (1) gitt i kapittel 2.1.3. Lufthastigheten viser at det er innenfor anbefalt lufthastighet $< 0,15$ m/s i hele måleperioden og sikrer mot ubehag rundt trekkhastighet. Da varmepumpen ikke hadde logget luftmengdene sendt ut fra varmepumpen under perioden var det ikke noe data på dette, se Tabell 26. Resultater fra termisk rigg kan ses i vedlegg R.

Tabell 26: Snittverdier for parametere over måleperioden på 2t

Parameter - Termisk Komfort	Testdag
Luftmengder [m ³ /h]	-
Luftmengder [m ³ /h] (Måletrakt)	9,8 ± 11 %
RF_{inne} [%]	23,48
RF_{ute} [%] (måleperioden)	37,33
Utelufttemperatur [°C]	9,91
$U_{R,\text{uteluft}}$ [%] - utelufttemperatur	± 0,13
Lufthastighet [m/s]	0,08
DR [%]	4,30
PMV [-]	-1,70
PPD [%]	61,93
Operativ temperatur [°C]	20,12

Liertoppen målestasjonen ligger ca. 100 moh. høyere enn måleobjektet og var nærmeste målestasjon som ga minuttverdier til sammenligning. $U_{R,\text{uteluft}}$ i Tabell 26 viser total usikkerhet med hensyn på utetemperaturforskjell mellom data fra værstasjon og temperatur ved inntaksluft på stedet med forskjell på 13 %. På bakgrunn dette ble temperatur ved inntaksluft (sensor ved tilluftskanal) brukt som referanse for utetemperatur ved fremstilling av data da de ble ansett som valide og pålitelige til bruk i videre analyse på grunn av lokasjonsforskjeller. Luftmengdene var lave, og hadde en differanse på 11 % mellom laveste til høyeste måling.

5.2 Resultater - Termisk komfort

Resultatene under dette kapittelet skal kunne gi svar på følgende delspørsmål:

- Vil den termiske komforten endres ved justering av rom- og turtemperatur?
- Hvordan vil effektiviteten til varmepumpen endres ved endring av settpunkttemperatur?

5.2.1 Termisk komfort rigg

Tabell 27 & Tabell 28 viser gjennomsnittverdier fra måledagene (kl. 10:00 – 12:00) med parametere fra termisk komfort rigg, måletrakt med SWEMA3000, inneklimasentral og meteorologiske klimadata fra Liertoppen målestasjon. Tabell 27 & Tabell 28 navngitt $U_{R,uteluft}$, viser total usikkerhet med hensyn på utetemperaturforskjell mellom data fra værstasjon og temperatur ved inntaksluft på stedet. Ved sammenligning var det et avvik på 2 – 13 % under de ulike måledagene. Total usikkerhet rundt luftmengder, $U_{R,luftmengder}$, ble målt med måletrakt og er beregnet basert på formler gjengitt i kap. 2.6.1. Luftmengdene levert fra aggregat var stabile med 1 % differanse og anses som pålitelige. Derimot var luftmengdene inn til rommet ustabile og varierte fra dag til dag slik

Tabell 27 & Tabell 28 viser. Resultatene viser at ved de to første måledagene var luftmengdene inn til rommet ulik fra testdagen og måledag 3 & 4. I utgangspunktet skulle luftmengdene inn til rommet vært tilnærmet likt under alle dagene da luftmengdebehovet for rommet ikke hadde endrede betingelser og en tilstedeværelse som var lik for hver måling, og vil ha betydning rundt påvirkning av termisk komfort (se vedlegg O & P for verdier fra luftmengdemåling med tilhørende formeloppbygning). Grunnet oppgaven har søkelys på hvordan den termiske komforten ved et vannbårent gulvvarmesystem som er koblet i serie med baderomskursen endres ved ulike temperaturer, vil en dypere analyse av hvordan inneklimasentralens ventilasjonsmodul ble driftet og hvordan den påvirker termisk komfort være forslag til videre arbeid. En dypere analyse vil derfor ikke tatt bli tatt her, men tas med i betraktning som en usikkerhetsfaktor ved vurdering av termisk komfort.

Den relative luftfuktigheten innendørs var stabil innenfor intervallet 20 – 60 %, med en variasjon på 5 % RF_{inne} som gir gode termiske forhold for mennesket og bygning. Verdiene for PMV og PPD viser at boligbygningen havner under kategori IV (se kap. 2.1.7, Tabell 4) ved de 3 første måledagene, med ventet andel misfornøyde < 25 % og en ventet gjennomsnittlig

vurdering (PMV) på $-0,83$ i snitt (se krav Tabell 4, kap. 2.1.7). Måledag 4, der romsettpunkt var satt $19\text{ }^{\circ}\text{C}$, havnet PMV og PPD – verdien utenfor de klassifiserte kategoriene for boligbygning med aktivitetsnivå $1,2\text{ Met}$ og vil ved disse forholdene ha dårlig termisk komfort for kroppen som helhet. Selv om luftmengdene målt i rommet varierte i stor grad mellom de ulike målingene, var komforten stabil når det kommer til trekkhastighet, PMV & PPD.

Tabell 27: Gjennomsnittsverdier for termisk komfort under måledag 1 & 2

Parameter - Termisk Komfort	Måledag 1*	Måledag 2**
Luftmengder [m^3/h]	197,4	198,1
Luftmengde [m^3/h] (Måletrakt) $\pm U_{R,\text{luftmengder}}$	$46,2 \pm 6\%$	$28,1 \pm 22\%$
RF_{Inne} [%]	28,66	26,23
RF_{ute} [%]	45,00	36,00
Utelufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	9,54	12,32
$U_{R,\text{uteluft}}$ – utelufttemperatur [%]	± 11	± 2
Lufthastighet [m/s]	0,070	0,066
DR [%]	4,06	2,87
PMV [-]	-0,89	-0,74
PPD [%]	22,01	16,55
Operativ temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	20,41	21,07

* Settpunkt: Turtemperatur $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ og Romtemperatursettpunkt $22\text{ }^{\circ}\text{C}$

** Settpunkt: Turtemperatur $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ og Romtemperatur $21\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabell 28: Gjennomsnittsverdier for termisk komfort under måledag 3 & 4

Parameter - Termisk Komfort	Måledag 3*	Måledag 4**
Luftmengder [m^3/h]	197,6	199,6
Luftmengde [m^3/h] (Måletrakt) $\pm U_{R,\text{luftmengder}}$	$51,4 \pm 5\%$	$48,9 \pm 4\%$
RF_{Inne} [%]	23,70	28,31
RF_{ute} [%]	30,00	34,33
Utelufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	13,38	13,83
$U_{R,\text{uteluft}}$ – utelufttemperatur [%]	± 8	± 5
Lufthastighet [m/s]	0,039	0,022
DR [%]	1,55	0,85
PMV [-]	-0,86	-1,09
PPD [%]	20,90	30,20
Operativ temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	20,63	19,64

* Settpunkt: Turtemperatur $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ og Romtemperatursettpunkt $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

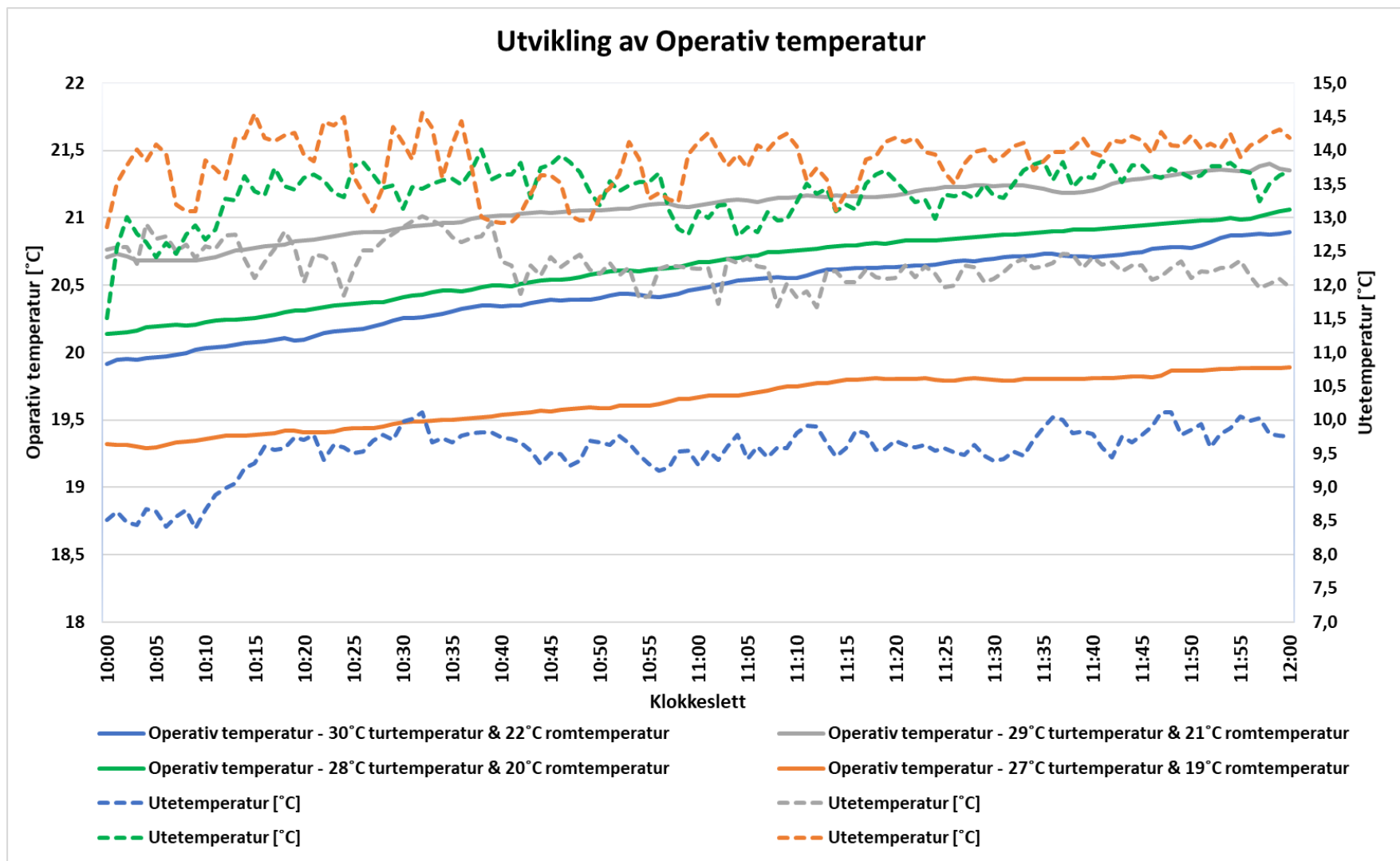
** Settpunkt: Turtemperatur $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ og Romtemperatur $19\text{ }^{\circ}\text{C}$

Da lufthastigheten aldri gikk over 0,2 m/s og differansen mellom middelstrålingstemperatur og lufttemperatur var mindre enn 4 K, ble formel (1) (se kap. 2.1.3) benyttet ved beregning av operativ temperatur.

Figur 36 viser utvikling av operativ temperatur sett opp mot utetemperatur ved ulike settpunkttemperaturer. Den operative temperaturen var stigende ved alle settpunkttemperaturer. Dette mye grunnet økende utetemperaturer og distribusjonssystemets temperaturregulering til rommet.

Figur 36 viser at den operative temperaturen er ansett som stabil mellom hver måling med en variasjon fra laveste til høyeste på 1,43 K. Dette er innenfor anbefalt grenseverdi for operativ temperatur (19 – 26 °C) ved aktivitetsnivå 1,2 Met etter TEK 17 (se Tabell 3, kap. 2.1.7).

Lufthastigheten var på det høyeste 0,07 m/s noe som resulterte i en trekkhastighet (DR) som ikke var nevneverdig høy og godt innenfor kravene (se Tabell 4, kap. 2.1.7). (Vedlegg R viser resultater for temperaturutvikling fra hver måledag).



Figur 36: Utvikling av operativ temperatur ved ulike settpunkttemperaturer, (farge for heltrukken linje tilhører stiple linje)

5.2.2 Termisk komfort – Påvirkning fra distribusjonssystemet

Tabell 29 & Tabell 30 viser parametere som ble hentet fra varmpumpeenheten med gjennomsnittsverdier fra måleperioden for termisk komfort (kl. 10:00 – 12:00). Turtemperatur ut til distribusjonssystemet oppnådde ved dag 3 og 4 tilnærmet settpunkt. Returtemperaturen holdt seg stabil med en variasjon på ca. 1,0 K mellom de ulike dagene. Det er en naturlig økning i returtemperatur ved synkende tur – og romtemperatursettpunkt fra hver dag da settpunkttemperaturene var synkende og utetemperaturerene var økende de ulike måledagene (se Tabell 29 & Tabell 30). Ved måledag 2 var det mindre målepunkt fra varmpumpen da den hadde hyppige start/stopp – intervaller gjennom måleperioden for termisk komfort. Dette kan være en av grunnene til hvorfor turtemperaturen var 1,63 °C fra å oppnå settpunkt ved måledag 2. Driften var også dårlig sammenlignet med de andre måledagene med en COP på 2,9.

Tabell 29: Gjennomsnittsverdier for inneklimasentral under måledag 1 & 2

Parameter - Inneklimasentral	Måledag 1*	Måledag 2**
Volumstrøm [l/min]	8,42	7,85
Turtemperatur Baderom [°C]	29,22	26,37
Returtemperatur Øvrige rom [°C]	23,18	23,29
$\Delta T_{\text{tur-retur}}$ [K]	6,04	3,08
Romtermostat [°C]	20,04	20,50
Lufttemperatur (Swema 03) [°C]	20,35	21,03
COP [-]	5,7	2,9

* Settpunkt: Turtemperatur 30 °C og Romtemperatursettpunkt 22 °C

** Settpunkt: Turtemperatur 29 °C og Romtemperatur 21 °C

Tabell 30: Gjennomsnittsverdier for inneklimasentral under måledag 3 & 4

Parameter - Inneklimasentral	Måledag 3*	Måledag 4**
Volumstrøm [l/min]	7,91	7,71
Turtemperatur Baderom [°C]	28,01	27,32
Returtemperatur Øvrige rom [°C]	23,72	24,16
$\Delta T_{\text{tur-retur}}$ [K]	4,29	3,16
Romtermostat [°C]	20,03	19,40
Lufttemperatur (Swema 03) [°C]	20,55	19,59
COP [-]	4,8	3,8

* Settpunkt: Turtemperatur 28 °C og Romtemperatursettpunkt 20 °C

** Settpunkt: Turtemperatur 27 °C og Romtemperatur 19 °C

Effektivitet ved ulike settpunkttemperaturer – Varmepumpeenhet

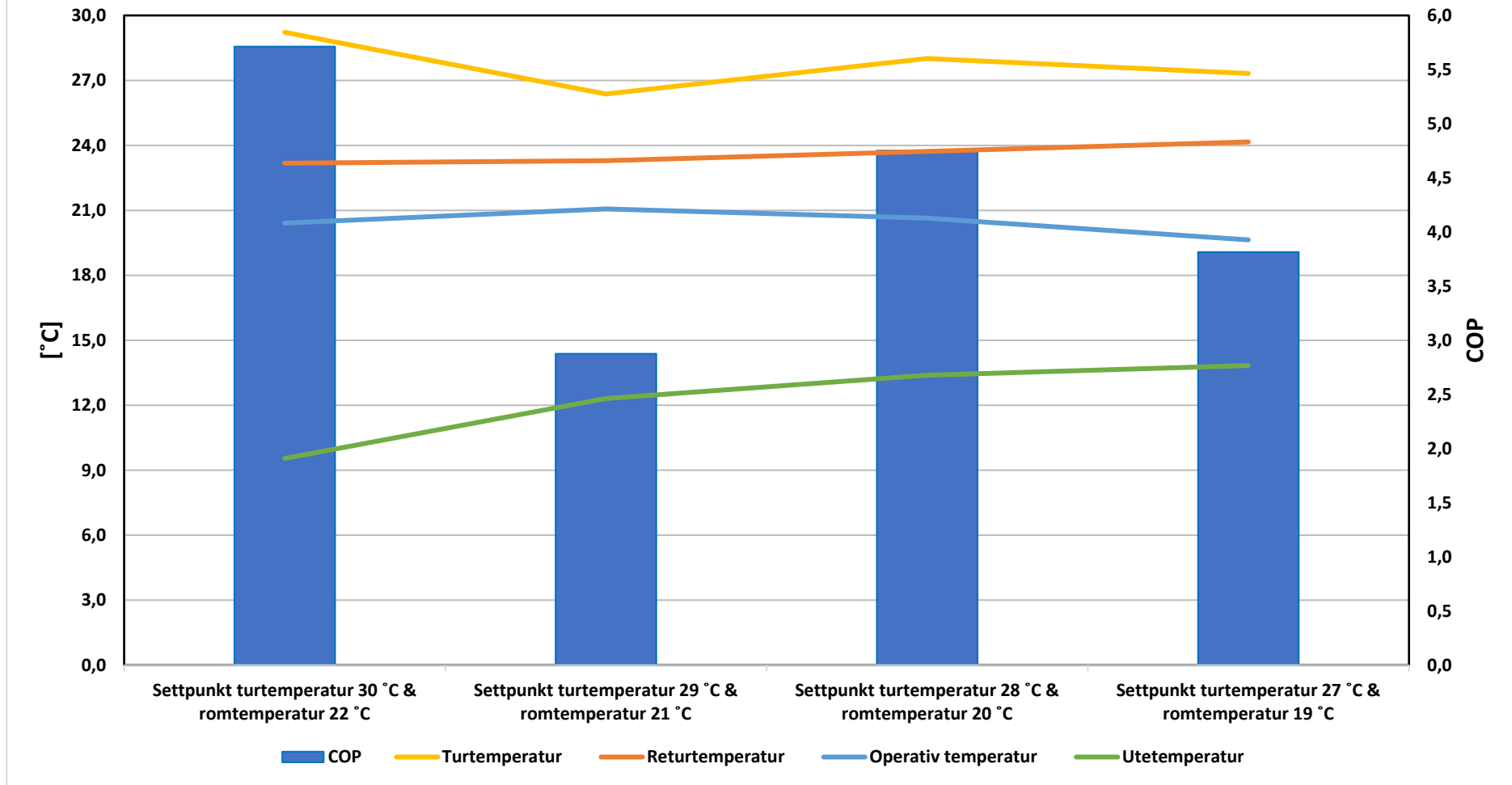
COP for romoppvarming var generelt høy ved ulike settpunkttemperaturer og oppnådde høyest verdi (5,7) ved settpunkt 30 °C turtemperatur, som er høyt sammenlignet med konvensjonelle luft til vann – varmpumper som tradisjonelt ligger mellom 2 – 4 (Linda P. Haugerud, 2015). Figur 37 viser hvordan varmesystemets påvirkning på den operative temperaturen endres ved ulike forhold. Figuren viser en stigende kurve for utelufttemperatur de respektive måledagene, mens operativ temperatur var synkende, unntak ved settpunkt 29 °C turtemperatur og 21 °C romtemperatur der det var en liten økning. Dette kan forklares ved at systemet ikke klarte å oppnå ønsket turtemperatur på 29 °C under måleperioden, noe som også påvirket COP – verdien. Det er også viktig å nevne at luftmengdene målt ved måletrakt var generelt lavere enn måledag 1, 3 & 4 under denne dagen. Måledag 1 viser til høyest COP – verdi og kan være mye grunnet varmpumpeenheten allerede hadde blitt stilt inn med de respektive settpunktverdiene et døgn i forveien. Dette kan ha resultert til bedre drift av varmpumpeenheten under denne målingen sammenlignet med de andre dagene.

Distribusjonssystemet – Termisk komfort

Det vannbårne gulvvarmesystemet som er koblet i serie med baderomskursen vil opprettholde god termisk komfort ved endrede settpunkttemperaturer. Distribusjonssystemet klarte å opprettholde god termisk komfort rundt operativ temperatur, lufthastighet og relativ fuktighet, men mindre god komfort for kroppen som helhet ved endrede settpunkt for rom – og turtemperatur. Dette kan være mye grunnet det er et helt nytt bolighus der det kan være en påvirkning fra fukt i betongen når det kommer til temperaturreguleringen til rommet. Betong som er en tung konstruksjon, vil da trenge lenger responstid på å regulere temperaturen til rommet.

En dypere analyse av varmpumpeenheten vil nå bli presentert for å se hvordan varmpumpens COP for romoppvarming utvikler seg ved endrede settpunkt og hvor lang tid det tar før romtemperaturen oppnår sitt romtemperatursettpunkt ved bruk av det seriekoblede gulvvarmesystemet.

Varmesystemets påvirkning på operativ temperatur



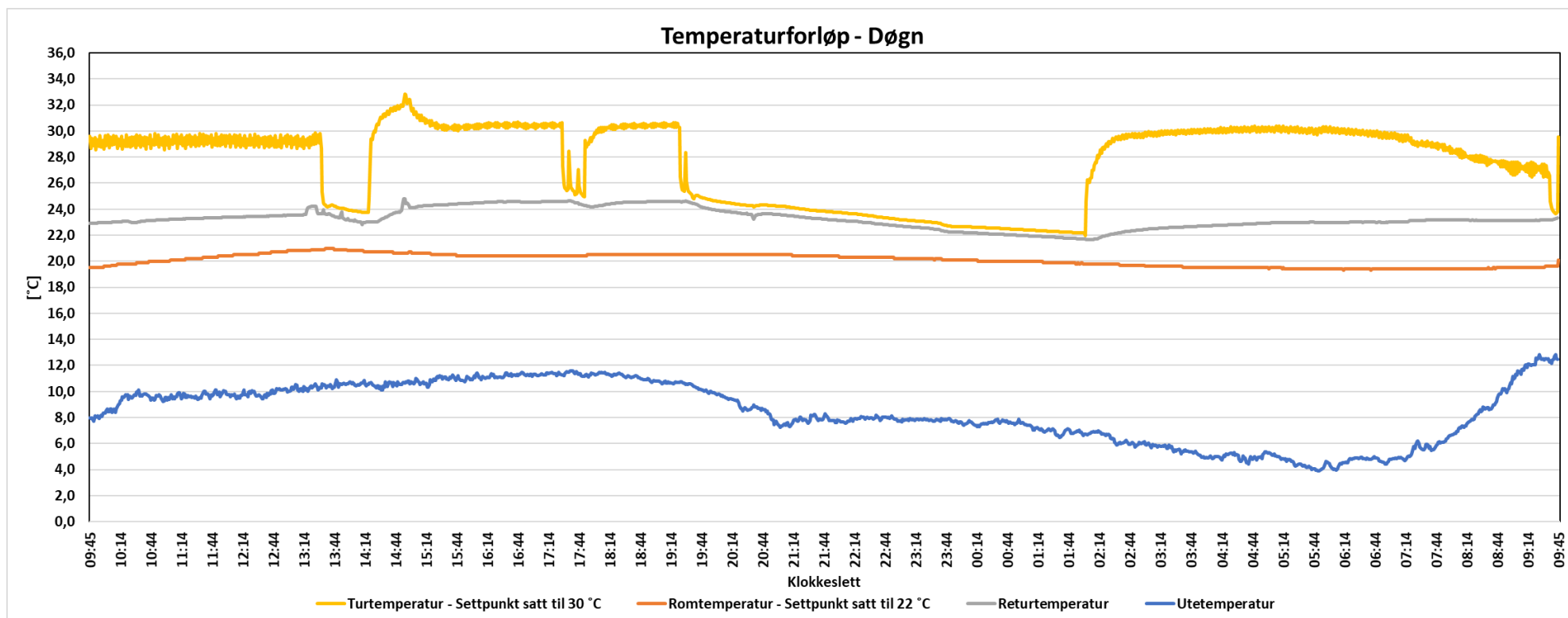
Figur 37: Regulering av varmesystemet sett opp mot operativ temperatur

5.3 Resultat - Varmepumpeenhet

Resultatene fra hver måledag vil bli presentert nedover og analysert, og skal gi svar på følgende delspørsmål:

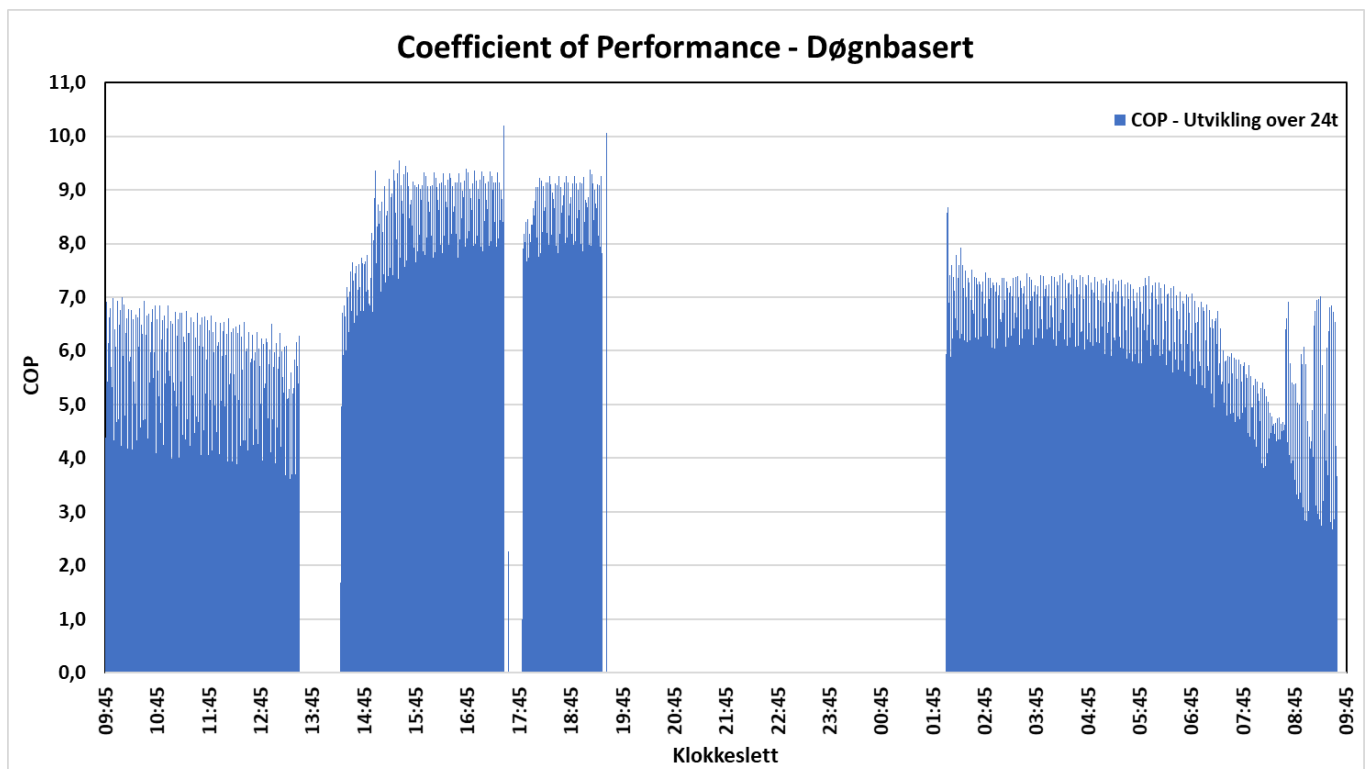
- Vil romtemperaturen oppnå sitt romtemperatursettpunkt ved bruk av et seriekoblet gulvvarmesystem?
- Hvordan vil det integrerte systemet, som er laget for å levere lavest mulig returtemperatur fungere i praksis?
- Klarer enheten å levere stabil turtemperatur til oppholdsrom ved innstilt nivå når disse er koblet i serie med baderommet?
- Ved hvilke settpunkttemperaturer vil COP være på sitt høyeste?

5.3.1 Måledag 1 – 30 °C turtemperatur baderom og 22 °C øvrige rom



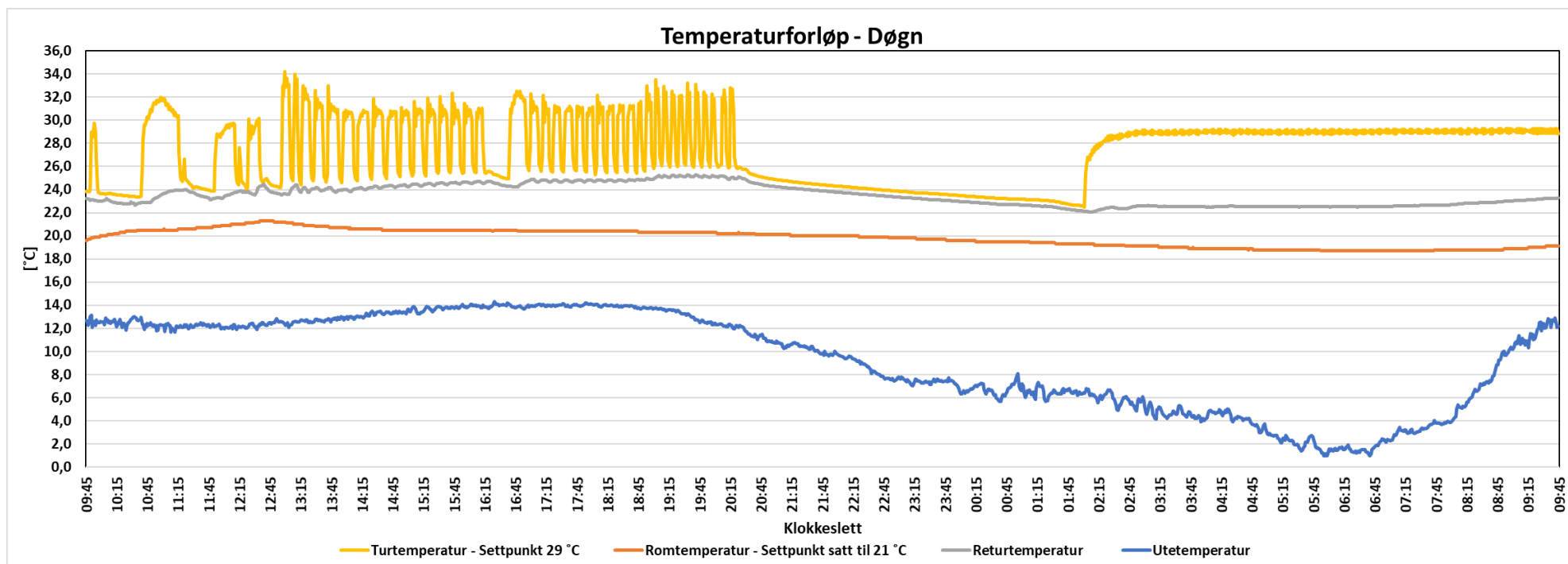
Figur 38: Temperaturforløp gjennom døgnet med settpunkt 30 °C turtemperatur og 22 °C romtemperatur

Figur 38 viser hvordan tur –og returtemperaturen utvikler seg ved settpunkt 30 °C turtemperatur og 22 °C romtemperatur. Romtemperaturen oppnår aldri settpunkt på 22 °C, og ligger i gjennomsnitt på 20,1 °C gjennom døgnet. Nattsenking var mellom kl. 19:30 – 02:00 denne dagen. Den høyeste romtemperaturen på 21 °C oppnås kl. 13:38. Utetemperaturen var aldri over 12 °C i løpet av døgnet, laveste temperatur va rett under 4 °C. Figur 39 viser enkeltverdier for COP med de blå stablede linjene og områdene uten farge er når kompressor ikke er i drift, som tilsvarer ingen COP – verdi. Det kan ellers merkes at COP – verdiene var jevnt over 4 under hele måleperioden.



Figur 39: Utvikling av COP over døgnet med settpunkt 30 °C turtemperatur og 22 °C romtemperatur

5.3.2 Måledag 2 – 29 °C turtemperatur baderom og 21 °C øvrige rom

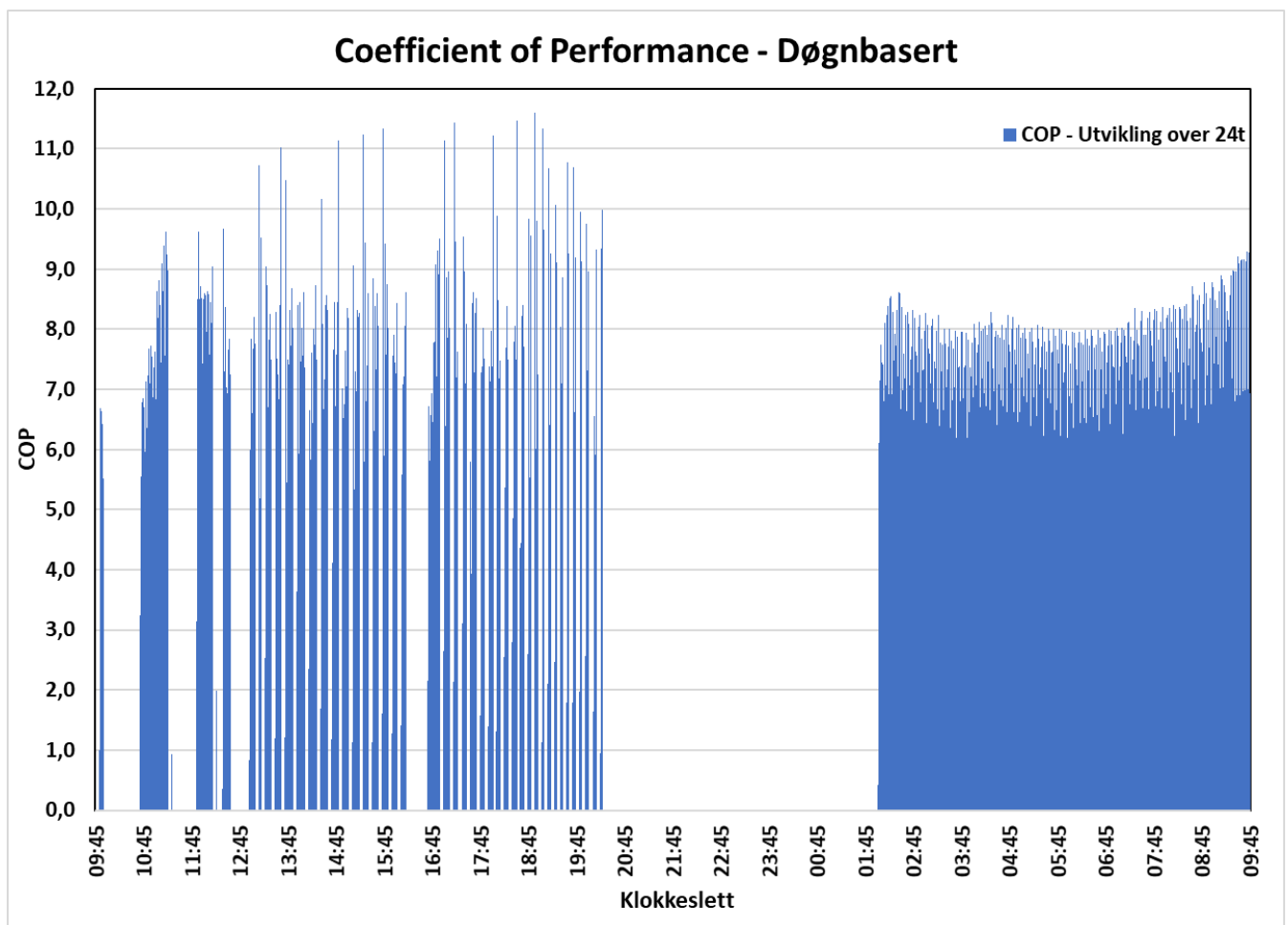


Figur 40: Temperaturforløp gjennom døgnet med settpunkt 29 °C turtemperatur og 21 °C romtemperatur

Figur 40 viser hvordan tur- og returtemperaturen utvikler seg ved settpunkttemperatur satt til 29 °C turtemperatur og romtemperatur satt til 21 °C. Romtemperaturen oppnår settpunkt 2 t 22 min etter endrede settpunkttemperaturer. Settpunktet på 21 °C holdes dog ikke mer en litt over 1 t, og romtemperaturen kommer aldri opp i settpunkttemperatur igjen.

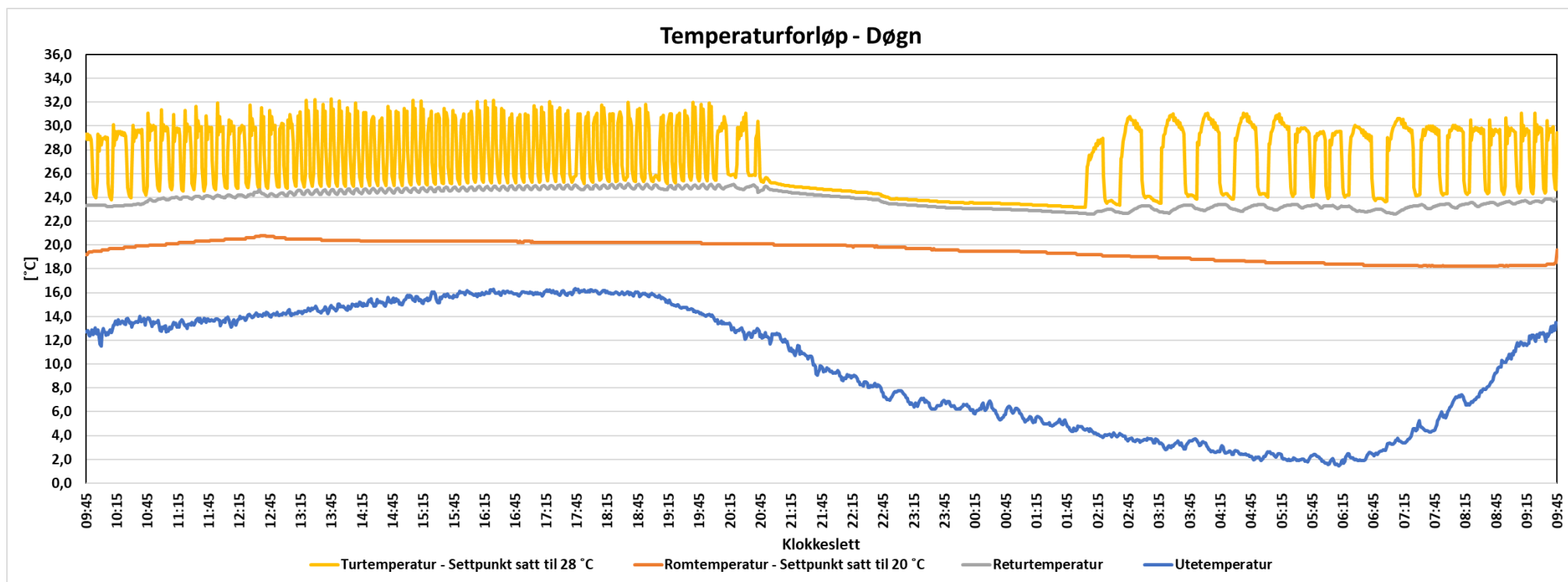
Romtemperaturen gjennom døgnet ligger 19,8 °C i snitt gjennom døgnet med nattsenking mellom kl. 20:18 – 02:00. Variasjon i utetemperaturen var mellom 0 – 14 °C denne dagen.

Figur 41 viser enkeltverdier for COP med de blå stablede linjene og områdene uten farge er når kompressor ikke er i drift, som tilsvarer ingen COP – verdi. COP – verdiene var jevnt over 6 i måleperioden.



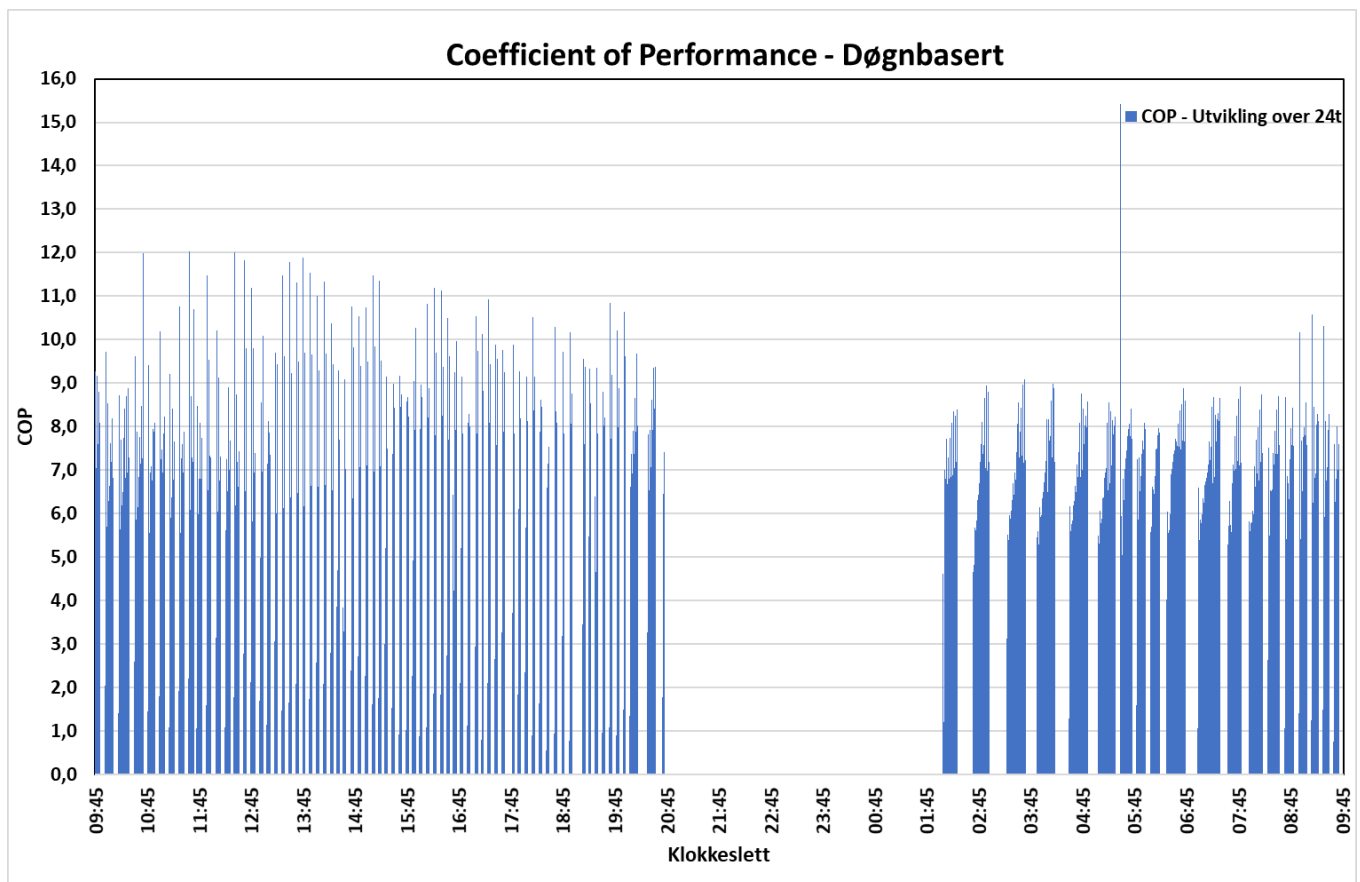
Figur 41: Utvikling av COP over døgnet med settpunkt 29 °C turtemperatur og 21 °C romtemperatur

5.3.3 Måledag 3 – 28 °C turtemperatur baderom og 20 °C øvrige rom



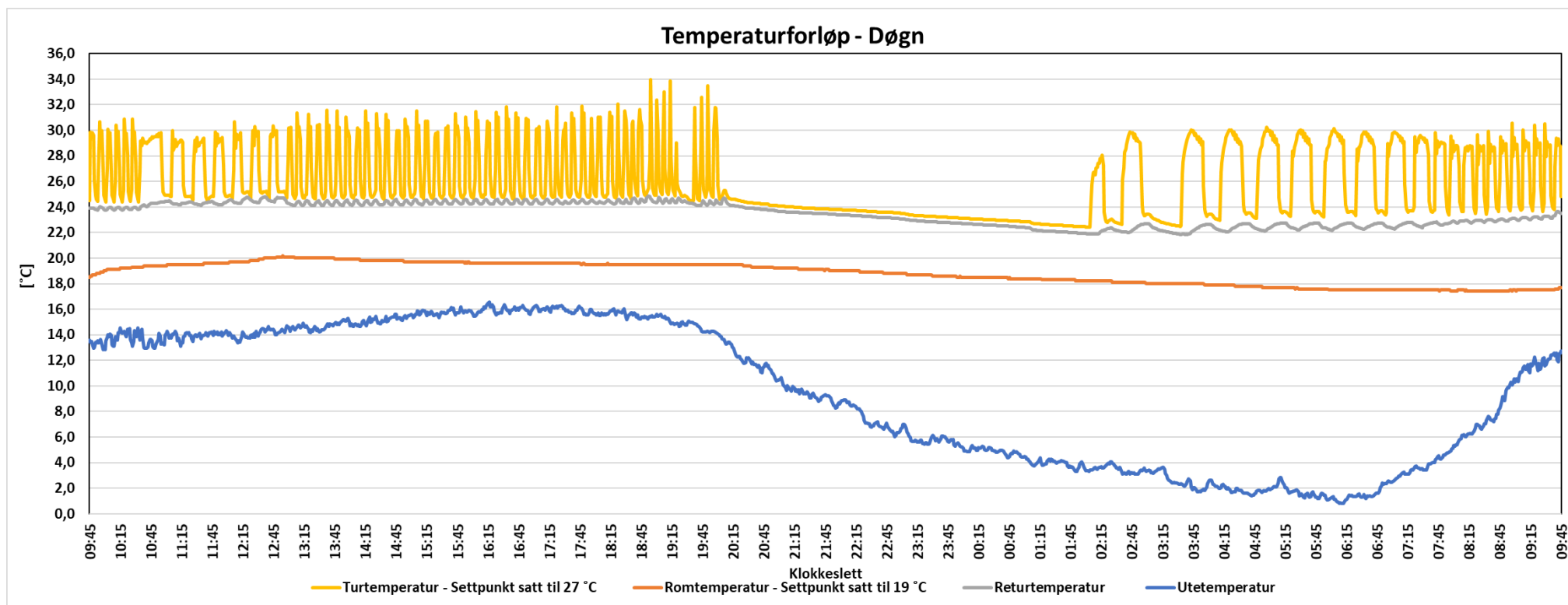
Figur 42: Temperaturforløp gjennom døgnet med settpunkt 28 °C turtemperatur og 20 °C romtemperatur

Figur 42 viser hvordan tur –og returtemperaturen utvikler seg ved settpunkttemperatur satt til 28 °C turtemperatur og romtemperatur i øvrige rom satt til 20 °C. 1 t etter endring av settpunkt oppnås romtemperatures settpunkt på 20 °C og holder seg stabil til nattsenking trer i kraft kl. 20:43. Temperaturen ligger i snitt på 19,6 °C og nattsenking var mellom kl. 20:43 – 02:03. Utetemperaturen var helt opp mot 16 °C denne dagen, og laveste rett under 1 °C. Figur 43 viser enkeltverdier for COP med de blå stablede linjene og områdene uten farge er når kompressor ikke er i drift, som tilsvarer ingen COP – verdi. COP-verdiene var jevnt over 6 i måleperioden.



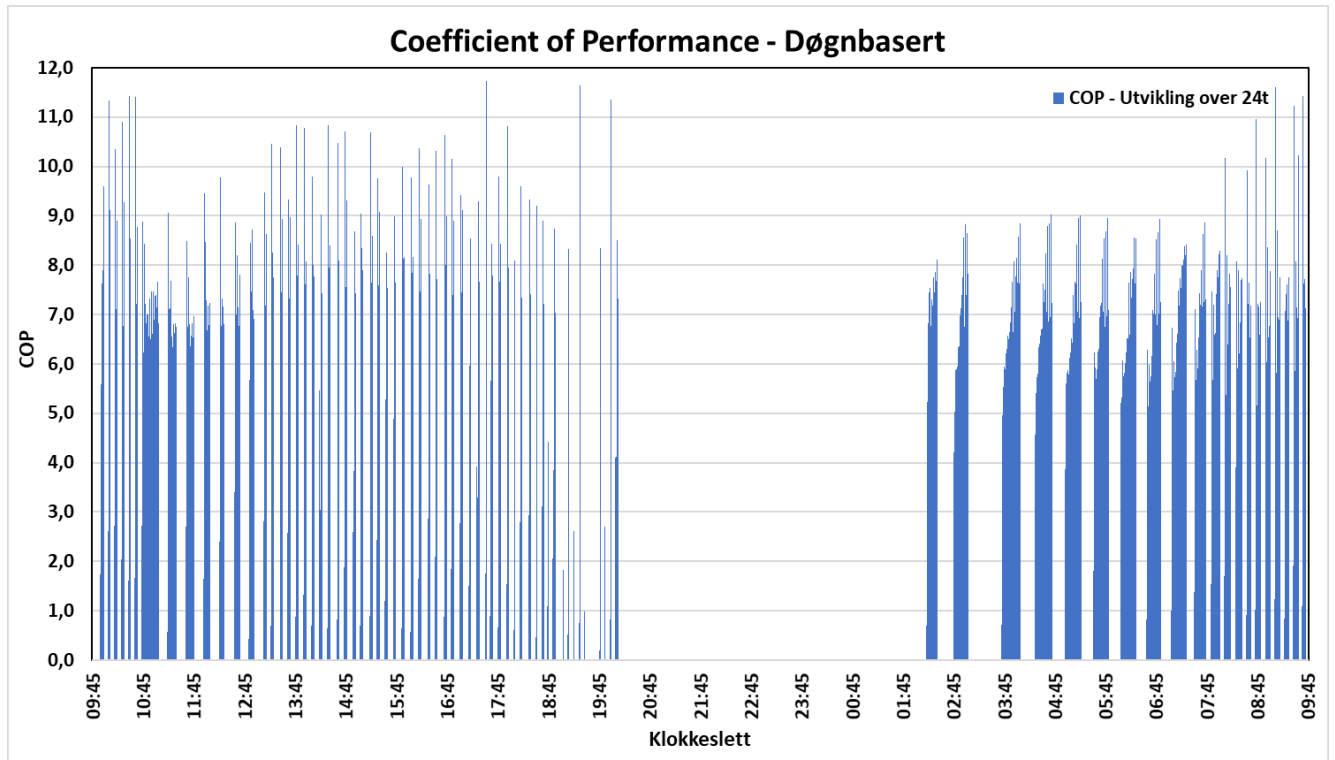
Figur 43: Utvikling av COP over døgnet med settpunkt 28 °C turtemperatur og 20 °C romtemperatur

5.3.4 Måledag 4 – 27 °C turtemperatur baderom og 19 °C øvrige rom



Figur 44: Temperaturforløp gjennom døgnet med settpunkt 27 °C turtemperatur og 19 °C romtemperatur

Figur 44 viser hvordan tur- og returtemperaturen utvikler seg ved settpunkttemperatur satt til 27 °C turtemperatur og romtemperatur i øvrige rom satt til 19 °C. Romtemperaturen oppnår settpunkt på 19 °C ca. 15 min fra endring av settpunkt og opprettholdes til nattsenking starter kl. 20:00. Utetemperaturen varierte her mellom 1 – 16 °C. Figur 45 viser enkeltverdier for COP med de blå stablede linjene og områdene uten farge er når kompressor ikke er i drift, som tilsvarer ingen COP – verdi. COP – verdiene var helt opp mot 11,5 i måleperioden og lå jevnt over 6,0 i snitt.

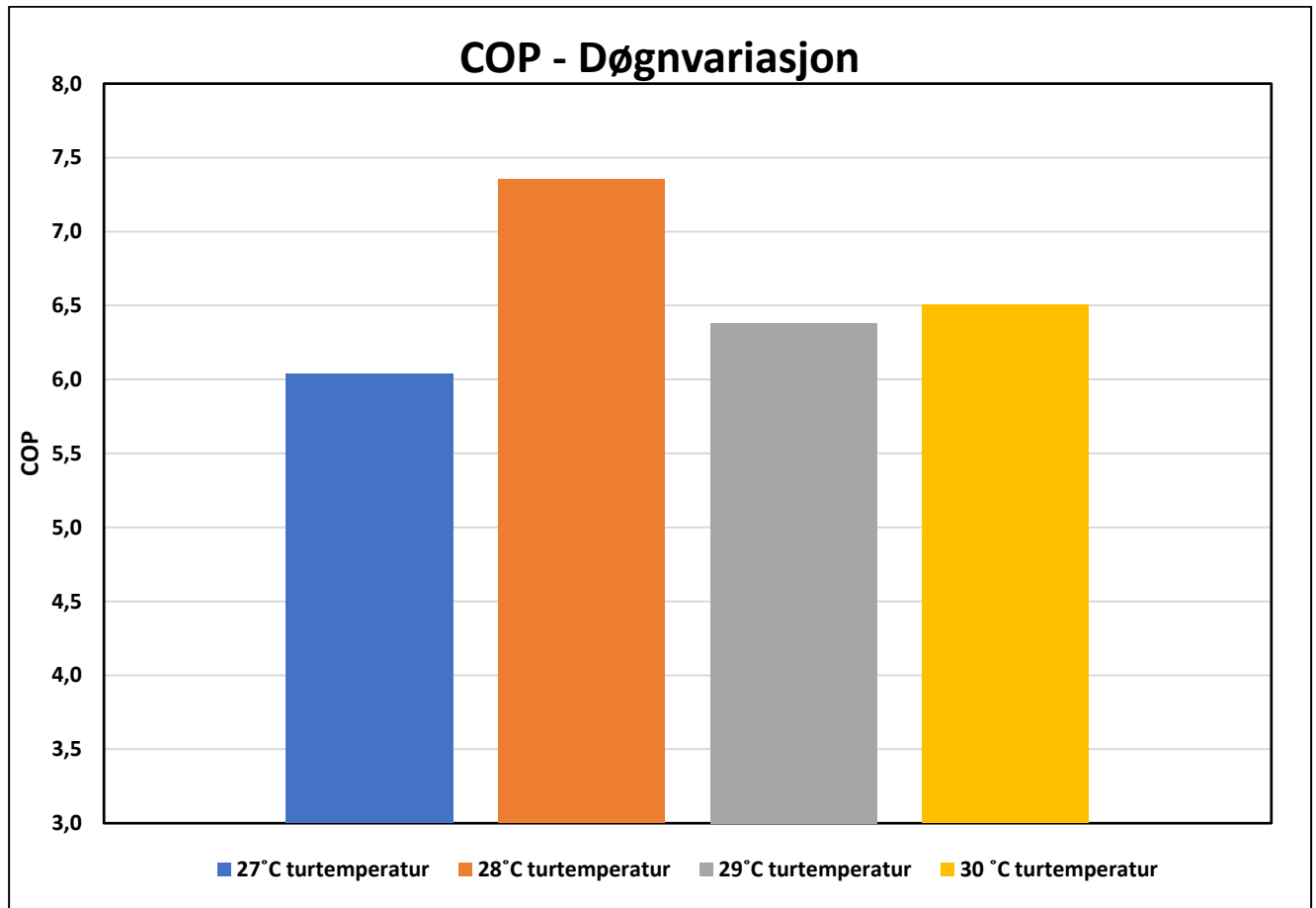


Figur 45: Utvikling av COP over døgnet med settpunkt 27 °C turtemperatur og 19 °C romtemperatur

Figurene som er blitt presentert viser at returtemperaturen øker ved synkende turtemperatur. Dette er naturlig da romtermostaten ble nedjustert én grad for hvert døgn, samt at utetemperaturen var stigende under måleperioden. Dette påvirket driften av varmepumpen ved at når varmebehovet i huset ble mindre ble det hyppigere start/stopp – intervaller i varmepumpen. Dette påvirket igjen turtemperaturen ved at den pendlet mye mellom lav og høy temperatur og slet med å opprettholde settpunkttemperatur ut i systemet. Varmepumpens effektivitet ble da selvsagt påvirket av dette og viser at det er en vedvarende trend at COP synker ved lav $\Delta T_{\text{tur-retur}}$. Dette er ikke normalt sett opp mot termodynamikkens 2. hovedsetningen som sier at ved lavere temperaturdifferanse mellom tur – og returvannet vil det benyttes mindre energi/eksergi som ville gitt økning i COP, men da COP er avhengig av tilført effekt fra kompressor i tillegg til levert effekt er det av interesse å se på akkurat dette elementet for å finne ut hvorfor COP utvikler seg slik det gjør, og vil videre bli analysert i kommende kapittel.

5.3.5 Analyse av COP for romoppvarming

Figur 46 viser samlet COP – verdi gjennom døgnet ved ulike settpunkttemperaturer og viser at samlet COP – verdi for romoppvarming ligger jevnt fra 6,0. Høyeste COP verdi var 7,35 ved settpunkt 28 °C på tur og 20 °C som romtemperatur. Laveste COP – verdi var 6,0 ved 27 °C turtemperatur – og 19 °C romtemperatur.

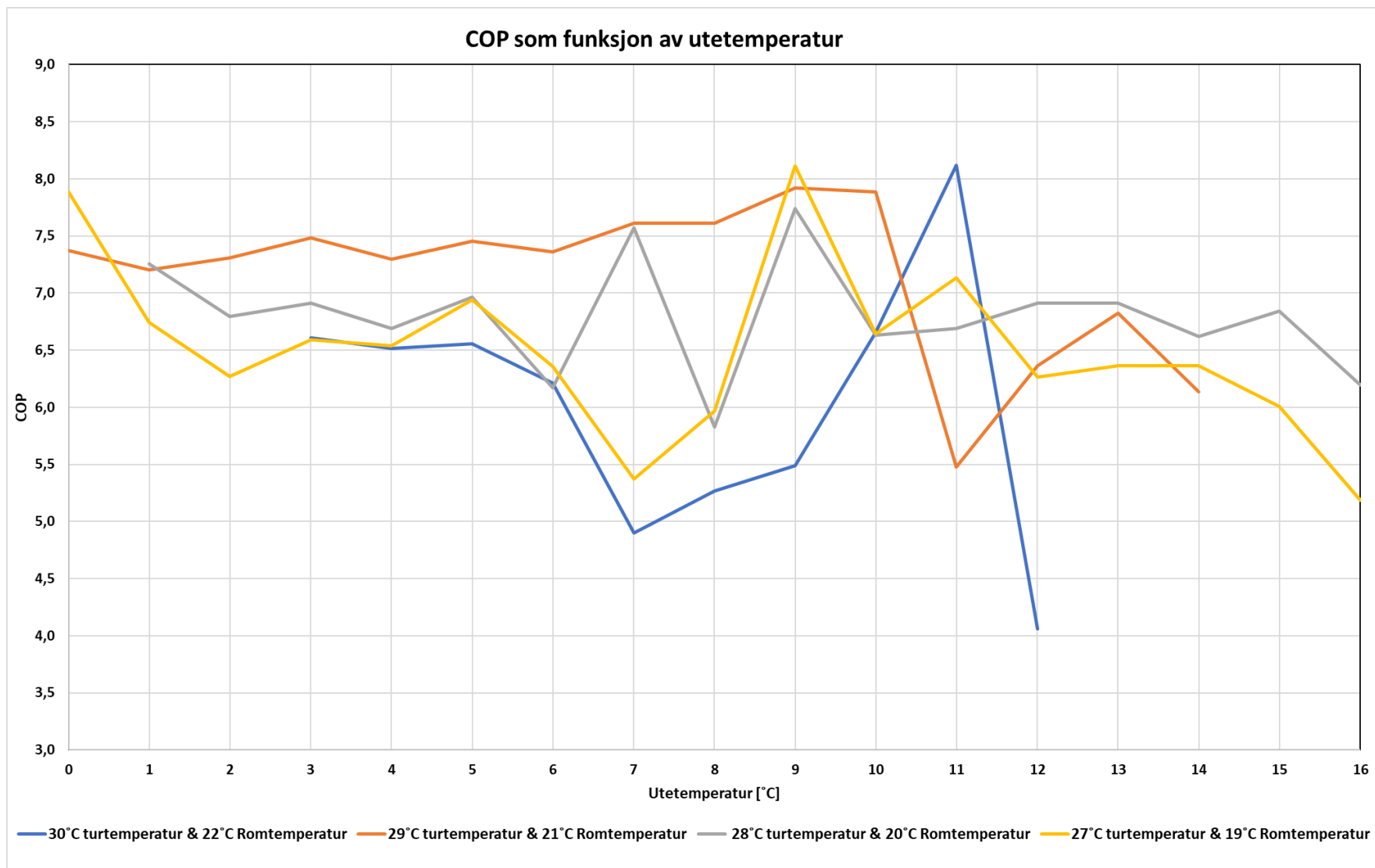


Figur 46: COP ved ulike settpunkttemperaturer

COP som funksjon av utetemperatur

Figur 47 viser hvordan COP utviklet seg med utetemperatur ved ulike settpunkttemperaturer. Utetemperaturen varierte mellom 2 – 12 °C ved settpunkt satt til 30 °C turtemperatur og 22 °C romtemperatur. Ved settpunkt 29 °C turtemperatur og 21 °C romtemperatur varierte utetemperaturen fra 0 – 14 °C i måleperioden. Ved settpunkt 28 °C turtemperatur og 20 °C romtemperatur varierte utetemperaturen fra 1 – 16 °C. Ved settpunkt 27 °C turtemperatur og 19 °C romtemperatur varierte den fra 0 – 16 °C.

Resultatene viser i Figur 47 at varmepumpen ikke er under 4,0 i COP – verdi for romoppvarming ved ulike driftssettpunkt. Ved utetemperatur 7 °C, 11 °C og 12 °C er det størst variasjon i COP ved ulike driftssettpunkt. Høyeste COP på 8,1 oppnås ved turtemperatur 30 °C og 11 °C utetemperatur. Laveste COP på 4,1 oppstår ved turtemperatur 30 °C og utetemperatur 12 °C. Resultatene viser at COP ligger jevnt høyt fra 0 °C til 16 °C, men at COP synker ved stigende utetemperatur, noe som er unormalt slik som nevnt tidligere. Et lavere temperaturløft som skal utføres for varmepumpen skal i teorien resultere i høyere COP. For å gå nærmere inn på hvorfor det er slik er det sett nærmere på tur –og returtemperatur, kompressoreffekt og levert effekt i kommende avsnitt.

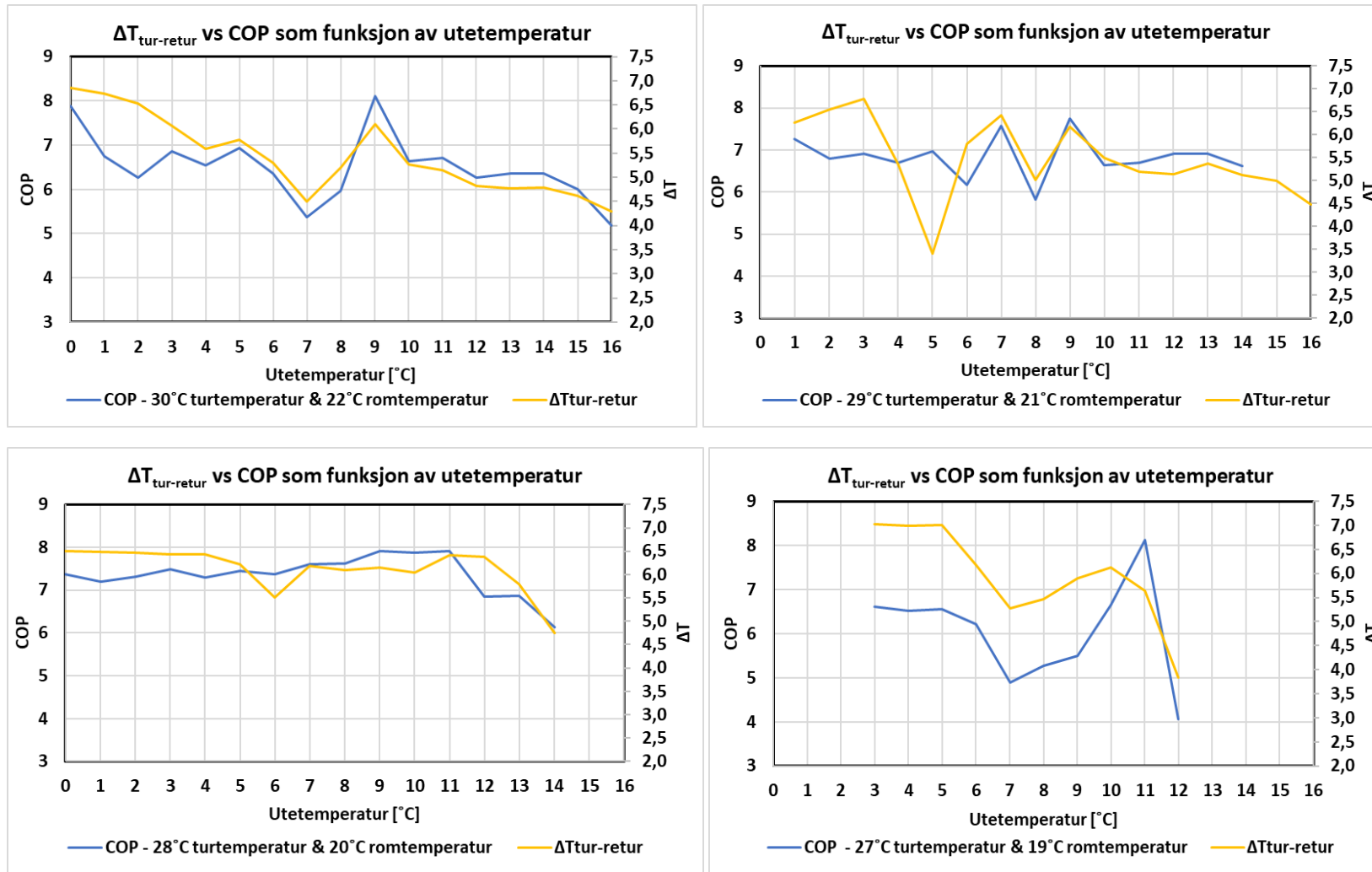


Figur 47: COP som funksjon av utetemperatur ved ulike settpunkttemperaturer

Analyse av tur- og returtemperatur for romoppvarming

Figur 48 viser hvordan COP og $\Delta T_{\text{tur-retur}}$ utvikler seg ved ulike utetemperaturer ved forskjellige settpunkt. Figurene viser en klar sammenheng med at økt temperaturredifferanse mellom tur –og returtemperatur vil gi økt COP, som betyr at ved økt varmeleveranse vil en få økning i COP – verdi. Lav returtemperaturen inn på gasskjøler for romoppvarming er gunstig for driften av CO₂ – varmepumpen da lave returtemperatur gir høy COP. Returtemperaturen fra gulvvarmesløyvene til badrom blir utnyttet som turtemperatur i de øvrige rommene i huset som tidligere beskrevet. Dette betyr at gulvvarmekursen for øvrige rom er koblet i serie med de to badromkursene i huset. Ved å ha en todelt – seriekoblet kurs gjør det at samlet returtemperatur tilbake til varmepumpen i teorien vil være lavere enn konvensjonelle varmepumper. På bakgrunn av dette ser en ut fra Figur 48 at $\Delta T_{\text{tur-retur}}$ nesten aldri er mindre enn 4,5 K. Dette viser at varmepumpeenheten som er laget for å levere lavest mulig returtemperatur vil fungere godt i praksis ved å sørge for høy $\Delta T_{\text{tur-retur}}$ og lave returtemperaturer helt ned mot 22 °C (se figur 38, 40, 42 og 44 fra de ulike måledagene). Figurene som nevnt viser at returtemperaturen er jevn lav over døgnet. Figurene viser at ved 5 °C utetemperatur vil $\Delta T_{\text{tur-retur}}$ være helt ned mot 3,5 K, mens det jevnt over er 4,0 K temperaturredifferanse ved andre utetemperaturer.

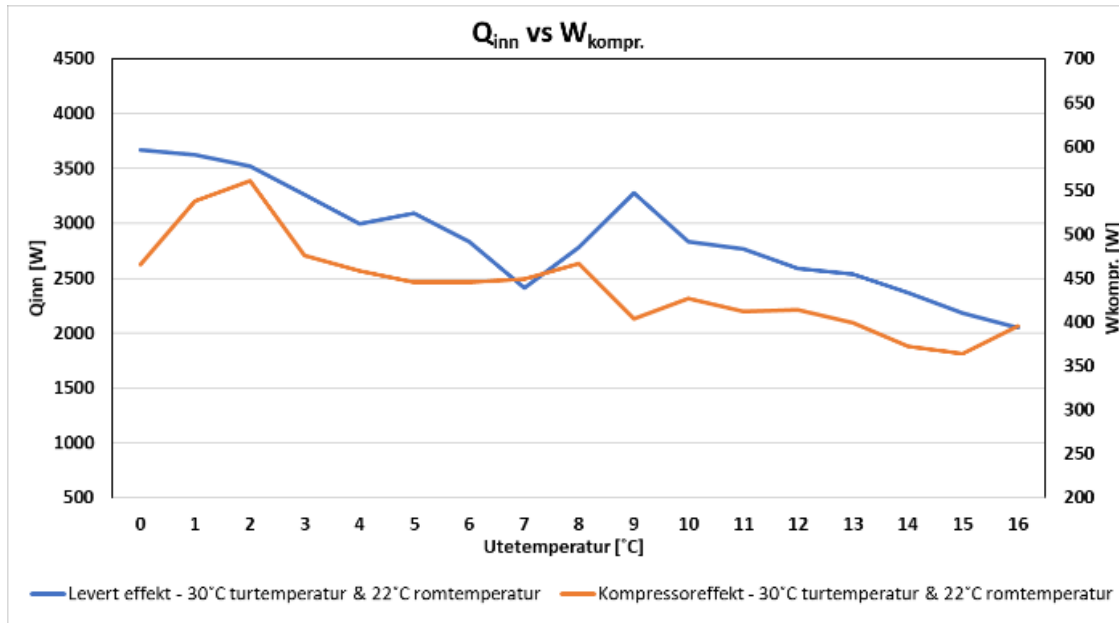
Resultatet viser at ved lave utetemperaturer og høye $\Delta T_{\text{tur-retur}}$ vil resultere i høy COP – verdi. Da det er uvanlig at COP skal synke ved lavere temperaturredifferanse mellom tur –og returtemperatur er det sett nærmere på hvordan levert effekt og kompressoreffekt ved de ulike måledagene har utviklet seg ved ulike utetemperaturer og tur –og returtemperaturer for å få en forklaring på hvorfor resultatene er slik.



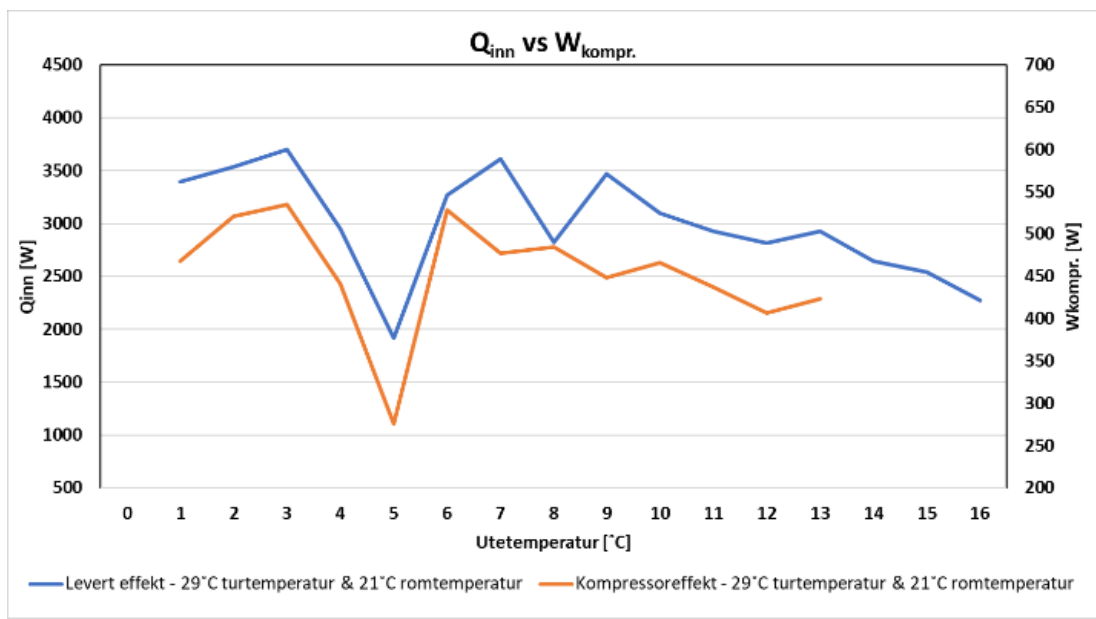
Figur 48: $\Delta T_{tur-retur}$ vs. COP som funksjon av utetemperatur ved ulike settpunkttemperaturer

Analyse av Levert effekt vs. Kompressoreffekt

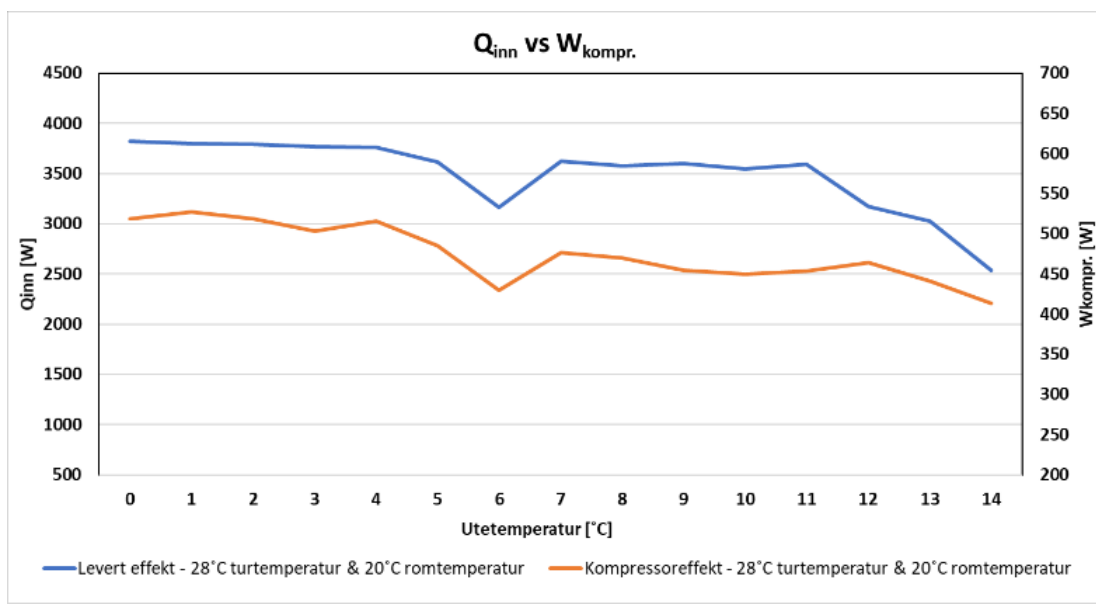
Figur 49 – 52 viser hvordan levert effekt og kompressoreffekt utvikler seg ved de ulike måledagene. Primæraksen (y-akse) viser levert effekt og sekundærakse (y-akse) viser kompressoreffekt. En ser at kompressoreffekt og levert effekt har en nedadgående trendlinje ved økt utetemperatur, men med noen unntak. Levert effekt synker ved økte utetemperaturer som er naturlig å forvente, noe også kompressoreffekt gjør. Det er dog av interesse å se nærmere på hvor mye de respektive parameterne endres sammenlignet opp mot hverandre.



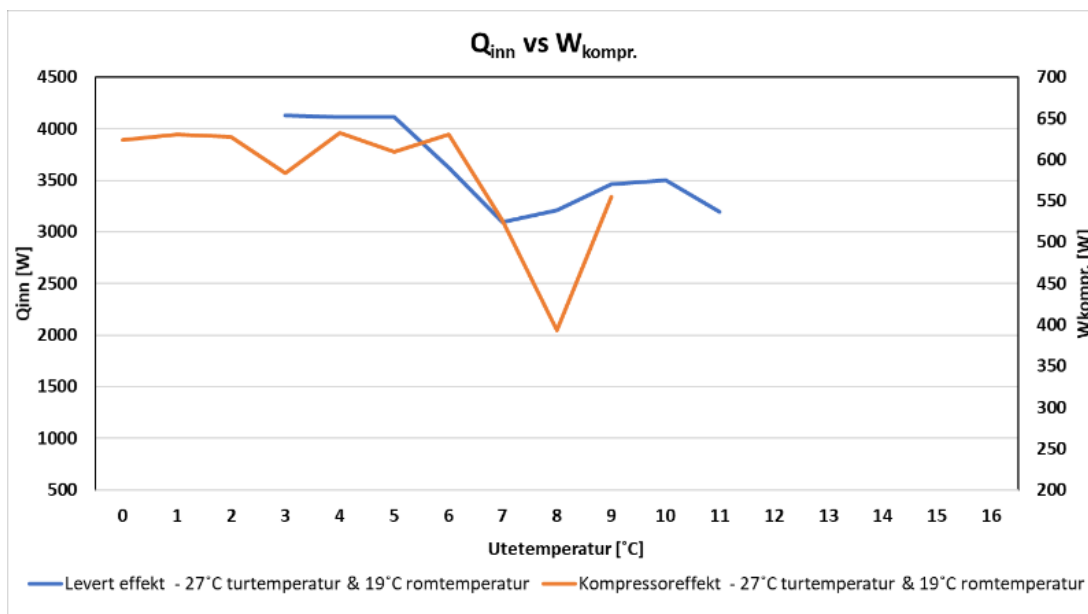
Figur 49: Levert effekt vs. kompressoreffekt ved ulike utetemperatur



Figur 50: Levert effekt vs. kompressoreffekt ved ulike utetemperatur



Figur 51: Levert effekt vs. kompressoreffekt ved ulike utetemperatur



Figur 52: Levert effekt vs. kompressoreffekt ved ulike utetemperatur

Tabell 31 tar for seg eksempelberegning ved to tilnærmet like forhold, der de eneste merkbare endringsvariablene er turtemperatur og kompressoreffekt. Systemets settpunkt er 30 °C turtemperatur og 22 °C romtemperatur i dette tilfellet. Det er tatt ut to verdier til sammenligning der scenario 1 viser til turtemperatur tilnærmet likt satt settpunkt og scenario 2 viser til turtemperatur 1 K under satt settpunkt. Formel (17) og (18) viser hvordan den prosentvise endringen blir beregnet.

Tabell 31: Eksempelberegning av kompressoreffekt og levert effekt

Parameter	Scenario 1	Scenario 2
T_{ute} [°C]	10,1	10,1
$T_{fordamper}$ [°C]	-12,7	-10,9
T_{rom} [°C]	20,7	20,7
T_{tur} [°C]	28,71	29,68
T_{retur} [°C]	23,51	23,45
$\Delta T_{tur-retur}$ [K]	5,2	6,2
\dot{V} [l/min]	8,43	8,42
Q_{inn} [W]	3056	3635
$W_{kompressor}$ [W]	781	584

$$\% - \text{endring} = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} \times 100\% = 16\% \quad (17)$$

$$\% - \text{endring} = \frac{W_{kompr,2} - W_{kompr,1}}{W_{kompr,2}} \times 100\% = 33\% \quad (18)$$

Beregningen viser til at kompressoreffekt har en større prosentvis endring enn levert effekt. Resultatet viser en klar trendlinje på at lav $\Delta T_{\text{tur-retur}}$ og økende kompressoreffekt vil gi nedadgående trend i COP – verdi. Det samme gjelder ved økt utetemperatur. Beregningen viser at kompressoreffekt har størst prosentvis endring versus levert effekt og er hovedårsak til synkende COP ved lavere $\Delta T_{\text{tur-retur}}$.

En nærmere beskrivelse på hvorfor det er slik kan forklares ved at når varmepumpen ikke klarer å opprettholde satt turtemperatur i systemet vil $\Delta T_{\text{tur-retur}}$ synke. Kompressoreffekt vil da øke grunnet det leveres for lav turtemperatur ut i systemet som fører til at kompressor vil øke momentant ved for lav levert turtemperatur for å sikre at turtemperaturen blir justert tilbake til ønsket settpunkt.

Ved nærmere analyse av hvorfor COP synker ved økende utetemperatur kan det forklares slik at ved økte utetemperaturer vil kompressor ha hyppig start/stopp – intervaller grunnet varmebehovet er lavt. Dette gjør at kompressoreffekten vil være høy første minuttet den starter opp. Turtemperaturen vil da også bruke ca. 1 min på å heve seg til satt turtemperatur, som vil sørge for at levert effekt er lavere første minuttet grunnet $\Delta T_{\text{tur-retur}}$ er lavere. Dette vil føre til at den samlede COP – verdien gjennom døgnet vil bli påvirket i større grad ved høye utetemperaturer, da kompressor vil ha hyppigere start/stopp – intervaller grunnet varmebehovet da er mindre. Resultatet av dette er at turtemperatur og $W_{\text{kompr.}}$ ikke klarer å stabilisere seg før etter ca. 1 min. En annen faktor på hvorfor COP synker ved økt utetemperatur er at når kompressor går på lavt turtall ved liten belastning vil motoreffektiviteten i kompressoren bli dårligere som vil gi nedgang i COP – verdi.

En samlet forklaring på hvorfor systemet operer slik er at når turtemperatur oppnår settpunkt temperatur + 1 K og den ikke klarer å komme under denne temperatur ved å gire ned vil kompressor slå seg av og stille seg i stand – by modus. Når turtemperatur synker under settpunkt –1 K vil så kompressor starte igjen. Resultatet er da hyppig start/stopp av kompressor, som gjør at kompressoren må yte ekstra. Dette vil utgjøre en prosentvis høyere andel enn levert effekt til sammenligning ved beregning av COP. COP øker derfor ved økte utetemperaturer og $\Delta T_{\text{tur-retur}}$ i varmesystemet. Maskinen skjønner ikke da at den må vente med å starte etter at den har oppnådd ønsket temperatur – noe som resulterer i at kompressor ikke klarer å gire seg langt nok ned for å holde settpunkttemperatur, dvs. at den forblir i en for høy temperatursone. Slik styringssystemet var på det tidspunktet ville den leste turtemperatur

synke til returtemperatur nivå, noe som gjorde at maskinen trodde det var et varmebehov. Den starter da opp igjen før den raskt kom opp i «overtemperatur» igjen.

6 Konklusjon

«Vil den nyutviklede inneklimasentralen klare å oppnå like god effektivitet og sørge for god komfort sammenlignet med konvensjonelle luft til vann –varmepumper?»

Konklusjon - Termisk komfort

Resultatene viser at systemet gir god termisk komfort ved endret settpunkttemperatur rundt parametere som operativ temperatur, lufthastighet og relativ luftfuktighet. Den termiske komforten som helhet på kroppen vil være mindre tilfredsstillende, men på bakgrunn av at det er et nytt bolighus der treghet i regulering av varme på grunn av fukt i betongen kan påvirke avgitt varmeeffekt fra gulvvarmerørene, er det ikke god nok grunn til å konkludere med at denne type oppbygning av distribusjonssystem gir mindre akseptabel komfort for kroppen som helhet enn konvensjonelle parallellkoblede gulvvarmesystem. Termisk komfort som helhet blir derfor ansett som akseptabel i henhold til anbefalte krav i Byggteknisk forskrift.

Ved endring av settpunkttemperatur var COP for romoppvarming generelt høy og oppnådde høyeste COP – verdi på 5,7 ved settpunkt 30 °C turtemperatur og 22 °C romtemperatur. COP – verdien varierte mellom 2,9 – 5,7 ved variasjon fra 27 – 30 °C turtemperatur og 19 – 22 °C romtemperatursettpunkt.

Konklusjon - Varmepumpeenhet

Romtemperaturen klarte å oppnå sitt romtemperatursettpunkt for henholdsvis 19 °C og 20 °C, men slet med å opprettholde temperaturen ved høyere settpunkt på romtemperatur (21 °C og 22 °C). Turtemperaturen pendlet mye mellom lav og høy temperatur og slet med å opprettholde settpunkttemperatur i systemet. Tatt dette i betraktning klarte distribusjonssystemet å levere nok varme etter ønsket settpunkt ved romtermostat satt til 19 °C & 20 °C, noe den også klarer ved 21 °C, men over en kort tidsperiode. Ved romtemperatursettpunkt satt til 22 °C klarte ikke varmepumpen å sørge for nok varme til ønsket settpunkt, her klarte ikke systemet å oppnå høyere enn 20,4 °C. Samlet vil enheten klare å levere stabil temperatur til oppholdsrom ved ulike settpunkttemperaturer når disse er koblet i serie med baderom, ved unntak av settpunkt satt til 21 °C & 22 °C romtemperatur og 30 °C og 29 °C turtemperatur.

Det integrerte systemet vil i praksis klare å levere lave returtemperaturer og gi høy temperaturdifferanse mellom tur –og returvannet. Dette sørger for god varmeutnyttelse rundt i distribusjonssystemet før det blir levert tilbake til varmepumpen. Resultatene viser at effekt faktoren har en nedadgående trend ved økte utetemperaturer. Dette grunnet systemet slår seg PÅ/AV i korte intervaller ved lavt varmebehov og vil påvirke COP – verdien fra første minutt ved oppstart, noe som vil kunne gi en gjennomsnittlig lavere COP ved høyere utetemperatur sett over en tidsperiode på 96 t. Kompressoreffekten utgjør størst prosentvis endring sammenlignet med levert effekt til romoppvarming og er hovedårsak til synkende COP ved lavere $\Delta T_{\text{tur-retur}}$ og økte utetemperaturer.

Effektiviteten til varmepumpen er generelt høyere enn konvensjonelle luft til vann – varmepumper. COP – verdiene ligger i området 6,0 – 7,35 under ulike settpunkt for tur –og romtemperaturer og ligger høyest ved settpunkt 28 °C turtemperatur og 20 °C romtemperatur. Sammenlignet med tradisjonelle varmepumper der COP – verdien ligger mellom 2 – 4 for luft til – vann varmepumper og hvis en sammenligner verdier fra tidligere forskning på CO₂ – varmepumper, er dette særs gode verdier. På bakgrunn av feltmålinger som er blitt utført og resultatene vil denne varmepumpen være foretrukket til bruk i bolighus ved de gitte utetemperaturer som den er blitt testet for, men en videre analyse av varmepumpen er anbefalt ved å se på systemet som helhet.

7 Forslag til videreføring av arbeid

- Hvordan vil varmepumpens effektivitet utvikle seg under 0 °C utetemperatur?
- Hvordan vil varmepumpens effektivitet være ved dagdrift - og nattdrift kombinert.
- Hvor høyt varmetap vil det være fra bygningskropp og ventilasjon ved et slikt system installert i et bolighus bygget etter TEK17.
- Analyse av årsvarmefaktor(SFP) ved denne type varmepumpeenhet.
- En dypere analyse av hvordan ventilasjonen fungerer ved Isolve Air.
- En dypere analyse av varmeeffekt opp fra gulv sett opp mot termisk treghet for videre analyse av et distribusjonssystem som er koblet i serie med baderomskursen.

8 Referanser

- Arefeh Hesarakhi, A. P., Sture Holmberg,. (2015). Integrating Low-temperature Heating Systems into Energy Efficient Buildings. *Energy Procedia*, 78, 3043 - 3048.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.720>
- Babiak, J., Wilkens Olesen, B. & Petras, D. (2009). *Low temperature heating and high temperature cooling : embedded water based surface heating and cooling systems* (2nd rev. ed. utg., Bd. no. 7). REHVA.
- Becher, R., Øvrevik, J., Høie, A. H., Bakke, J. V. & Holøs, S. (2016). *Fukt og fuktskader i norske boliger*. Folkehelseinstituttet.
<https://www.fhi.no/contentassets/1b5dec5e29ce4bfb8fc51e89076e60b3/fukt-og-fuktskader-i-norske-boliger.pdf>
- Bitjungle. (2010). *Fasediagram for CO2 (karbondioksid)*. X-akse er temperatur i Kelvin; Y-akse er trykk i bar. Wikipedia, Wikimedia Commons.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Karbondioksid_trykk-temperatur_fasediagram.svg
- Bjørn-Roar Krog, Ernst Petter Axelsen & Gundersen, P. (2003). *Vannbårne lavtemperatursystemer kombinert med ventilasjon i bygninger* (357-2003). S. Byggforsk.
https://www.sintefbok.no/book/index/154/vannbaarne_lavtemperatursystemer_kombinert_med_ventilasjon_i_bygninger
- bp Statistical Review of World Energy 2020. (2020). *Statistical Review of World Energy*.
<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- Çengel, Y. A., Boles, M. A. & Kanoğlu, M. (2015a). Exergy. I *Thermodynamics : an engineering approach* (8th ed. in SI units. utg., s. 421-484). Mc-Graw-Hill.
- Çengel, Y. A., Boles, M. A. & Kanoğlu, M. (2015b). Introduction and basic concepts. I *Thermodynamics : an engineering approach* (8th ed. in SI units. utg., s. 1-50). Mc-Graw-Hill.
- Delphin, I. L. A. (2018). anergi. I *Store norske leksikon* (25. september 2018. utg.).
<https://snl.no/anergi>
- DIBK. (2017a). *Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning* Kapittel 1-Felles bestemmelser §1-3.Definisjoner (§ 1-3). Direktorat for byggkvalitet.
<https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/1/1-3/#49981-heading>
- DIBK. (2017b). *Krav til energieffektivitet* (§ 14-2(1)). Direktorat for byggkvalitet.
<https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/14/14-2/>
- DIBK. (2017c). *Minimumskrav til energieffektivitet* (§ 14-3(1)). Direktorat for byggkvalitet.
<https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/14/14-3/>
- DIBK. (2017d). *Termisk Inn klima* (§ 13-4). Direktorat for byggkvalitet.
<https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/13/ii/13-4/>
- DIBK. (2017e). *Ventilasjon i boligbygning* (§ 13-2). Direktorat for byggkvalitet.
<https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/13/i/13-2/>
- Forrest Meggers, V. R., Philippe Goffin, Marc Baetschmann, Hansjürg Leibundgut. (2012). Low exergy building systems implementation. *Energy*, 41(1), 48 - 55.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.031>
- Hepbasli, A. (2012). Low exergy (LowEx) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 73 - 104.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.138>

- Holøs, S. & Segtnan, I. L. (2016). *Godt inneklima i nye boliger* (421.510). S. Byggforsk. https://www.byggforsk.no/dokument/197/godt_inneklima_i_nye_boliger#i21
- Haakon Haraldsen, B. P. (2021). Karbondioksid. I *Store Norske Leksikon*. Hentet 29.mars 2021 fra <https://snl.no/karbondioksid>
- Industrial heat pumps. (2021, 25.01.2021). *Transcritical CO2 heat pump*. de kleijn energy consultants & engineers. https://industrialheatpumps.nl/en/how_it_works/transcritical_co2_heat_pump/
- Ingebrigtsen, S. (2019). Inneklima. I *Ventilasjonsteknikk : del I* (s. 82-125). VVS-foreningen/Nemitek.
- Linda P. Haugerud, I. L. (2015). *Analyse av feltmålinger av varmepumper i boliger*. Norsk Energi www.enova.no
- Michiyuki, S. & Shigeru, K. (2016). Thermodynamic analysis of vapor compression heat pump cycle for tap water heating and development of CO2 heat pump water heater for residential use. *Applied Thermal Engineering*, 106, 1236-1243. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.105>
- Middleton, F. (2019, June 26,2020). *Reliability vs Validity: what`s the difference?* Scribbr. <https://www.scribbr.com/methodology/reliability-vs-validity/>
- Mysen, M. & Segtnan, I. L. (2017). *Termisk inneklima. Betingelser, tilrettelegging og målinger* (421.501). S. Byggforsk. https://www.byggforsk.no/dokument/193/termisk_inneklima_betingelser_tilrettelegging_og_maalinger#i22
- Nasjonalt Folkehelseinstitutt. (2015). *Anbefalte faglige normer for inneklima, Revisjon av kunnskapsgrunnlag og normer - 2015* (2015:1). Nasjonalt Folkehelseinstitutt.
- Nicholas Clements, M. J. B., Véronique L. Roger,. (2020). Indoor Environment and Viral Infections. *Mayo Clinic Proceedings*, 95(8), 1581 - 1583. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2020.05.028>
- Nydal, R. (2013a). Kuldeteknisk Anlegg. I *Praktisk kuldeteknikk : grunnleggende varmepumpeteknologi* (6. utg. utg., s. 44-57). Roald Nydal.
- Nydal, R. (2013b). Spesielle Kuldetekniske Anlegg. I *Praktisk kuldeteknikk : grunnleggende varmepumpeteknologi* (6. utg. utg., s. 181-187). Roald Nydal.
- Petr, O., Anatolijs, B. & Ksenia, S. (2017). Utilization potential of low temperature hydronic space heating systems: A comparative review. *Building and Environment*, 112, 88-98. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.029>
- Redko, A., Redko, O. & DiPippo, R. (2020a). *Low-temperature energy systems with applications of renewable energy*. Academic Press.
- Redko, A., Redko, O. & DiPippo, R. (2020b). Principles and operation of refrigeration and heat pump systems. I A. Redko, O. Redko & R. DiPippo (Red.), *Low-Temperature Energy Systems with Applications of Renewable Energy* (s. 1-45). Academic Press.
- Richter, M. R., Song, S. M., Yin, J. M., Kim, M. H., Bullard, C. W. & Hrnjak, P. S. (2003). Experimental results of transcritical CO2 heat pump for residential application. *Energy*, 28(10), 1005-1019. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(03\)00065-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00065-3)
- Sintef & Norges teknisk-naturvitenskapelige, u. (2007a). Kapittel 4 - Innemiljø. I *ENØK i bygninger : effektiv energibruk* (3. utg. utg., s. 99-136). Gyldendal undervisning.
- Sintef & Norges teknisk-naturvitenskapelige, u. (2007b). Kapittel 8 - Måleteknikk og instrumentering. I *ENØK i bygninger : effektiv energibruk* (3. utg. utg., s. 363-380). Gyldendal undervisning.
- Standard Norge. (2001). *Ergonomi for termisk miljø - Instrumenter for måling av fysiske størrelser (ISO 7726:1998)* (NS-EN ISO 7726). S. Norge. <https://www-standard->

- [no.ezproxy.oslomet.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=145354](https://www.standard-no.ezproxy.oslomet.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=145354)
- Standard Norge. (2005). *Ergonomi i termisk miljø: Analytisk bestemmelse og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD-indeks og lokal termisk komfort (ISO 7730:2005) (NS-EN ISO 7730)*. S. Norge. <https://www.standard-no.ezproxy.oslomet.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=158329>
- Standard Norge. (2020). *Veiledning for vannbåren gulvvarme i boliger og næringsbygg (NS-EN 1264, del 1 til 5)*. S. Norge. <https://www.armaturjonsson.no/media/622692/veiledning-for-vannba-ren-gulvvarme-2020.pdf>
- Stene, J. (2004). *Residential CO2 Heat Pump System for Combined Space Heating and Hot Water Heating* [Doctoral thesis, Norwegian University of Science and Technology]. NTNU Open. NTNU
<http://hdl.handle.net/11250/233381>
- Stene, J. (2008, 2-3.april). *CO2 Heat Pump System for Space Heating and Hot Water Heating in Low-Energy Houses and Passive Houses*. Passivhus NORDEN 2008, Trondheim. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.473.9802&rep=rep1&type=pdf>
- Stene, J. & Chr.Krohn, J. (2009). *Varmepumper i bygninger. Funksjonsbeskrivelse (552.403)*. SINTEF Byggforsk. https://www.byggforsk.no/dokument/541/varmepumper_i_bygninger_funksjonsbeskrivelse
- Stene, J. & Chr.Krohn, J. (2010). *Romoppvarming av boliger. Prinsipper og systemer (552.102)*. SINTEF Byggforsk. https://www.byggforsk.no/dokument/518/romoppvarming_av_boliger_prinsipper_og_systemer#i13
- Stråby, K. & Aasbø, S. (2020). *Vannbårent gulvvarme. Rørsystem og Dimensjonering (552.111)*. SINTEF Byggforsk. https://www.byggforsk.no/dokument/522/vannbaaret_gulvvarme_roersystem_og_dimensjonering
- United Nations Environment Programme. (2020). *2020 Global Status Report for Building and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. <https://globalabc.org/news/launched-2020-global-status-report-buildings-and-construction>
- Yi Jiang, X. L., Lun Zhang, Tao Zhang,. (2015). High Temperature Cooling and Low Temperature Heating in Buildings of EBC Annex 59. *Energy Procedia*, 78, 2433 - 2438. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.222>
- Zhihua, W., Fenghao, W., Zhenjun, M., Wenye, L. & Haoshan, R. (2019). Investigation on the feasibility and performance of transcritical CO2 heat pump integrated with thermal energy storage for space heating. *Renewable Energy*, 134, 496-508. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.035>

9 Vedlegg

Vedlegg A – Teknisk datablad Isolve

Vedlegg B – Teknisk datablad Carel thT

Vedlegg C – Teknisk datablad Swema 05 – Black Globe

Vedlegg D – Teknisk datablad HC2A-S -Relativ fuktighetssensor

Vedlegg E – Swema 03 – Draught sensor for lufthastighet og temperatur

Vedlegg F – Model 8375 Accubalance – måletrakt

Vedlegg G – Varmepumpens moduler med respektive mål

Vedlegg H – Plantegning 1.etg & 2.etg

Vedlegg I – Energiberegning: TEK-Sjekk (TEK17 Fullstendig kontroll beregning)

Vedlegg J – Krav til boligbygning – Byggteknisk forskrift (TEK17)

Vedlegg K – Eksempel på analyse av termisk komfort i Excel

Vedlegg L – Formler benyttet i Excel for analyse av varmepumpeenhet

Vedlegg M – Eksempel: Kompressoreffekt og levert effekt til romoppvarming som funksjon av utetemperatur

Vedlegg N – Eksempel: Tur-returtemperatur som funksjon av utetemperatur og kompressoreffekt

Vedlegg O – Luftmengdemåling

Vedlegg P – Luftmengdemåling med formeloppbygning i Excel

Vedlegg Q – Resultat fra testmåling: Termisk komfort

Vedlegg R – Resultater fra termisk komfort rigg

Vedlegg A – Teknisk datablad ISOLVE



Isolve Air T

Tekniske data pr 21. januar, 2019

Tappevann				
Forbruksprofil varmtvann	EN16147	XL		
Forbruksprofil varmtvann og romoppvarming	EN16147	L		
Tank volum	Liter	340		
Tappevann oppvarming 7–65 °C ved + 7 °C utendørs	Watt	2350		
	COP	3.7		
Tappevann oppvarming 7–65 °C ved – 7 °C utendørs	Watt	2500		
	COP	3.2		
Varmtvann 7–65 °C og isvannproduksjon	Watt	2400		
	COP	4.2		
Energiklasse		A++		
Romoppvarming (P design heating) ved –10 °C utendørs	Watt	3000		
Sesongvektet COP i Varm/Medium/Kald klima sone. Kombineret drift; varmtvann og rom oppvarming	SCOP	V	M	K
		4.5	4.4	4.1
Årlig energibesparelse	Watt	5040	7876	10231
Ytelise, kun romoppvarming L+7N 35 °C	Watt	3000		
	COP	2.8		
Energiklasse		A+++		
Støynivå				
Standard for støymåling; EN12102	dB(A)	47		
Balansert ventilasjon				
Luftvolum	m³/h	100 – 370		
Varmegjenvinning	%	80		
Maksimum kjøleeffekt ved 180 m³/t	Watt	1500		
Mål/Vekt				
Dimensjoner Isolve Air, bredde x dybde x høyde	mm	1004 x 570 x 2080		
Dimensjoner varmtvannstank, diameter x høyde	mm	590 x 1900		
Isolve Air system (tomt)	kg	240		
- Ventilasjonsmodul	kg	90		
- Varmepumpe- og energilagermodul	kg	150		
Varmtvannstank	kg	40		
Luftkanaler; tilluft – fraluft – utendørs luft – avkast luft	mm	160 – 160 – 200 – 200		
Kuldemedium R744 (CO ₂)	kg	1.7		
CO ₂ ekvivalent (Global Warming Potential)	GWP	1		
Elektrisitet				
Spennning	Volt	230 V – 50 Hz		
Minimum sikringskapasitet	Amp	16		
Maksimum effekt brukt av varmepumpen	Watt	1800		
Back-up element i varmtvannstank (separat krets, separate kontakt)	Watt	2000		

Med forbehold om endringer. Testet ved Sintef Byggforsk i henhold til EN14511/14625

Vedlegg B – Teknisk datablad Carel thT

1.3 Technical specifications

Power supply	From 85 to 260 Vac, 50/60 Hz
Power consumption	2 VA
Operating Conditions	0 up to +45 °C 5% up to 90% rH
Storage conditions	-10 up to +55 °C 5% up to 90% rH
Index of protection	IP 20
Display	LCD (white backlight)
Temperature value displayed	-10 ÷ 60 °C -> ± 0,1 K
Precision of temperature measurement	0 up to 45 °C -> ± 0,5 K
Precision of humidity measurement	20 to 80% rH: ±5% rH
Current load relay	Max 5 A (Resistive) / 2 A (Inductive)
Norm	according to EN60730 – Category II REACH Compliant RoHS Compliant
Data stored	3 years
Type of relay	SPDT (N.O / N.C.)
Voltage relay	230 Vac

Vedlegg C – Swema 05 – Black Globe

Black globe:	0...50°C
	Pt-100
	4-wire
	2 m cable
	Ø 150 mm
rod:	200mm long Ø 10mm
	Uncertainty
	(95% coverage probability)
0-50°C:	±0,1°C
Sampling frequency:	Recommended 10Hz (up to 100Hz with USB possible on some PC-installations.)

Vedlegg D – HC2A-S -Relativ fuktighetssensor

Measuring range:	
Humidity:	0...100% RH
Temperature:	-50...100°C
	-40...+60°C with Swema 3000/md/mdH+
Accuracy:	
	± 0,8%RH at 10- 30°
	and ± 0,1K at 10- 30°
	Digital output
Analogue output:	
	0...100% RH = 0...1,0V
	-40...+60 °C = 0...+1,0V
	Supply voltage
	3,3...5 VDC
	L = 108 mm
	Ø = 15 mm

Vedlegg E – Swema 03 – Draught sensor for lufthastighet og temperatur

Measuring range:

Air velocity: 0.05- 3.00 m/s at 15...30°C

Temperature: 10...40°C

Measurement uncertainty:

at 20...25°C:

±0.03 m/s at 0.05...1.0 m/s

±3% read value at 1.0...3.0 m/s

at 15...30°C:

±0.04 m/s at 0.05...1.00 m/s

±4% read value at 1.00...3.00 m/s

Temperature: ±0.1°C

Response time (90%): 0.2s

95% coverage probability in non condensing, non moist air, <80%RH, non aggressive gases

Communication: USB

Sampling frequency: Recommended 10Hz (up to 100Hz with USB possible on some PC-installations.)

Included: Traceable calibration certificate

Vedlegg F - Model 8375 Accubalance – måletrakt

Model 8710 DP-CALC™ Micromanometer and Model 8375 ACCUBALANCE® Modular Air Balancing Tool

Specifications*

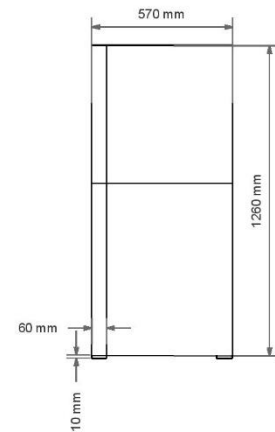
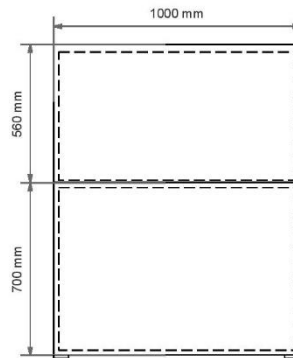
Range		Units	
Differential pressure.....	±15 in. H ₂ O (3735 pa); 150 in. H ₂ O maximum safe operating pressure	Pressure	in. H ₂ O, pa, hPa, kPa, mm Hg, in. Hg, cm Hg, mm H ₂ O, cm H ₂ O
Absolute pressure.....	15 to 40 in. Hg (356 to 1016 mm Hg)	Velocity	ft/min, m/s
Velocity	25 to 8,000 ft/min (0.125 to 40 m/s) pitot probes; 25 to 5,000 ft/min (0.125 to 25 m/s) air flow probe; 25 to 2,500 ft/min (0.125 to 12.5 m/s) velocity matrix	Volume	ft ³ /min, m ³ /h, m ³ /min, l/s
Volume	25 to 2,500 ft ³ /min (42 to 4250 m ³ /h) capture hood	Temperature	degrees F, degrees C
Temperature	-40 to 250°F (-40 to 121°C) temperature probe 14 to 140°F (-10 to 60°C) temperature/RH probe 40 to 140°F (4.4 to 60°C) operating (electronics)	Statistics	min, max, average up to 1000 readings
Storage temperature...	-4 to 160°F (-20 to 71°C)	Data Storage	1000 readings, time and date stamped
Rh	0 to 95% RH temperature/RH probe	Logging Interval	user selectable (10 to 600 seconds)
Resolution		Response Time.....	2 to 8 seconds
Pressure	0.00001 in. H ₂ O (0.001 pa) static and differential; 0.01 in. Hg (1 mm Hg) absolute	Display	6 digit, 0.75 in. character height, multi-line, sectored, multiple symbolic icons, high-contrast backlit LCD
Velocity	1 ft/min (.01 m/s)	Dimensions	
Volume	1 ft ³ /min (1 m ³ /h)	(micromanometer only).....	7.4 in. × 4.5 in. × 2.3 in. (18.8 cm × 11.4 cm × 5.8 cm)
Rh	0.1% RH	Pressure connection...	¼ in. OD straight ports for use with 3/16 in. ID flexible tubing
Temperature	0.1°F (0.1°C)	Weight with batteries ..	8710 17 oz (0.5 kg); 8375 7.4 lb (3.4 kg)
Accuracy		Power requirements....	four AA-size cells, rechargeable NiMH (included) or alkaline, or AC adapter (included), 7.5 VDC, 1.6 A, regulated
Pressure	±2% of reading ±0.001 in. H ₂ O (0.25 pa) static and differential; ±2% of reading absolute	Battery life.....	minimum of 12 hours typical
Velocity	±3% of reading ±7 ft/min (0.04 m/s) >50 ft/min (>0.25 m/s)	Recharge time.....	1 hour (external charger); 4 hours (internal charger)
Volume	±3% of reading ±7 ft ³ /min (12 m ³ /h) >50 ft ³ /min (>85 m ³ /h)	Hood sizes available	
Rh	±3% RH	Standard	2 ft × 2 ft (610 mm × 610 mm)
Temperature	±0.5 °F (0.3°C) from 32 to 160°F (0 to 71°C); max ±2.0 °F (1.2°C) from -40 to 32°F (-40 to 0°C) and from 160 to 250°F (71 to 121°C)	Optional.....	2 ft × 4 ft (610 mm × 1220 mm); 1 ft × 4 ft (305 mm × 1220 mm); 1 ft × 5 ft (305 mm × 1525 mm); 3 ft × 3 ft (915 mm × 915 mm)
		RS232C output.....	ASCII character codes; 1200, 2400, 4800, 9600, 19200 baud rate (selectable) no parity 8 data bits 1 stop bit no handshaking
		Warranty.....	2-year factory warranty

*Specifications are subject to change without notice.

Vedlegg G – Varmepumpens moduler med respektive mål

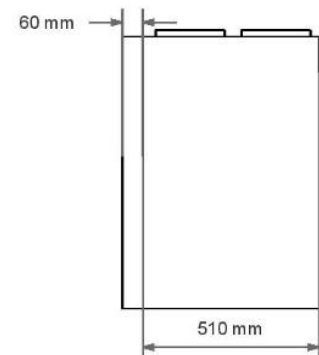
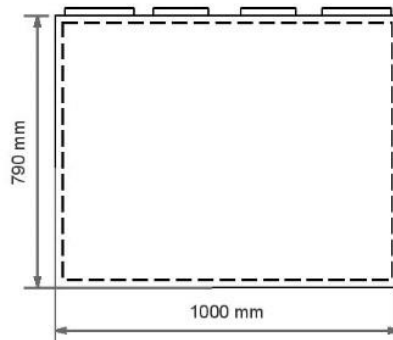
Modul 1: Varmepumpe enhet, energilager og fordelerskap.

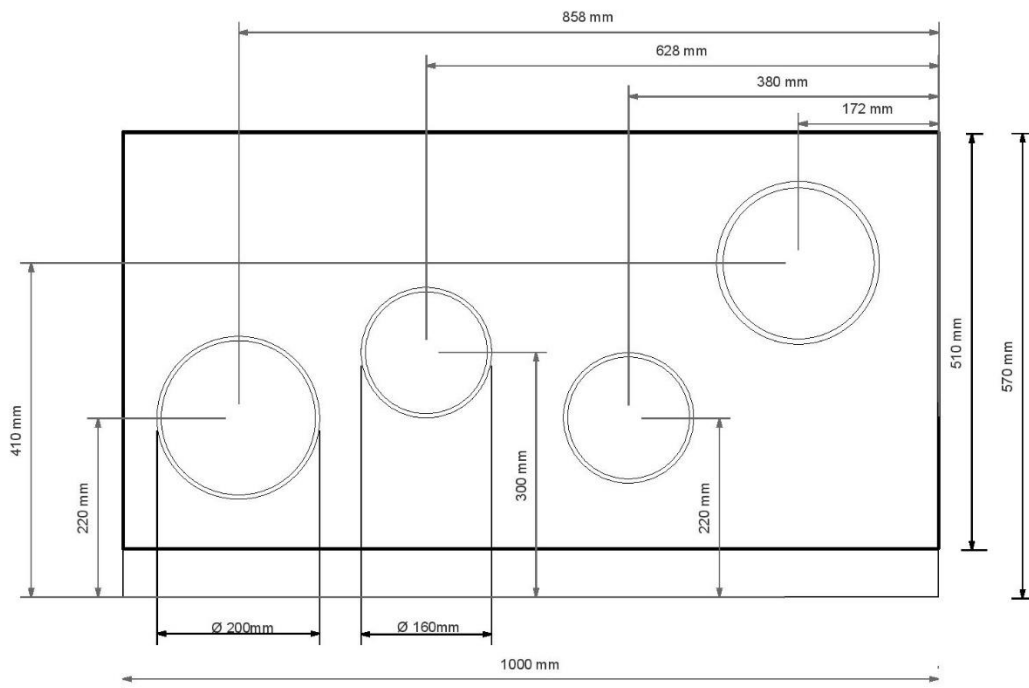
Mål	[cm]	[kg]
Høyde	127	
Bredde	100	
Dybde	57	
Vekt		140



Modul 2: Balansert ventilasjonsenhet

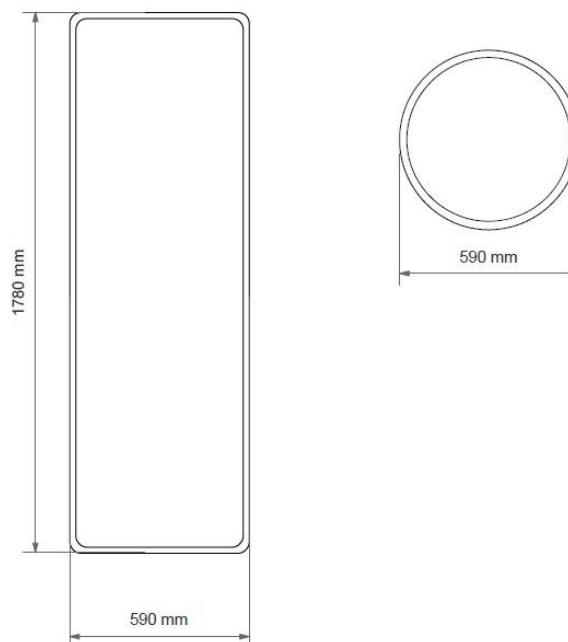
Mål	[cm]	[kg]
Høyde	79	
Bredde	100	
Dybde	57	
Vekt		98



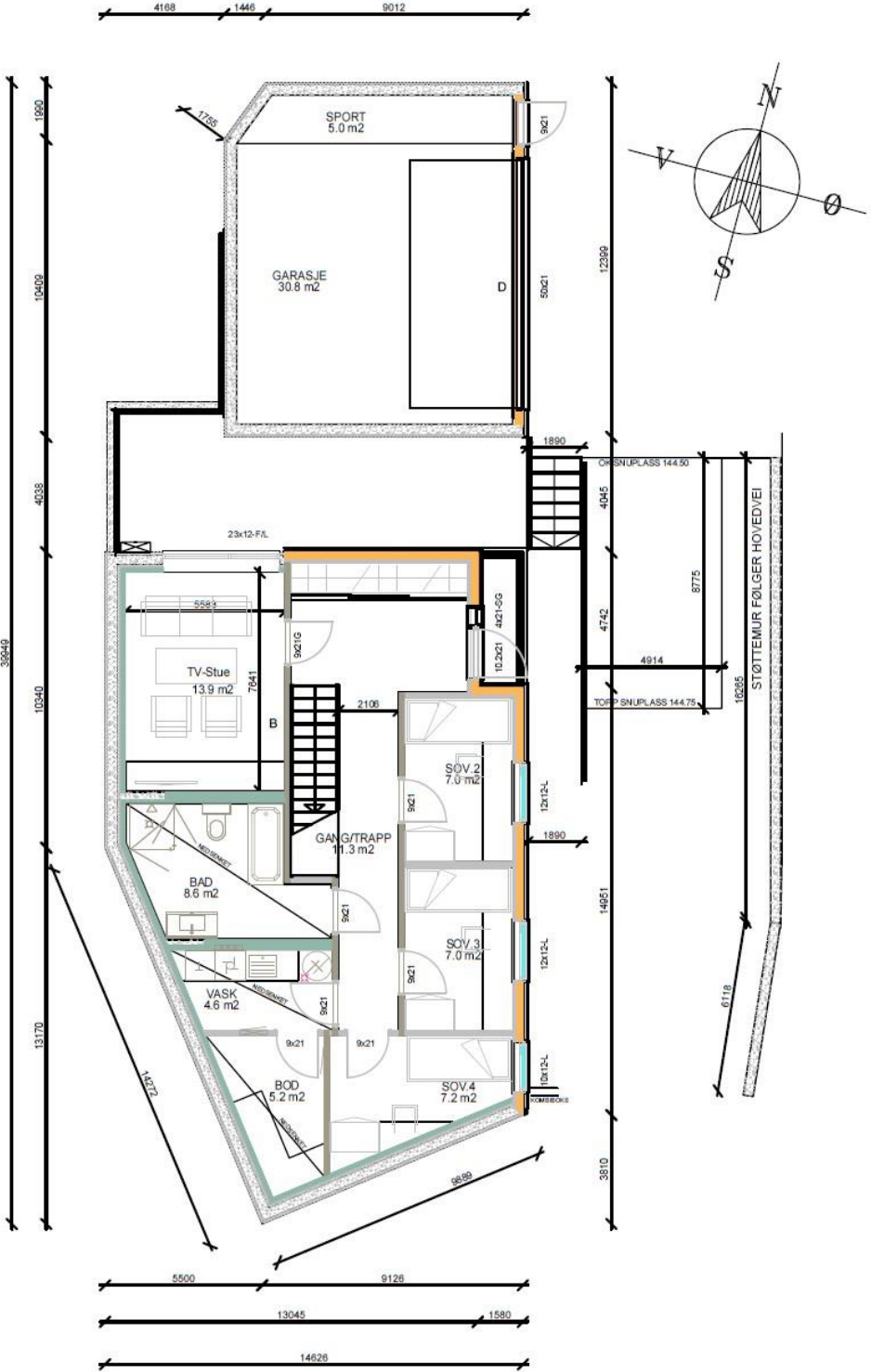


Modul 3: Varmtvannstank

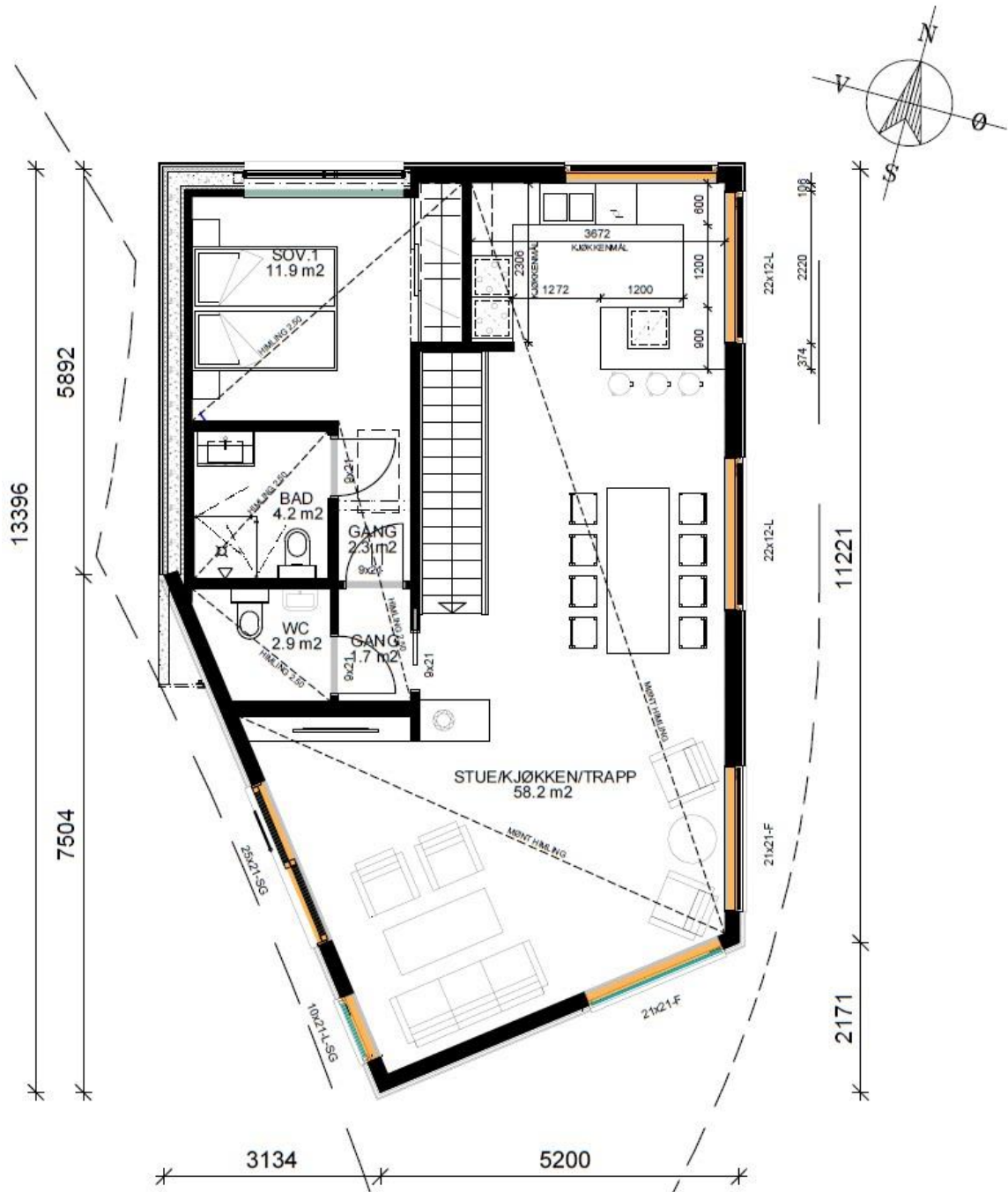
Mål	[cm]	[kg]
Høyde	178	
Diameter	59	
Vekt		45



Vedlegg H - Plantegning 1.etg & 2.etg



1.etg



2.etg

Vedlegg I - Energiberegning: TEK-Sjekk (TEK17 Fullstendig kontroll)

SINTEF Byggtorsk "TEK-Sjekk" v.190315

Bygning / prosjekt: TEK17 standard enebolig. Kunde/ref: ISOLVE AS.
Type beregning: TEK17 §14 fullstendig kontroll (alle bygg). Hele bygningen (småhus: enebolig) er beregnet.

NETTO ENERGIBEHOV (normal klima)

Energipost	Energibehov kWh/år	Spesifikt behov kWh/(m ² ·år)
Romoppvarming	7066	43,1
Ventilationsvarme	177	1,1
Varmtvann	4879	29,8
Vifter	717	4,4
Pumper	328	2,0
Belysning	1865	11,4
Teknisk utstyr	2870	17,5
Romkjøling	-	-
Ventilationskjøling	-	-
Sum denne bygning:	17902	109
Krav i TEK17 §14-2(1) ≤	-	110

VARMETAPSBUDESJETT

Varmetapspost	Netto areal m ²	U-verdi [W/m ² K]		TEK17 §14-2(2) energitiltak minstekrav	Varmetap [(W/K)/m ²]	
		Denne bygning	TEK17 §14-3(1a)		Denne bygning	TEK17 §14-2(2) krav
Vegger	102,7	0,199	0,18	0,22	0,125	0,110
Tak	169,3	0,110	0,13	0,18	0,114	0,134
Gulv	79,4	0,108	0,10	0,18	0,052	0,048
Vinduer & dører	37,9	0,812	0,80	1,20	0,188	0,200
Kuldebro	163,8	ψ [*] =0,05	ψ [*] =0,05	-	0,050	0,050
Infiltrasjon	-	n ₅₀ =1	n ₅₀ =0,6	n ₅₀ =1,5	0,072	0,043
Ventilasjon	-	n _A =82,1%	n _A =80%	-	0,071	0,079
Bygningens varmetapstall, H [*] [(W/K)/m ²]:					0,670	0,660

ENERGIFORSYNING (normal klima)

Energivare	Leverit energi kWh/år	Spesifikk leverit kWh/(m ² ·år)	Dekningsgrad varmebehov
Direktvirkende el.	5964	36,0	1,5 %
El. til VP & solenergi	2715	17,0	98,5 %
Olje	-	-	-
Gas	-	-	-
Fjernvarme	-	-	-
Biobrensel	-	-	-
Annen fornybar	-	-	-
Sum denne bygning:	8679	53	100,0 %

CO₂ utslipp cirka 21 kg/m² pr år ved normal klima.

SAMMENDRAG

Inndata:

Energi:

Inneklima:

Dagslys:

Tilleggsinfo, dekningsgrad pr energisystem (normal klima)

Energisystem	Dekning av netto energibehov, kWh/år		Elspesifikt	Systemvirkningsgrad
	Romoppv.	Vent.varme		
Elektrisitet	-	-	5780	1,00
El varmepumpe	7066	4879	-	4,40
Elektrisitet	-	177	-	0,96
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
Total behov:	7066	177	4879	-

Bygningen har muligens for lite vegg-/skråtakareal mot Sør i forhold til Nord (46% mer mot Nord).

Bygningen har muligens for lite vegg-/skråtakareal mot Vest i forhold til Øst (239% mer mot Øst).

Boligen behøver ikke skorstein, ettersom den oppføres med vannbåren oppvarming, jf. TEK17 §14-4(4).

► Boligen oppfylder kriteriene i TEK17 §14 fullstendig kontroll (alle bygg).

Innetemperaturen er tilfredsstillende. Den overskrider komfortgrensen (Inneklimakategori II i EN 15251:2007 §A.2) bare 6 timer i året, med vindusluffing.

Esimeret arealmidlet dagslysfaktor i randsone Nord=4,3%; Øst=4,3%; Sør=4,3%; Vest=4,3%; Kjøleme=0%; dvs. cirka 55% av BRA har en dagslysfaktor på minst 2%.

- Kjølemen utgjør 45% av BRA. Vurder taklys e.l. som gir dagslys i kjernen.

- Total glassareal (ekskl. karm) utgjør 16,2% av BRA.

Bygning / prosjekt: TEK17 standard enebolig. Kunde/ref: ISOLVE AS.
Type beregning: TEK17 §14 fullstendig kontroll (alle bygg). Hele bygningen (småhus: enebolig) er beregnet.

NETTO ENERGIBEHOV (normal klima)

Energi-post	Energi-behov kWh/år	Spesifikt behov kWh/(m ² ·år)
Romoppvarming	7066	43,1
Ventilasjonswarme	177	1,1
Varmtvann	4879	29,8
Vifter	717	4,4
Pumper	328	2,0
Belysning	1865	11,4
Teknisk utstyr	2870	17,5
Romkjøling	-	-
Ventilasjonskjøling	-	-
Sum denne bygning:	17902	109
Krav i TEK17 §14-2(1) ≤	-	110

VARMETAPSBUDSJETT

Varmetapspost	Netto areal m ²	U-verdi [W/m ² ·K]		Varmetap [(W/K)/m ²]	
		Denne bygning	TEK17 §14-2(2) energitiltak	Denne bygning	TEK17 §14-2(2) krav
Vegger	102,7	0,199	0,18	0,22	0,110
Tak	169,3	0,110	0,13	0,18	0,134
Gulv	79,4	0,108	0,10	0,18	0,052
Vinduer & dører	37,9	0,812	0,80	1,20	0,200
Kuldebro	163,8	ψ=0,05	ψ=0,05	-	0,050
Infiltrasjon	-	n ₅₀ =1	n ₅₀ =0,6	n ₅₀ =1,5	0,043
Ventilasjon	-	n _{l,5} =82,1%	n _{l,5} =80%	-	0,071
				0,071	0,079
				0,670	0,660

Bygningens varmetapstall, H' [(W/K)/m²]:

ENERGIFORSYNING (normal klima)

Energi-typer	Leverte energi kWh/år	Spesifikk leverte energi kWh/(m ² ·år)	Dekningsgrad varmebehov
Direktevirkende el.	5964	36,0	1,5 %
El. til VP & solenergi	2715	17,0	98,5 %
Olje	-	-	-
Gas	-	-	-
Fjernvarme	-	-	-
Biobrensel	-	-	-
Annene fornybare	-	-	-
Sum denne bygning:	8679	53	100,0 %

CO₂ utslipp cirka 21 kg/m² pr år ved normal klima.

SAMMENDRAG

Inndata: Bygningen har muligens for lite vegg-iskråtakareal mot Sør i forhold til Nord (46% mer mot Nord).

Energi: Bygningen har muligens for lite vegg-iskråtakareal mot Vest i forhold til Øst (239% mer mot Øst).
Boligen behøver ikke skorstein, ettersom den oppføres med vannbåren oppvarming, jf. TEK17 §14-4(4).

Inneklimatekst: Boligen oppfyller kriteriene i TEK17 §14 fullstendig kontroll (alle bygg).

Dagslys: Innetemperaturen er tilfredsstillende. Den overskrider komfortgrensen (Inneklimatekst i EN 15251:2007 §A.2) bare 6 timer i året, med vindustifting.

Inneklimatekst: Estimert arealmidlet dagslysfaktor i randsone Nord=4,3%; Øst=4,3%; Sør=4,3%; Vest=4,3%; Kjerne=0%; dvs. cirka 55% av BRA har en dagslysfaktor på minst 2%.

Dagslys: - Kjernen utgjør 45% av BRA. Vurder taklys e.l. som gir dagslys i kjernen.

- Total glassareal (ekskl. karm) utgjør 16,2% av BRA.

Tilleggsinfo, dekningsgrad pr energisystem (normal klima)

Energisystem	Dekning av netto energibehov, kWh/år			Dekningsgrad av egen last	System- virkningsgrad	
	Romoppv.	Vent.varme	Varmtvann			Romkjøling
Elektrisitet	-	-	-	-	-	5780
El. varmepumpe	7066	-	4879	-	-	-
Elektrisitet	-	177	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
Total behov:	7066	177	4879	-	-	5780

Dokumentasjon av kontrollberegning i henhold til NS 3031:2014

Bygningstype	Bygningstype: TEK17 standard enebolig	Byggår 2018. Kunde/ref. ISOLVE AS
Lokalt klima	Oslo	(Landlig/Lave trær / boligstrøk / jordbruk)
Type kontrollberegning	TEK17 §14 fullstendig kontroll (alle bygg)	Hele bygningen er beregnet
Beregning utført av	ISOLVE AS	v/ Bjørn Alexander Howland

SENTRALE INNDATA FOR ENERGIBEREGNINGEN, dokumentert iht. NS 3031:2014 Tillegg J:

Størrelser	Inndata	Dokumentasjon
Bygningstype	Småhus	Enebolig (1 boenhet)
Arealer [m ²]	Yttervegger	148mm + 48mm (30mm stender) iso.kl. 32 PROF
	Tak	bl.a. VV-takstoler, 48*148 undergurt, 350mm iso.kl.34 PROF
	Gulv	bl.a. -
	Vinduer, dører, og glassfelt	bl.a. Vindu PASSIVE - 0.8
Oppvarmet del av BRA (A _g) [m ²]	164 m ²	-
Oppvarmet luftvolum (V) [m ³]	513 m ³	-
U-verdi for bygningsdeler [W/(m ² ·K)]	Yttervegger	0,2 W/(m ² ·K)
	Tak	0,11 W/(m ² ·K)
Arealandel for vinduer, dører og glassfelt som % av BRA (Y _{gl})	Gulv	0,11 W/(m ² ·K)
	Vinduer, dører, og glassfelt	0,81 W/(m ² ·K)
Normalisert kuldebroverdi (Ψ) [W/(m ² ·K)]	0,05	Kolebro-rapport xx, dato dd.mm.yyyy
Normalisert varmekapasitet (C _{in}) [Wh/(m ² ·K)]	32	-
Lekkasjetal (n ₅₀) [1/h]	1	Rapport 01.01.2016.
Temperaturvirkningsgrad (η _T) for varmeveksler	82,2 %	(estimert)
Arsmiddel temperaturvirkningsgrad for varmegevinner pga. frostsikring (men ikke tilufttemperaturstyring) [W/(m ² ·s)]	82,1 %	Avkastp-10°C, Tiluft=18°C.
Spesifikk vitteeffekt (SFP) relatert til luftmengder, i driftstiden [kW/(m ² ·s)]	1,5	Mek. balansert ventilasjon
Spesifikk vitteeffekt (SFP) relatert til luftmengder, utenom driftstiden [kW/(m ² ·s)]	-	-
Gjennomsnittlig spesifikk mekanisk ventilasjonsluftmengde i driftstiden (V _{ed, A_g}) [(m ³ /h)/m ²]	1,2	Luftlekkasjer (dvs. infiltrasjon) utgjør ca. 0,22 (m ³ /h)/m ² i tillegg
Gjennomsnittlig spesifikk mekanisk ventilasjonsluftmengde utenom driftstiden (V _{ed, A_g}) [(m ³ /h)/m ²]	-	-
Argjennomsnittlig systemvirkningsgrad for oppvarmingsystemet	418 %	-
Installert effekt for romoppvarming og ventilasjonsvarme (varmebatter) [W/m ²]	27,3	Ingen nattsenkning
Settpunkttemperatur for romoppvarming [°C]	21	Ventilasjonsluft settpunkt: 18/19°C sommer/vinter
Argjennomsnittlig effektfaktor for kjølesystemet	-	-
Installert effekt for romkjøling og ventilasjonskjøling [W/m ²]	-	-
Settpunkttemperatur for kjøling [°C]	-	-
Spesifikk pumpeeffekt (SFP) [kW/(l/s)]	0,5	-
Driftstid for oppvarming, kjøling, lys, utstyr, varmtvann / ventilasjon / personer	18 / 24 / 24 timer/døgn	Hhv. 7 døgn/uke og 8-52 uken/år, jf. NS 3031
Spesifikk effektbehov for belysning i driftstiden [W/m ²]	1,95	J.fr. NS 3031 Tillegg A
Spesifikk varmebehov fra bevisning i driftstiden (Q _{be, ind}) [W/m ²]	1,95	J.fr. NS 3031 Tillegg A
Spesifikk effektbehov for utstyr i driftstiden [W/m ²]	3,00	J.fr. NS 3031 Tillegg A
Spesifikk varmebehov fra utstyr i driftstiden (Q _{be, ind}) [W/m ²]	1,80	J.fr. NS 3031 Tillegg A
Spesifikk effektbehov for varmtvann i driftstiden (Q _{be, ind}) [W/m ²]	6,10	J.fr. NS 3031 Tillegg A
Spesifikk varmebehov fra varmtvann i driftstiden [W/m ²]	0,00	J.fr. NS 3031 Tillegg A
Spesifikk varmebehov fra personer i driftstiden (Q _{be, ind}) [W/m ²]	1,50	J.fr. NS 3031 Tillegg A
Total solfaktor (g _T) for vindu og solavskjermning (N ₀ /SV ₀) [ak]	0,091	Beregnet iht. EN 13383-1. Manuell (ute) solskjermning.
Gjennomsnittlig karmfaktor (F _F)	0,20	-
Solskjermningsfaktor pga. horisont, nære bygninger, vegetasjon, og eventuelle bygningutspring	0,88	-

KONKLUSJON FRA KONTROLLBEREGNINGEN:

► Boligen oppfyller kriteriene i TEK17 §14 fullstendig kontroll (alle bygg).

Vedlegg J – Krav til boligbygning – Byggteknisk forskrift (TEK17)

Oversikt over krav til luftmengder, energibehov og krav til klimaskall kan leses av i tabellene under.

Rom/bygg	Tilluftsmengder [m ³ /h]	Avtrekksmengder [m ³ /h]		Beskrivelse	Forskrift
		Grunnventilasjon	Forsert ventilasjon		
Boenhet	1,2 (m ³ /h)/m ² gulvareal			Ventilasjon som sikrer gjennomsnittlig frisklufttilførsel når boenhet er bebodd	TEK17 §13-2(1)
Soverom	26 m ³ /h			Per planlagt sengeplass	TEK17 §13-2(2)
Andre rom	0,7 (m ³ /h)/m ² gulvareal			Rom som ikke er beregnet for varig opphold	TEK17 §13-2(3)
WC		36	36	Avtrekk av tilfredsstillende effektivitet	TEK17 §13-2(4)
Vaskerom		36	72		
Kjøkken		36	108		
Bad		54	108		

(DIBK, 2017e)

Bygningskategori	Totalt netto energibehov [kWh/m ² oppvarmet BRA per år]	Forskrift
Småhus, samt fritidsbolig over 150m ² oppvarmet BRA	100 + 1600/m ² oppvarmet BRA	TEK17 §14-2(a)

(DIBK, 2017b)

Klimaskall	U-verdi [W((m²*K]	Forskrift
Yttervegg	≤ 0,22	TEK17 §14-3(a)
Tak	≤ 0,18	TEK17 §14-3(a)
Gulv på grunn og mot det fri	≤ 0,18	TEK17 §14-3(a)
Vindu og dør	≤ 1,2	TEK17 §14-3(a)
Lekkasjetall ved n ₅₀ [1/h]	≤ 1,5	TEK17 §14-3(a)

n₅₀ = Ved 50 Pa trykkforskjell mellom inne og ute

(DIBK, 2017c)

Vedlegg K – Eksempel på analyse av termisk komfort i Excel

Parameter	Formel	Beskrivelse
Lufttemperatur [°C]	<code>GJENNOMSNIITT((INDEKS(C:C;2+607*(RAD()-RAD(\$H\$2)));INDEKS(C:C;607*(RAD()-RAD(\$H\$2)+1)))</code>	<i>Gjennomsnittsområde:</i> Beregner gjennomsnitt for hvert enkelte minutt med totalt 606 verdier. Starter beregning fra verdi 2 til 607 for første minutt før nye 606 verdier for neste minutt blir beregnet og plassert i respektive rad/kolonne. Dette repeterende mønsteret fortsetter til hvert minutt i måleperioden er blitt beregnet.
Middelstrålingstemperatur [°C]	Samme som første rad, bare basert på middelstrålingstemperatur	Samme som første rad, bare basert på middelstrålingstemperatur
Lufthastighet [m/s]	Samme som første rad, bare basert på lufthastighet	Samme som første rad, bare basert på lufthastighet
Operativ temperatur [°C]	<code>(Lufttemperatur + Middelstrålingstemp.)/2</code>	Beregnes basert på sortert data fra hvert minutt, med formel oppgitt.

Vedlegg L – Formler benyttet i Excel for analyse av varmepumpeenhet

Parameter	Formel	Beskrivelse
Volumstrøm [m^3/s]	$\dot{V} = (\dot{V} * 60) / 1000$	Omgjør l/min til m^3/s
Q_{inn} [W]	$(\dot{V} \cdot \rho \cdot C_p \cdot T_{\text{tur}} - T_{\text{retur}})$	se formel 7 kap.2.3.2 for nærmere beskrivelse
$W_{\text{kompr.}}$ [W]	$W = V \cdot A$	Data som ble logget var Volt og strøm til kompressor. Det ble derfor nødvendig å multiplisere disse etter Ohms lov for å få kompressoreffekt, W.
COP [-]	Q_{inn}/W	Leverte effekt til romoppvarming/kompressoreffekt

Vedlegg M – Eksempel: Kompressoreffekt og levert effekt til romoppvarming som funksjon av utetemperatur

Parameter	Formel	Beskrivelse
Klokkeslett	A1:A1443	Klokkeslett mellom 09:45-09:45 neste dag med totalt 24 t med måledata for hvert minutt
Utetemperatur [°C]	B1:B1443;">15,99";B1:B1443;"<17"	Temperaturintervall ved utetemperatur 16-16,99 °C. All data fra dette temperaturintervallet blir tatt med i beregning.
Totalt antall minutt med utetemperatur	ANTALL.HVIS.SETT(A1:A1443;">=00:00:44";B1:B1443;">15,99";B1:B1443;"<17";D1:D1443;">0")	Kriterieområde 1: Klokkeslett, Kriterium 1: alle minutt blir tatt med i beregning, Kriterieområde 2 & 3; utetemperatur i intervallet 16-16,99, Kriterieområde 4: Kompressor, Kriterium 4: Effekt over 0 W må oppstå for å bli tatt med i beregning
Q_{inn} [W]	SUMMER.HVIS.SETT(C1:C1442;B1:B1442;">15,99";B1:B1442;"<17";D1:D1442;">0")/(M2)	Summeringsområde: Q _{inn} , Kriterium 1 & 2: utetemperatur, Kriterium 3: kompressoreffekt over 0 W, M2: Delt på antall ganger denne temperaturen oppstår ved gitte kriterium
W_{kompr.} [W]	SUMMER.HVIS.SETT(D1:D1442;B1:B1442;">15,99";B1:B1442;"<17")/M2	Summeringsområde: W, Kriterium 1 & 2: utetemperatur, M2: Delt på antall ganger denne temperaturen oppstår ved gitte kriterium
COP [-]	HVISFEIL(Q/W;0)	Dividerer Q på W for å få COP. HVISFEIL- funksjonen slår inn visst beregningen blir dividert på 0 og returnerer 0 i aktuell celle.

Vedlegg N – Eksempel: Tur-returtemperatur som funksjon av utetemperatur og kompressoreffekt

Parameter	Formel	Beskrivelse
Utetemperatur [°C]	B1:B1443;">15,99";B1:B1443;"<17"	Temperaturintervall ved utetemperatur 16-16,99 °C. All data fra dette temperaturintervallet blir tatt med i beregning.
Turtemperatur [°C]	GJENNOMSNITT.HVIS.SETT(G\$1:G\$1443;B\$1:B\$1443;">15,99";B\$1:B\$1443;"<17";D\$1:D\$1443;">0")	Gjennomsnittsområde: Turtemperatur, Kriterium 1 & 2: utetemperatur, Kriterium 3: kompressoreffekt over 0 W
Returtemperatur [°C]	GJENNOMSNITT.HVIS.SETT(F\$1:F\$1443;B\$1:B\$1443;">15,99";B\$1:B\$1443;"<17";D\$1:D\$1443;">0")	Gjennomsnittsområde: Returtemperatur, Kriterium 1 & 2: utetemperatur, Kriterium 3: kompressoreffekt over 0 W
$\Delta T_{\text{tur-retur}}$ [K]	= Turtemperatur - Returtemperatur	
Q_{inn} [W]	GJENNOMSNITT.HVIS.SETT(C\$1:C\$1443;B\$1:B\$1443;">14,99";B\$1:B\$1443;"<16";D\$1:D\$1443;">0")	Gjennomsnittsområde: Q_{inn} , Kriterium 1 & 2: utetemperatur, Kriterium 3: kompressoreffekt over 0 W
$W_{\text{kompr.}}$ [W]	GJENNOMSNITT.HVIS.SETT(D\$1:D\$1443;B\$1:B\$1443;">15,99";B\$1:B\$1443;"<17";D\$1:D\$1443;">0")	Gjennomsnittsområde: W, Kriterium 1 & 2: utetemperatur, Kriterium 3: kompressoreffekt over 0 W
COP [-]	HVISFEIL(Q/W;0)	Dividerer Q på W for å få COP. HVISFEIL- funksjonen slår inn visst beregningen blir dividert på 0 og returnerer 0 i aktuell celle.

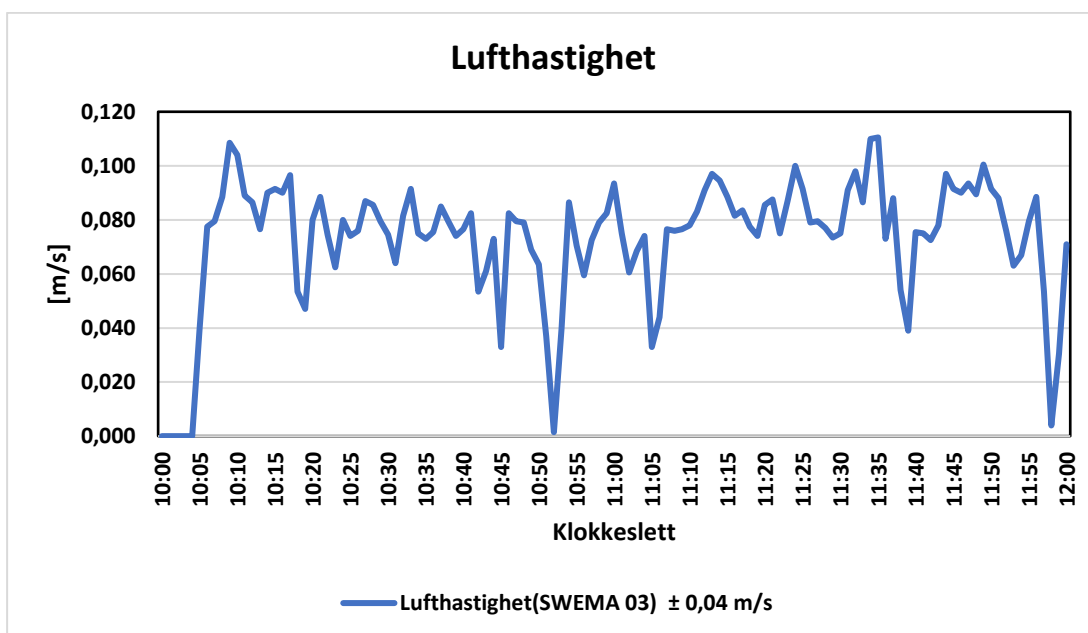
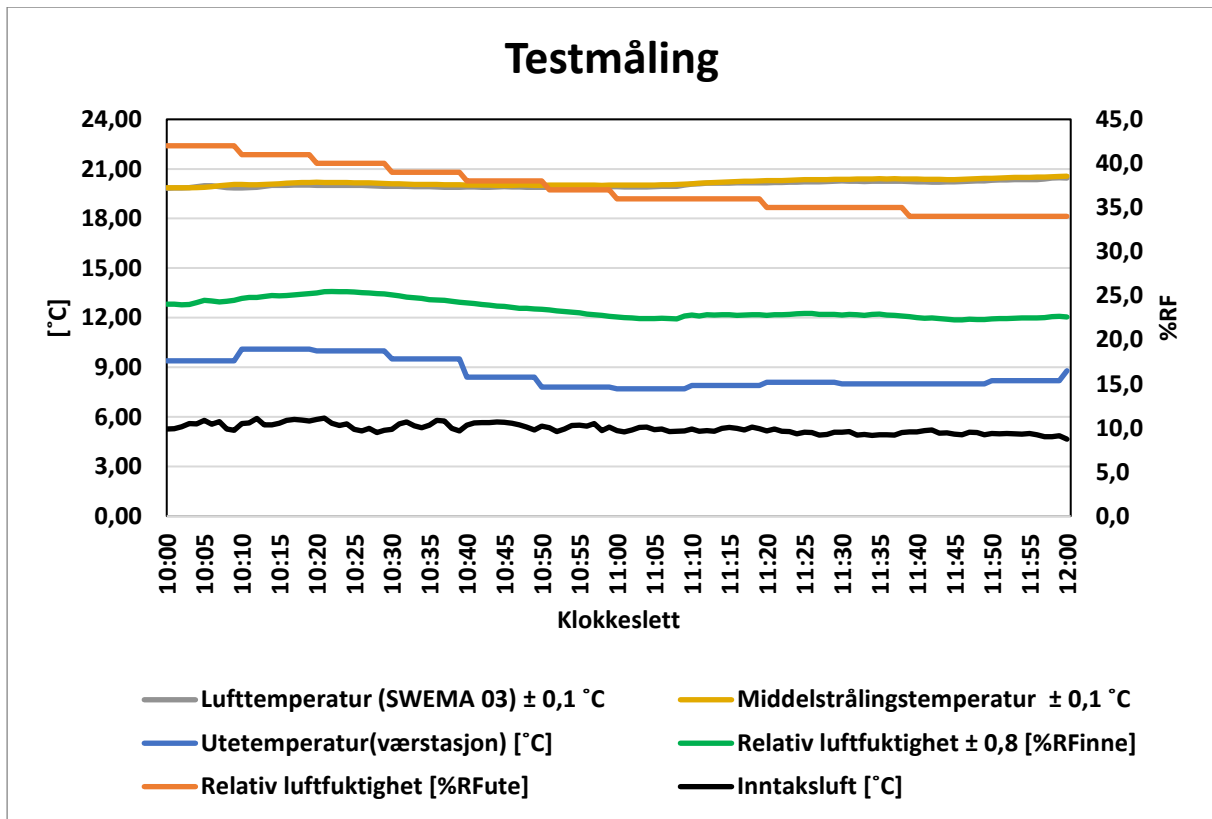
Vedlegg O – Luftmengdemåling

15.04.2021	Testdag	Måleresultat	$x-\bar{x}$	$(x-\bar{x})^2$
	Luftmengde 01	11,28	1,51	2,27
	Luftmengde 02	8,46	-1,31	1,72
	Luftmengde 03	9,58	-0,19	0,04
		9,77	0,00	4,03
	U_T	10,27 %		
	U_S	3,00 %		
U_R	11 %			
16.04.2021	Måledag 1	Måleresultat	$x-\bar{x}$	$(x-\bar{x})^2$
	Luftmengde 01	42,10	4,13	17,08
	Luftmengde 02	47,36	-1,13	1,27
	Luftmengde 03	49,24	-3,01	9,04
		46,23	0,00	27,39
	U_T	5,66 %		
	U_S	3,00 %		
U_R	6 %			
17.04.2021	Måledag 2	Måleresultat	$x-\bar{x}$	$(x-\bar{x})^2$
	Luftmengde 01	29,88	-1,75	3,06
	Luftmengde 02	18,61	9,52	90,63
	Luftmengde 03	35,90	-7,77	60,37
		28,13	0,00	154,07
	U_T	22,06 %		
	U_S	3,00 %		
U_R	22 %			
18.04.2021	Måledag 3	Måleresultat	$x-\bar{x}$	$(x-\bar{x})^2$
	Luftmengde 01	48,49	2,93	8,58
	Luftmengde 02	53,56	-2,14	4,58
	Luftmengde 03	52,21	-0,79	0,62
		51,42	0,00	13,79
	U_T	3,61 %		
	U_S	3,00 %		
U_R	5 %			
19.04.2021	Måledag 4	Måleresultat	$x-\bar{x}$	$(x-\bar{x})^2$
	Luftmengde 01	50,37	-1,51	2,27
	Luftmengde 02	47,92	0,94	0,89
	Luftmengde 03	48,30	0,56	0,32
		48,86	0,00	3,48
	U_T	1,91 %		
	U_S	3,00 %		
U_R	4 %			

Vedlegg P – Luftmengdemåling med formeloppbygning i Excel

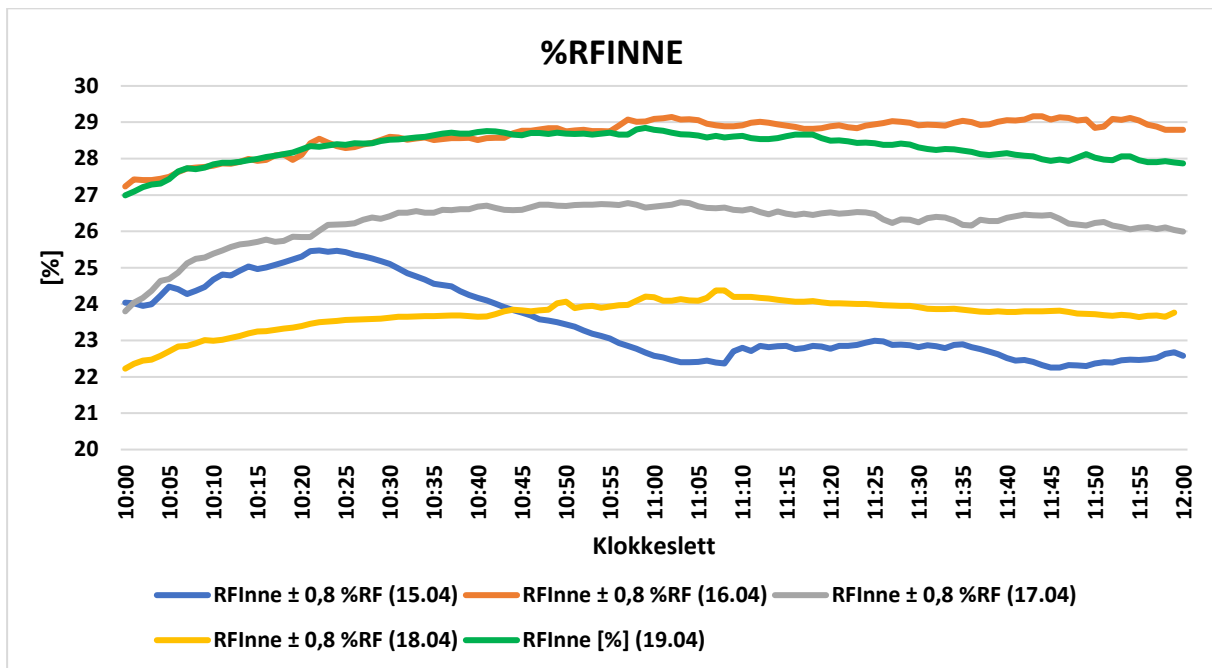
19.04.2021	Måledag 4	Måleresultat	$x - \bar{x}$	$(x - \bar{x})^2$
	Luftmengde 01	50,37	-1,51	2,27
	Luftmengde 02	47,92	0,94	0,89
	Luftmengde 03	48,30	0,56	0,32
		GJENNOMSNIITT(D52:D54)	SUMMER(E52:E54)	SUMMER(F52
	UT	1,91 %	ROT(F55/((3-1)*2))/D55	
	US	3,00 %		
	UR	4 %	ROT((D57^2)+(D58^2))	

Vedlegg Q – Resultat fra testmåling: Termisk komfort



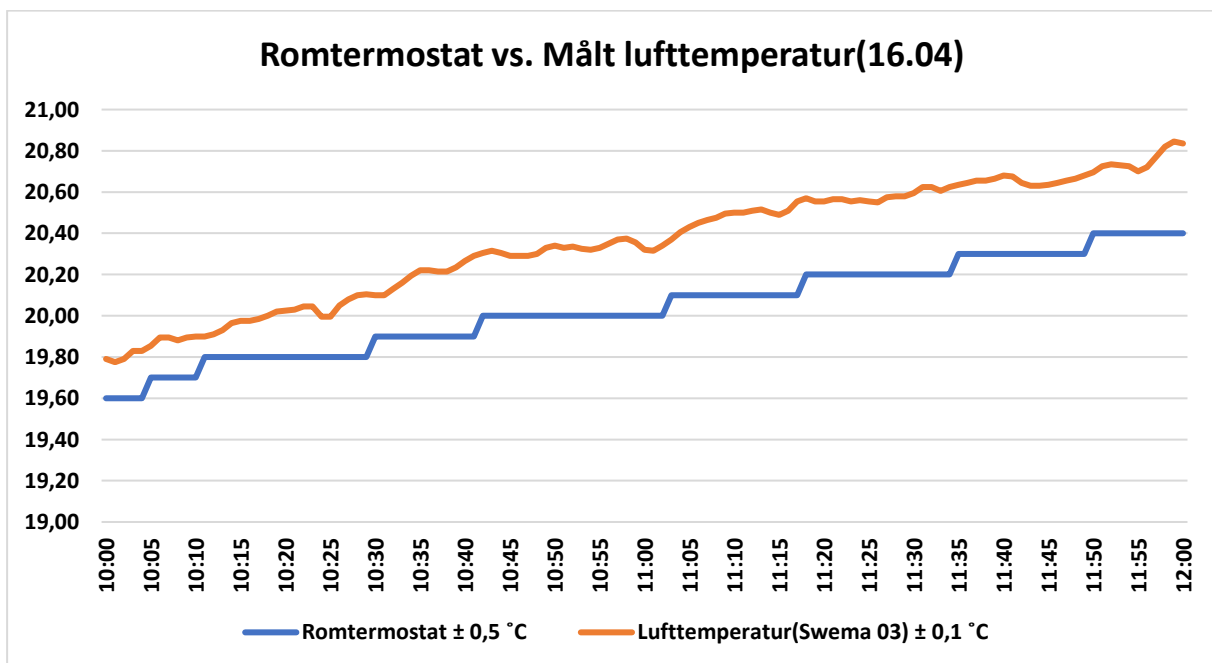
Vedlegg R – Resultater fra termisk komfort rigg

Relativ luftfuktighet innendørs

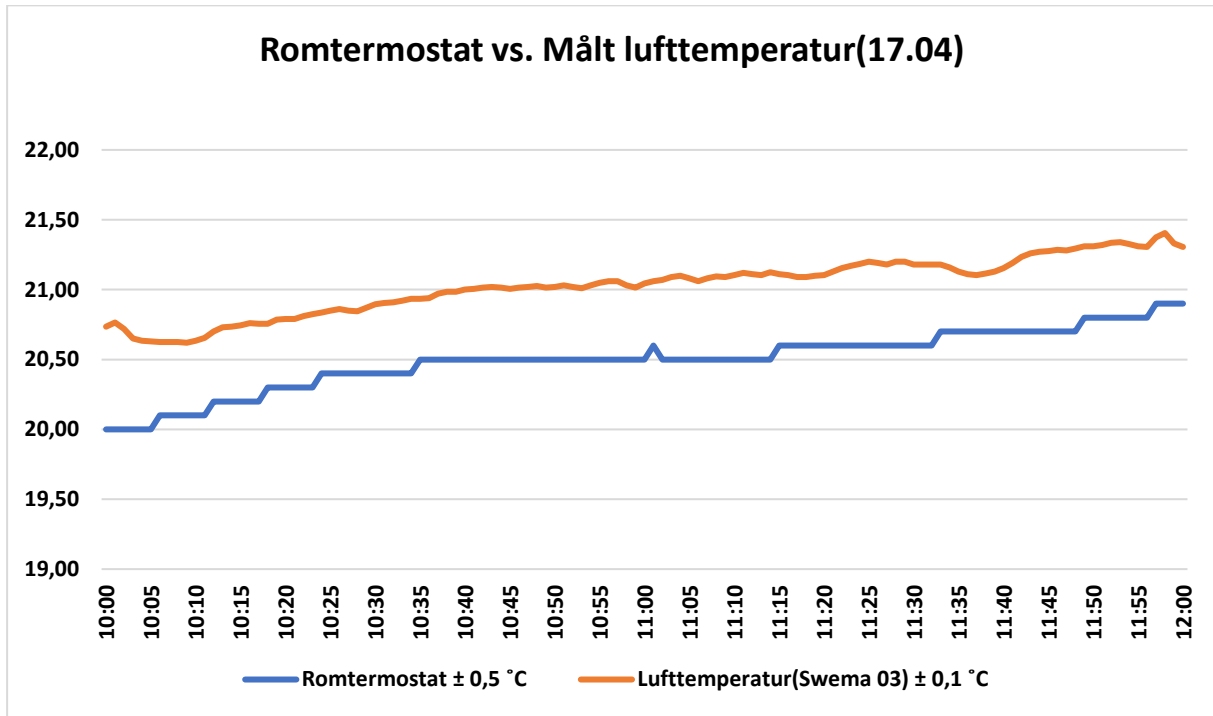


Romtermostat vs. Lufttemperatur

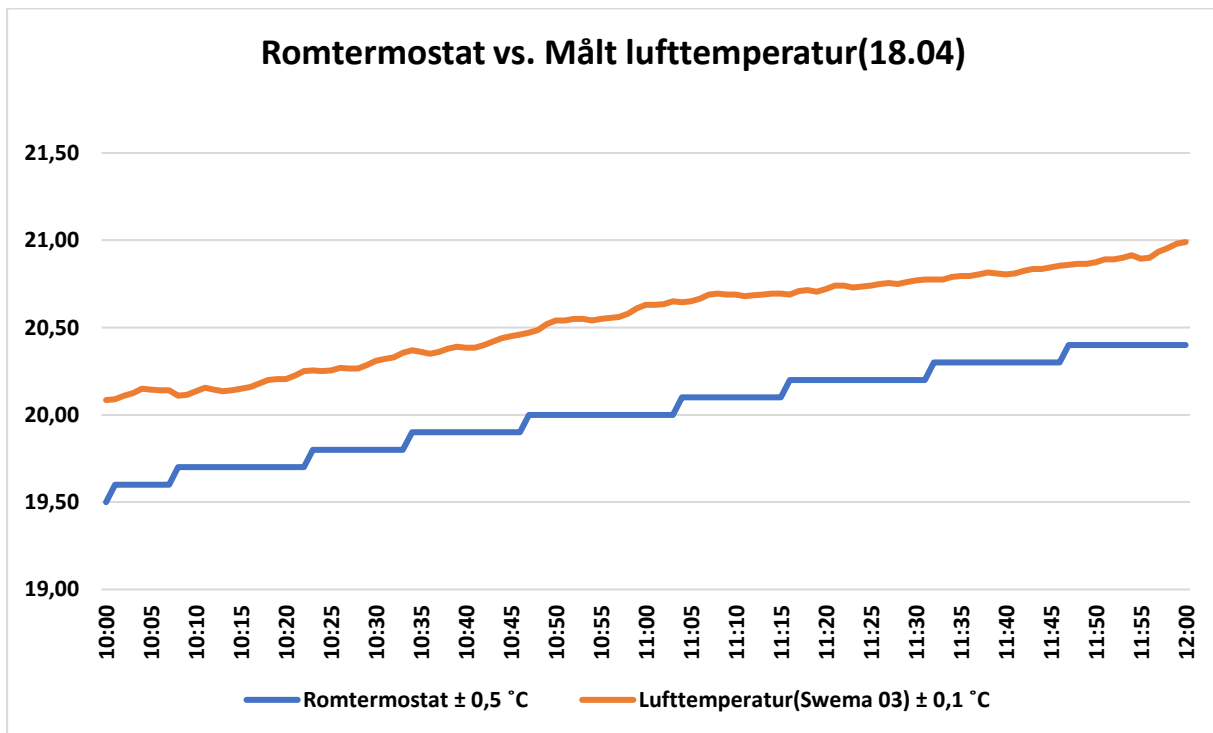
Settpunkt satt til 30°C turtemperatur og romtemperatur 22°C



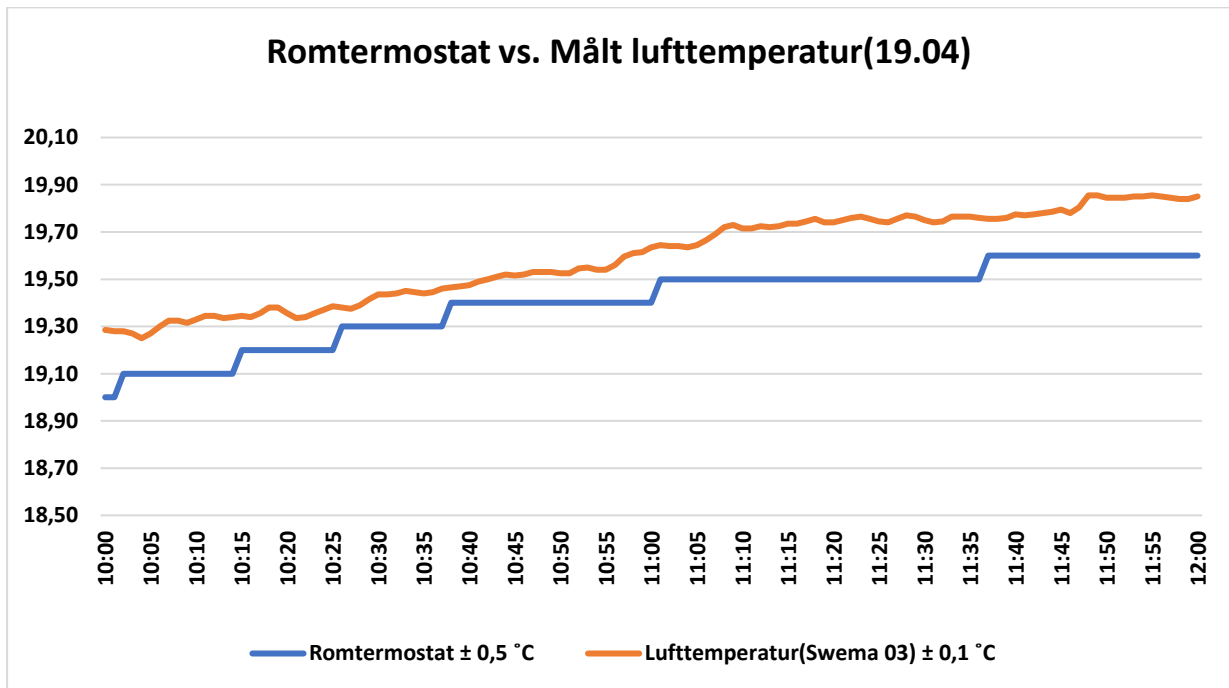
Settpunkt satt til 29°C turtemperatur og romtemperatur 21°C



Settpunkt satt til 28°C turtemperatur og romtemperatur 20°C



Settpunkt satt til 27°C turtemperatur og romtemperatur 19°C



Lufthastighet

