

MASTEROPPGAVE

MASTEROPPGAVENS TITTEL Eksperimentell og numerisk evaluering av kjøleytelse for sparkel med faseendringmateriale anvendt på kontor for å forbedre termisk inneklima.	DATO 15.06.2020
	ANTALL SIDER / ANTALL VEDLEGG 65/5
FORFATTER Chakkrit Phengphan	VEILEDER Tor Arvid Vik, Habtamu Bayera Madessa, Arnab Chaudhuri,
UTFØRT I SAMMARBEID MED Andreas Aamodt	KONTAKTPERSON

SAMMENDRAG

Hovedmålet var å undersøke hvor mye PCM-sparkelen bidrar til å redusere rom-temperaturen og forbedring av termisk inneklima i form av passiv kjøling, gitt på et kontor på en varm sommerdag i det nordiske klimaet. Målinger ble utført i et klimarom med et gulvareal på 14m², der PCM-sparkelen ble påført på vegg- og himlingoverflatene med en tykkelse på 1,7-2mm. Temperatur i rommet ble målt over fem påfølgende dager med varmetilskudd og ventilasjonsluftmengder som er representative for sommerforhold. Resultatene fra målingene ble deretter brukt til å modellere og validere simuleringsmodellen for ytterligere å undersøke PCM-sparkelens kjøleytelse ved parametrisk analyse.

Resultatet viser at denne PCM-sparkelen har stort avkjølingspotensial. Bruk av denne PCM-sparkelen i bygninger vil kunne bidra til å forbedre termiskkomfort, med reduksjon av maksimal operativtemperatur med 1,1°C.

3 STIKKORD

Faseendringmateriale

Termisk komfort

Laboratorieeksperiment

Prosjektbeskrivelse

Bakgrunn

De siste årene har det vært et økende fokus på å redusere klimagassutslipp knyttet til energibruk i byggebransjen. Et av tiltakene for å redusere energibruket i bygninger er å benytte faseendringsmaterialer (PCM) for å oppnå en passiv kjøleeffekt i form av lagring av den termiske energien, som er en effektiv måte å redusere energibruken til kjøling på. Gyproc Saint-Gobain i Sverige har utviklet en sparkel som inneholder innkapslede mikropartikler av PCM. Ved å dekke innvendige vegg- og himlingsoverflater med et tynt lag av denne sparkelen, forventes det å kunne redusere kjølebehov.

Problemstilling

"Hvor effektivt er PCM anvendt i et kontor om sommeren?"

Hovedmålet for dette prosjektet er å finne ut hvor mye PCM-sparkelen bidrar til å redusere romtemperaturen i et kontor på en varm sommerdag. Dette hovedmålet kan deles opp i følgende tre delmål, som er å undersøke hvordan kjøleytelsen for PCM-sparkel under driftstid blir påvirket av a.) Tykkelse, b.) Nattventilasjon og c.) Størrelse på smøreflater.

Arbeidsoppgaver knyttet til denne oppgaven er følgende

- Gjennomføre og sammenligne resultatene av måling av romtemperatur i to identiske kontorer, hhv. med og uten PCM.
- Lage simuleringsmodell av klimarommet og validere simuleringsmodellen med resultat fra målingene.
- Undersøke kjøleytelsen av PCM-sparkelen ved numeriske simuleringer.

Metode

I dette prosjektet skal det gjennomføres både eksperimentelle forsøk og numeriske simuleringer. Eksperimentet har som formål å undersøke hvor stor reduksjon av romtemperatur som kan oppnås med PCM-sparkelen, og numeriske simuleringer blir benyttet til å undersøke ytterligere effektiviteten av PCM-sparkelen for avkjøling.

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet av en ingeniørstudent fra Institutt for Energi og miljø i bygg ved OsloMet – storbyuniversitetet, våren 2020.

Masteroppgavens tittel: Eksperimentell og numerisk evaluering av kjøleytelse for sparkel med faseendingsmateriale anvendt på kontor for å forbedre termisk inneklimate.

Oppgaven omhandler undersøkelse og testing av kjøleytelsen til et faseendingsmateriale (PCM) anvendt i et kontor om sommeren. I oppgaven blir sparkel som inneholder innkapslede mikropartikler av PCM, utviklet av Gyproc Saint-Gobain i Sverige, undersøkt. Arbeidsoppgavene bestod i hovedsak av laboratorieeksperiment og numerisk simulering, der laboratorieeksperimentet ble gjennomført i samarbeid med medstudent Andreas Aamodt.

Jeg vil takke mine veiledere Tor Arvid Vik, Habtamu Bayera Madessa og Arnab Chaudhuri, som ga Andreas Aamodt og meg muligheten til å gjennomføre denne masteroppgaven, og deres utmerkede veiledning og oppfølging gjennom hele prosessen. Videre vil jeg takke Øystein Andersen som har forsynt oss med måleutstyr og hjulpet oss med tilrettelegging av laboratoriet. I tillegg vil jeg takke Gyproc Saint-Gobain Sverige for å ha gitt oss nødvendige PCM-sparkelen for testing i eksperimentet. Sist, men ikke minst, vil jeg takke min medstudent Andreas Aamodt for godt samarbeid gjennom hele laboratorieeksperimentet.

Chakkrit Phenphan

Chakkrit Phenphan
15. juni 2020

Sammendrag

Når faseendringsmaterialet (PCM) blir utsatt for temperaturendring over smeltepunktet, vil materialet absorbere og lagre varmen i form av latent varme i det materialet skifter fase. Ved å benytte PCM i bygningskonstruksjoner vil det bidra til å begrense temperaturøkning i bygninger i form av termisk energilagring. Gyproc Saint-Gobain, Sweden AB har utviklet en sparkel som inneholder innkapslede mikropartikler av PCM. Ved å smøre denne PCM-sparkelen direkte på innvendige vegg- og himlingsoverflater med et tynt lag, kan man forvente å kunne redusere den maksimale romtemperaturen i form av passivkjøling. Hensikten med denne oppgaven var å undersøke egenskapene og kjøleytelsen for denne PCM-sparkelen. Arbeidsoppgaver besto i hovedsak av laboratorieteksperiment og numeriske simuleringer.

Laboratorieeksperimentet ble utført i et klimarom lokalisert på OsloMet P35, med gulvareal på $14,1m^2$ og høyde på $2,4m$. Hensikten med eksperimentet var å finne ut hvor stor temperaturreduksjon som kan oppnås med denne PCM-sparkelen. Klimarommet skulle representere et cellekontor for en typisk sommerdag i Oslo, antatt for to personer. Ventilasjon, driftstid, intern- og ekstern-varmetilskudd parametere har vært basert på denne forutsetningen. Termisk komfortparametere og overflatetemperaturer har blitt målt i klimarommet over seks påfølgende dager, henholdsvis med og uten PCM-sparkelen. Ved å påføre PCM-sparkelen på vegg- og himlingsoverflatene med tykkelse på $1,7-2,1mm$, ble operativ temperaturtoppen redusert med $1,1^{\circ}C$, og operativ temperatur under driftstid redusert med $1,1-1,4^{\circ}C$. I tillegg ble det observert at kjølevirkningen av PCM-sparkelen startet øyeblikkelig da overflatetemperaturen nådde smeltepunktet ved $20^{\circ}C$.

Etter gjennomført laboratorieeksperiment ble målingene brukt til å validere en simuleringmodell og PCM-data. Denne modellen ble så brukt for å undersøke kjøleytelsen til PCM-sparkelen ytterligere. Valideringene viste gode overensstemmelse med målingene i klimarommet, med CVRMSE-indeks på $1,49\%$ for simuleringssmodellen og $2,41\%$ for PCM-data brukt i simuleringen, som er godt under kravet for ASHRAE-retningslinjer 2017 [1] på 15% . Studien ble gjort ved sensitivitetanalyse, med tre hovedsimuleringsscenarioer omhandlet innvirkningen av kjølingytelse på PCM-sparkel ved a.) $1-4mm$ tykkelse på PCM-sparkel, b.) Nattventilasjon og c.) Størrelse på smøreflate. De numeriske simuleringene ble utført med Oslo-klimadata og simuleringstøytøys IDA-ICE.

Resultatene fra analysen viste at:

a.) Med PCM-sparkelen påført på vegg- og himlingsoverflatene med tykkelse på $1mm$, ble operativ temperaturtoppen redusert med $0,5^{\circ}C$, med $2mm$ ble den

reduisert med $1,1^{\circ}\text{C}$, 3mm med $1,9^{\circ}\text{C}$ og 4mm med $2,4^{\circ}\text{C}$. Når PCM-sparkelen kunne påføres på himlingsoverflate, ble operativ temperaturtoppen redusert med $0,8^{\circ}\text{C}$ for 3mm tykk og 1°C for 4mm tykk.

b.) Tilluftstemperatur og luftmengde har stor innvirkning på avkjølingen av PCM-sparkelen, som er nødvendig for å forberede PCM til å absorbere varme dagen etter.

c.) Med samme mengde PCM-sparkel, vil størrelsen på smøreoverflaten ha liten innvirkning på kjøleytelsen til PCM. Tykkelsen vil imidlertid spille en større rolle med hensyn på å nå fullstendig metning ved senere tidspunkt, som førte til ytterligere kjølevirking.

Innhold

Prosjektbeskrivelse	i
Forord	iii
Sammendrag	iv
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	2
1.3 Omfang og avgrensning	2
2 Teori	3
2.1 Termisk energilagring	3
2.2 Faseendringsmateriale (PCM)	4
2.2.1 Innkapslet PCM	5
2.3 Termisk komfort	6
2.3.1 PMV- og PPD-indeks	7
2.3.2 Oppholdssone	8
2.3.3 Operativ temperatur	8
2.3.4 Relativ luftfuktighet	9
2.3.5 Lufthastighet	9
2.3.6 Lokal termisk ubehag	10
2.3.7 Krav og vurdering av termisk inneklime	10
2.4 Nøyaktighetsvurdering av simuleringsmodell	11
3 Eksperimentell metode	12
3.1 Måling av kjølevirkning av PCM-sparkel i klimarom	12
3.1.1 Klimarom	12
3.1.2 Etterligning av cellekontor i klimarom	15
3.1.3 Utstyr	20
3.1.4 Tilrettelegging og måling	22
3.1.5 Gjennomføring av måling	27
3.2 Beregning av termisk komfort parametere	29
3.3 Isvannstest av termoelementer	31
4 Numerisk metode	32
4.1 Undersøkelse av PCM-sparkelens kjøleytelse ved numerisk metode	32
4.1.1 Oppbygning av simuleringsmodell	32
4.1.2 Kalibrering av simuleringsmodell	38
4.1.3 Implementering og validering av PCM-data i IDA-ICE	39
4.1.4 Sensitivitetsanalyse av PCM-sparkelens kjøleytelse	42

5	Resultat og diskusjon	44
5.1	Måling av kjølevirkning av PCM-sparkel	44
5.1.1	Vurdering av operativ temperatur	44
5.1.2	Vurdering av PMV- og PPD-indeks	46
5.1.3	Vurdering av overflatetemperatur	48
5.1.4	Måling i oppholdssone	51
5.1.5	Tilluftstemperatur	54
5.1.6	Isvannstest	55
5.2	Numerisk simulering	56
5.2.1	Validering av simuleringsmodell og PCM-data	56
5.2.2	Kjøleytelse for PCM-sparkel i forskjellige tykkelser	58
5.2.3	Kjøleytelse for PCM-sparkel ved variasjon av nattventilasjon	60
5.2.4	Innvirkning av størrelsen på PCM-smøreflater	62
6	Konklusjon	63
7	Videre arbeid	65
	Bibliografi	66
	Vedlegg	a
A	Validering av beregnet operativ temperatur	b
B	Python kode benyttet for beregning av PMV og PPD-indeks	c

Kapittel 1

Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Totalt energiforbruk og CO_2 -utslipp har på verdensbasis økt betydelig de siste årene. BP Global har rapportert at det totale energiforbruket i verden har hatt en økning på 2,9% for 2018 året, og dette er den raskeste veksten siden 2010, med en gjennomsnittsokning på 1,5% per år [2]. Samtidig med økt energiforbruk har det vært en kraftig økning i CO_2 -utslipp på 2,0% i 2018 [2]. 40% av det totale CO_2 -utslippet kommer direkte og indirekte fra energi som brukes i bygninger i Europa [3]. Dette har ført til et økt fokus på å redusere energiforbruket i bygninger samt redusere CO_2 -utslippene dette medfører. Ved å redusere energiforbruket i bygninger vil det også redusere CO_2 -utslippene. Samtidig bruker vi mesteparten av tiden vår innendørs, og det er fremdeles viktig å opprettholde god termisk komfort.

En løsning for å redusere energiforbruket i bygninger og samtidig opprettholde god termisk komfort om sommeren, er å bruke passiv kjøling. Dette kan redusere romtemperaturen om sommeren uten bruk av elektrisk energi til kjøling [4]. Dette er spesielt viktig i sommerperioden, der energibruk for kjøling ofte er to til tre ganger høyere enn energibruk til oppvarming [3]. En studie gjort av Akeiber et al. i 2016 [5] har vist at en passiv kjølestrategi med bruk av lagring av termisk energi er en effektiv måte å redusere romtemperaturen på. Faseendingsmateriale (PCM) med høy tetthet for lagring av termisk energi, kan brukes effektivt til dette formålet.

Når faseendingsmaterialet utsettes for temperaturendring og temperaturen stiger over smeltepunktet til materialet, vil materialet absorbere varmen i det materialet skifter fase, for eksempel fra fast til flytende form [6]. Faseendingsmaterialet kan integreres i bygningskonstruksjonens vegg og tak. Dette gir mulighet for å begrense varmetilskudd fra ytre omgivelser [7] samtidig lagre varmen gjennom faseendring. Ved å velge et faseendingsmateriale med et smeltepunkt rundt ønsket komforttemperatur, kan PCM bidra til et mer stabilt og behagelig termisk inn klima og samtidig som det reduserer kjøle- og oppvarmingsbehovet i bygningen [8].

Gyproc Saint-Gobain i Sverige har utviklet en sparkel som inneholder innkapslede mikropartikler av PCM. Ved å dekke innvendige vegg- og himlingsoverflater med et lag av denne sparkelen, forventer man å kunne redusere maksimal romtemperatur, og dermed behovet for mekanisk kjøling. Etersom denne type bruk av PCM fortsatt er i utviklingsfasen, er det stor interesse for å undersøke kjølevirkningen og egenskapene til dette produktet nærmere.

1.2 Problemstilling

"Hvor effektivt er PCM anvendt i et kontor om sommeren?"

Hensikten med denne masteroppgaven er å studere kjøleytelsen til PCM-sparkelen med særlig hensyn på å redusere romtemperatur og forbedring av termisk komfort.

Arbeidsoppgaver er som følger:

- Undersøkelse av kjøleytelsen av PCM-sparkelen ved eksperimentell metode.
 - Relevante litteraturstudier relatert til gjennomføring av målingene.
 - Klargjøring av måleutstyr og klimarom.
 - Gjennomføre måling av romtemperatur i to identiske kontorer, hhv. med og uten PCM-sparkel.
- Undersøkelse av kjøleytelsen av PCM-sparkelen ved numerisk metode.
 - Modellere simuleringsmodell av klimarommet og validere simuleringsmodellen med resultat fra målingene.
 - Gjennomføre sensitivitetsanalyse for kjøleytelsen av PCM-sparkelen ved numeriske simuleringer.

1.3 Omfang og avgrensning

Hovedmålet var å undersøke i hvor stor grad PCM-sparkelen kan bidra til å redusere romtemperaturen og øke termisk komfort i form av passiv kjøling. Omgivelsene som ble brukt til undersøkelsen var et cellekontor på en varm sommerdag i det nordiske klimaet. Videre vil kjøleytelsen til PCM-sparkelen bli studert ytterligere ved sensitivitetsanalyse med numerisk metode. Studien kan deles opp i følgende tre delmål, som omhandler undersøkelse av hvordan kjøleytelsen for PCM-sparkel påvirkes, a.) Tykkelse, b.) Nattventilasjon og c.) Størrelse på smøreflater. I denne oppgaven vil operativ temperatur være den viktigste faktoren for vurderingen av termisk komfort.

Kapittel 2

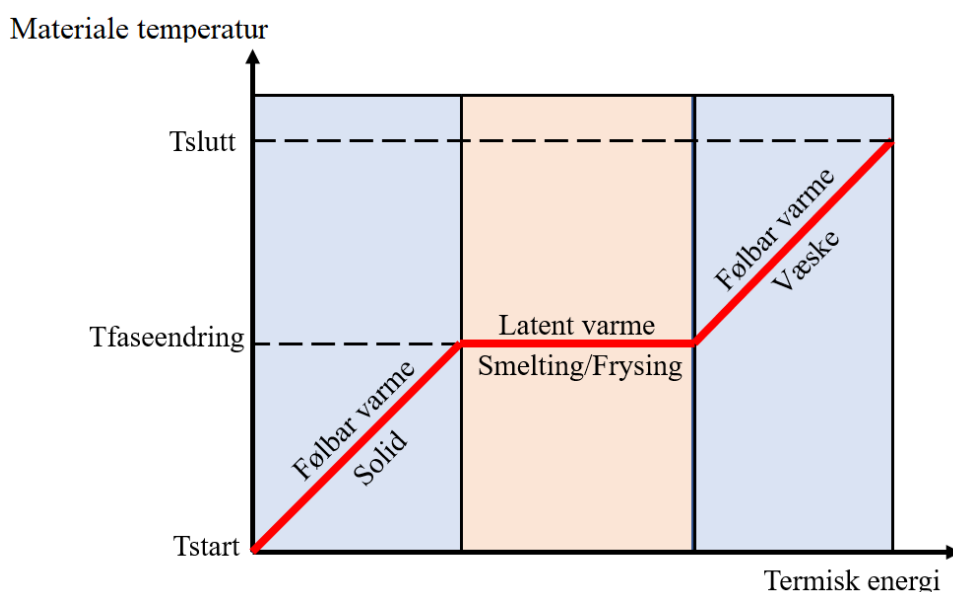
Teori

2.1 Termisk energilagring

Termisk energilagring er midlertidig lagring av varmeenergi ved enten å varme opp eller avkjøle et lagringsmateriale, slik at den lagrede energien i materialet kan benyttes ved et senere tidspunkt for oppvarming eller avkjøling [9]. Ved endring av den indre energien i et lagringsmateriale kan den termiske energien lagres eller hentes i form av følbar varme, latent varme og kjemisk energi eller kombinasjon av disse [10]. Kjemisk energilagring vil ikke bli diskutert videre

Følbar varme

Lagring av termisk energi i form av følbar varme foregår ved å heve temperaturen til et materiale, der lagringsmaterialet vanligvis er i fast- eller væskeform [10], se figur 2.1. Mengden av lagret varme i et materiale er avhengig av den spesifikke varmekapasiteten til materialet, temperaturforskjellen mellom materialet og omgivelse, og mengde av lagringsmaterialet [11]. Figur 2.1 viser virkemåten for termisk energilagring i form av følbar og latent varme for et lagringsmateriale.



Figur 2.1: Termisk energilagring i form av følbar og latent varme

Latent varme

Latent varmelagring er basert på varmeopptak eller frigjøring når et lagringsmateriale gjennomgår en faseendring fra faststoff til væske, eller væske til gass eller omvendt [10].

2.2 Faseendringsmateriale (PCM)

Blant de nevnte metodene for termisk energilagring er latent termisk energilagring den mest attraktive på grunn av dens egenskap til å lagre store energimengder, samt evnen til lagre varme ved nært konstant temperatur som tilsvarer den temperaturen for faseovergang til materialet [10]. Når et materiale blir utsatt for en temperaturendring og temperaturendringen stiger over materialets smeltepunkt, vil de kjemiske bindingene i materialet begynne å brytes opp og materialet vil absorbere varme i det materialet skifter fase eksempel fra solid- til væskeform [6]. Når temperaturen synker vil materialet avgi varmeenergien og gå over til fastform. Materialet som brukes til lagring av latent varme kalles for faseendringsmateriale (PCM).

Faseendringer for et materiale kan være i form av fast til fast, fast til væske, fast til gass, væske til gass eller omvendt. Sharma et al. [10] har bekrevet fordeler og ulemper ved ulike form av faseendringene slik. Ved faseovergang fra fast til fast er det generelt lite latent varme som blir lagret og lite volum endring for materialet. Med faseovergang fra fast til gass og væske til gass gir det generelt mye mer latent varme, men det fører til mye større volumendring som gjør det komplisert og upraktisk i bruk [12]. Faseovergang fra fast til væske har derimot relativt mindre latent varme sammenligne med væske til gass. Denne faseovergangen har også mindre volumendring, 10% eller mindre av materialets volum, derfor er faseovergang fra fast til væske mer attraktiv for bruk i lagringssystemer for termisk energi [10].

Som det er nevnt innledningsvis har latent varmelagring større fordel sammenlignet med følbar varmelagring. Med latent varmelagring er det mulighet for å lagre større energimengder på grunn av høye energitetthet. Ved et gitt temperaturområde kunne 5-14 ganger mer varme per materialsvolum lagres som latent varme sammenligne med følbar varme [13].

Smeltetemperatur på PCM kan modifisere slik at den kan tilpasse ulike bruksområder. Når PCM med et bestemt smeltepunkt implementeres i bygning vil materialet begynne å smelte når innetemperaturen overstiger materialets smeltepunkt. PCM vil lagre den varmen gjennom faseendring samt begrenser innetemperaturen i bygning til å fortsette å øke. Ved å velge PCM med smeltepunkt rundt ønsket komforttemperatur, kan PCM bidra til mer stabilt og behagelig termisk inn klima, samtidig reduserer kjøle- og oppvarmingsbehovet i bygget [8].

2.2.1 Innkapslet PCM

De fleste PCM som benyttes i bygning er ofte designet for å gjennomgå flytende fase, derfor ble PCM innkapslet for å unngå lekkasje og spredning av materialet på overflatene på grunn av lav viskositet til PCM [14]. To metoder benyttes til innkapsle av PCM er mikro- og makroinnkapsling, disse metodene vil påvirke hvordan PCM kan implementeres i bygningsmaterialer og overflatene på grunn av ulike størrelser og former [6]. I tillegg bør man ta hensyn når PCM inngår faseendring. Dersom det vil føre til endring av volum og termisk konduktivitet på PCM, samt at store volumendringer kan legge mye press på innkapslingsmaterialet [6]. Markoinnkapsling av PCM vil ikke bli diskutert videre i denne oppgaven

Mikroinnkapsling

Ved mikroinnkapslingsmetode ble PCM innkapslet i små kapsler med størrelse fra $1\mu\text{m}$ til $300\mu\text{m}$ [15]. På grunn av liten størrelse på kapslene kan mikroinnkapslet PCM komme i form av pulver eller i væskeblanding [6]. Kalnaes et al. [6] har bekreftet fordeler og ulemper med mikroinnkapsling av PCM slik. Fordelen er at den kan blandes direkte i bygningsmaterialer som betong og gips uten risiko for lekkasje, samt at PCM kan utvide seg i volum uten å påvirke konstruksjonen. Ulempen med å tilsette mikroinnkapslet PCM direkte i bygningsmateriale er at den kan svekke materialets styrke og på grunn av det tilsatte innkapsletmaterialet vil mikroinnkapslet PCM få lavere varmelagringskapasitet per enhetsvolum sammenlignet med PCM alene.

2.3 Termisk komfort

Termisk komfort er en subjektiv følelse eller sinnstilstand der mennesker føler tilfreds med de termiske omgivelser [16]. Seks faktorer som påvirker hvordan mennesker oppfatter det termisk komfort er følgende [17].

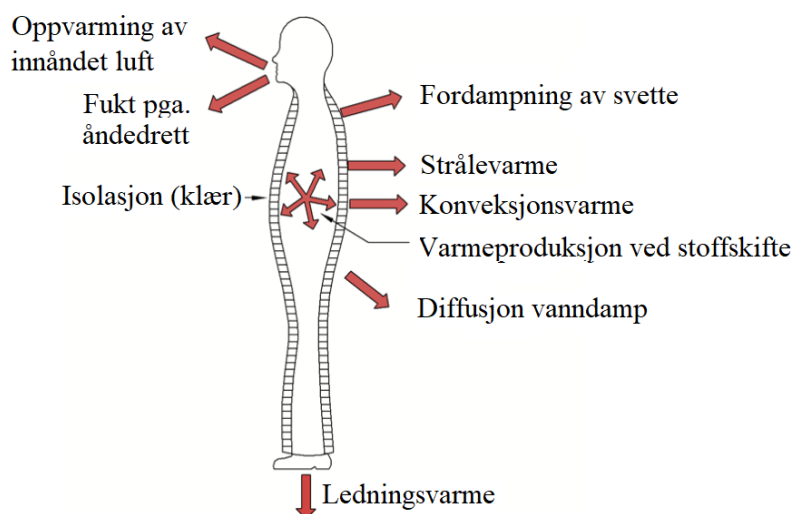
- Lufttemperatur rundt kroppen er en viktig faktor for vurdering av termisk komfort.
- Stråletemperatur eller overflatetemperatur fra overflatene i rommet.
- Lufthastighet rundt kroppen.
- Relativt luftfuktighet i rommet.
- Personens aktivitetsnivå.
- Personens bekledding.

I tillegg kan termisk komfort bli påvirket til en viss grad av alder og kjønn, sinnstilstand, oppholdstid, tretthet, sult og fordøyelser [17].

Kroppens varmebalanse

Kroppens varmereguleringsystem sørger for å holde en konstant kjerne temperatur på 37-38°C, hvis kjernetemperaturen på kroppen synker eller øker mer enn 0,5°C vil det oppstå ubehag [16]. Byggforsk 421.501 [18] har beskrevet to betingelser som må oppfylle for at kroppen skal holde en god termisk komfort. Disse er følgende

- Kjernetemperatur i kroppen og hudtemperatur skal gi en følelse av termisk nøytralitet, det betyr at kroppen ikke ønsker høyere eller lavere temperatur.
- Den varmen kroppen produserer må være like den varmen kroppen avgir til omgivelse. Figur 2.2 viser ulike former for varmtap fra kroppen til omgivelse.



Figur 2.2: Varmetap for menneskekropp. Hentet fra Byggforsk.no [18].

Varmeveksling mellom kroppen og omgivelse skjer ved følgende måter [16].

Stråling: Når varmen stråler fra kroppen til overflater med lavere temperatur eller at kroppen tar imot varmen fra overflater med høyere temperatur.

Konveksjon: Når varmen transporterer til eller bort fra kroppen med luften i omgivelsene. Lufthastighet, bekledding og lufttemperatur har stor betydning for varmeutvekslingen.

Fordusting og diffusjon: Når varmen fjernes fra huden i form av svette via diffusjon eller fordamping og respirasjon.

Ledningsvarme: Når varmen ledes til eller fra kroppen via direkte kontakt med overflater med høyere eller lavere temperatur, som bord, gulv eller stol.

2.3.1 PMV- og PPD-indeks

PMV-indeks

PMV står for Predicted Mean Vote og er en indeks utarbeidet av P. O. Fanger. PMV-indeksen forutsier den gjennomsnittlige vurdering for de termiske klimafaktorene av en gruppe menneske, og hvordan de oppleves utifra en skala på 7 nivåer fra kaldt til veldig varmt [19]. Ved vurdering nøytral eller 0, betyr at personene ikke ønsker å ha omgivelsene varmere eller kaldere [16].

Tabell 2.1: PMV-indeks

Kaldt	Kjølig	Litt Kjølig	Nøytral	Litt varmt	Varmt	Veldig Varmt
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

PPD-indeks

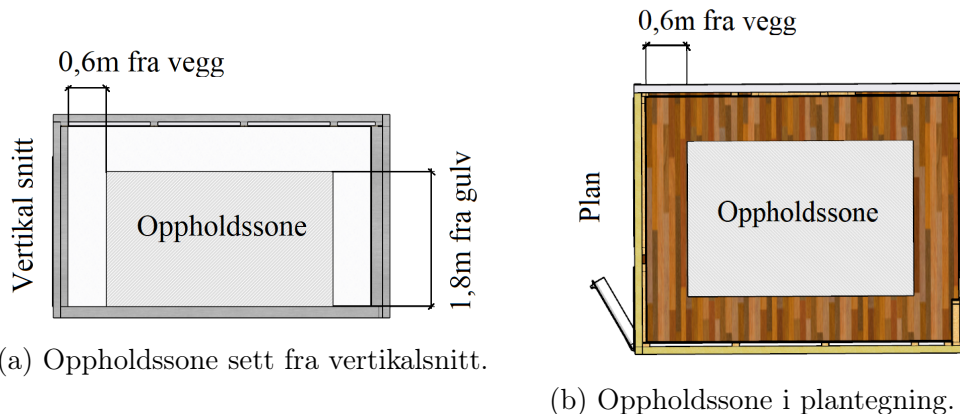
PPD står for Predicted Percentage of Dissatisfied. PPD-indeks forutsi hvor stor andel av menneskene i gruppen vil være misfornøyd med det termiske inn klima ved en gitt bekledding og aktivitetsnivå [18]. PPD kan regnes eller leses av grafen ved en viss PMV-indeks. Minste PPD-indeks kan ikke bli lavere enn 5% dersom det vil alltid være noen som er misfornøyd. NS-EN ISO 7730 [20] beskriver uttrykkene for beregning av PMV- og PPD-indeks.

Når PMV verdi er bestemt kan PDD beregnes med denne formelen.

$$PPD = 100 - 95 \exp(-0,03353PMV^4 - 0,2179PMV^2) \quad (2.1)$$

2.3.2 Oppholdssone

Oppholdssone definert av SINTEF Byggforsk [18] er område 0,6m fra veggene og 1,8m over gulvet. Figur 2.3 viser oppholdssone sett fra vertikalsnitt og i plan. Kravene til det termiske komfort vil gjelde i den definerte oppholdssonen.



Figur 2.3: Oppholdssone sett fra ulike perspektiv.

2.3.3 Operativ temperatur

Operativ temperatur er kombinert innvirkning av lufttemperatur og middelstrålingstemperatur. Operativ temperatur er den oppfattet temperaturen eller den temperaturen mennesker føler når man blir eksponert for overflater eller kilder med annen temperatur enn lufttemperatur [18]. Operativ temperaturen den viktigste faktor for vurdering av termisk komfort.

I følge Arbeidstilsynets Veiledning 444 [21] ved for høy temperatur vil det redusere våkenhet og arbeidsevne. Dette kan føre til økte utgifter for virksomheten i form av redusert ytelse, økt sykefravær og arbeidulykker. Arbeidstilsynet anbefaler å holde operativ temperatur mellom 19-26°C for aktivitetsgruppe med lett arbeid.

Forutsatt at lufthastighet er lavere enn 0,2 m/s kan operativ temperatur beregne ved å benytte formel 2.2.

$$T_{op} = (T_L + T_r) * 0,5 \quad (2.2)$$

Der:

- T_l : Lufttemperatur ved betraktningpunktet [°C]
- T_r : Middelstrålingstemperatur [°C]
- T_{op} : Operativ temperatur [°C]

Middelstrålingstemperaturen kan beregnes ved å benytte formel 2.3 eller 2.4.

Middelstrålingstemperatur

Middelstrålingstemperatur er den gjennomsnittlige strålingstemperaturen som er avgitt av alle overflatene i rommet veid ut ifra flatestørrelse sett fra betraktningpunktet [18]. Formel 2.3 under kan benyttes for beregning av middelstrålingstemperatur.

$$T_r^4 = T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \dots T_n^4 F_{p-n} \quad (2.3)$$

Der:

T_n : Overflatetemperatur av overflate n [°C]
 F_{p-n} : Vinkelfaktor fra betraktningpunkt og overflate n
 T_r : Middelstrålingstemperatur [°C]

Vinkelfaktor for overflatene veid ut fra betraktningpunktet kan beregnes etter metode gitt i NS-EN ISO 7726 [22].

En annen forenklet metode for beregning av middelstrålingstemperatur gitt av Byggforsk: 421.501 [18] er formel 2.4, forutsatt at globetemperatur er målt ved 0,6m høy.

$$T_r = T_g + 2,2(T_g - T_l)(V^{0.5}) \quad (2.4)$$

Der:

T_g : Globe temperatur målt ved 0,6m [°C]
 T_l : Gjennomsnittlig lufttemperatur [°C]
 V : Gjennomsnittlig lufthastighet [m/s]
 T_r : Middelstrålingstemperatur [°C]

2.3.4 Relativ luftfuktighet

Relativ luftfuktighet er et mål på forholdet mellom vanndamp i luften og den maksimale vanndampen luften kan innholde [23]. Arbeidstilsynets veiledning 444 [21] beskriver den variasjon på relativ luftfuktighet ved normale forhold vil være mellom 20% til 60%, og ved vintertid bør ikke luftfuktighet overskrides 35-40%, ettersom det kan øke risiko for kondens og fuktskade. For lav luftfuktighet kan føre til rask fordunsting av fukt på huden som gjør at luften kjennes kaldere [16]. Uteluften er avgjørende for fuktighetsinnholdet i bygninger ettersom uteluften benyttes til å ventilere med [24].

2.3.5 Lufthastighet

Ved høy lufthastighet i oppholdssone kan det føre til ubehagelig lokal kjøling av kroppen eller trekk. Spesiell i ansikt, hender og nedre del av beina som er naken hud og er veldig følsomme for dette [18]. For å unngå ubehagelig lokal kjøling på kroppen setter Arbeidstilsynets Veiledning 444 [21] krav for lufthastighet i oppholdssone til å ikke overstige 0,15m/s.

2.3.6 Lokal termisk ubehag

PMV- og PPD-indeks beskriver den termiske komforten for kroppen som helhet. Selv om kroppen opplever den termiske nøytraliteten ved å ikke ønske høyere eller lavere temperatur kan lokal termisk diskomfort fortsatt oppstå. Standard NS-EN ISO 7730 [20] beskriver hvordan vurderinger på de ulike lokale termisk ubehag kan gjennomføre ved å estimere antall misfornøyde i prosent. I denne oppgaven vil ikke lokal termisk ubehag vurderes.

2.3.7 Krav og vurdering av termisk inneklima

Krav til termisk inneklima er satt i henhold til Arbeidstilsynets Veiledning 444 [21], der operativ temperaturen ikke skal overskride 26°C. I tillegg blir PMV- og PPD-indeks beskrevet i tabellen A.1 i NS-EN ISO 7730 [20] tatt med i betraktning for vurdering av det termiske inneklimate, se tabell 2.2.

Tabell 2.2: Kategorisering av termisk inneklima iht NS-EN ISO 7730

Kategori	Termisk tilstand av kroppen som helhet	
	PPD [%]	PMV
A	6	-0,2 PMV +0,2
B	10	-0,5 PMV +0,5
C	15	-0,7 PMV +0,7

Vurderinger av parametere gjort i form av klassifisering av ulike kategorier, A, B og C, der kategori er A er den beste kategorien. For å tilfredstille en kategori må alle parametere i den spesifikke kategorien oppfylles.

2.4 Nøyaktighetsvurdering av simuleringsmodell

Etter at kalibrering av modellen ble gjennomført er det en annen en viktig prosess, som innebærer å validere modellen for å vurdere kvaliteten til kalibreringen. Beregningene er basert på tidstrinn og det kan være tilfeller der en simuleringsmodellen ble kalibret med lav oppløsning. Disse beregningene kan derfor benyttes til å vurdere nøyaktighet mellom de simulerte og målte data.

RMSE: Root Square Mean Error

RMSE-indeks brukes som mål på nøyaktighet mellom de modellerte data og observerte data. RSME-indeks blir aldri negativ og verdi nærme 0 indikerer ingen avvik mellom datasettene. RMSE-indeks kan ikke brukes til å sammenligne to datasett, fordi RMSE-indeks er skalaavhengig [25].

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i^m - x_i^s)^2}{n}} \quad (2.5)$$

Der:

x_i^m : Observerte data
 x_i^s : Modellert data eller estimator
 n : Antall datapunkter

NRMSE: Normalized root-mean-square

NRMSE-indeks er mål på nøyaktighet mellom de modellerte data og observerte data. NRMSE kan bruke til å sammenligne mellom to ulike datasett, fordi det er ikke skalaavhengig. Verdi nærme 0 indikerer ingen avvik mellom datasettene, noe som er umulig å oppnå.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{(x_{maks}^m - x_{min}^m)} 100\% \quad (2.6)$$

Der:

x_{maks}^m : Høyeste observertverdi i datasettet
 x_{min}^m : Laveste observertverdi i datasettet

CVRMSE: Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error

CVRMSE-indeks brukes til å sjekke avviket til de målte dataene fra det simulerte resultatet med observerte verdier. Vurdering av simuleringsmodell med CVRMSE-indeks bli gjennomført iht. ASHRAE Retningslinje 2017 [1].

$$CV(RMSE) = \frac{1}{x_s^m} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i^m - x_i^s)^2}{n}} 100\% \quad (2.7)$$

Der:

x_i^m : Observerte data
 x_i^s : Modellert data eller estimator
 x_s^m : Snitt verdi for observerte data
 n : Antall datapunkter

Kapittel 3

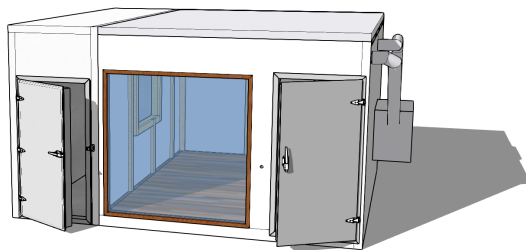
Eksperimentell metode

3.1 Måling av kjølevirkning av PCM-sparkel i klimarom

I denne oppgaven ble det utført et laboratorieeksperiment med sparkel som inneholder innkapslede mikropartikler av PCM. Hensikten var å finne ut hvor mye temperaturreduksjon som kan oppnås med PCM-sparkelen. PCM-sparkelen brukes i bygninger ved å smøre direkte på overflater som vegg- og himlingoverflater. Deretter skal PCM-sparkelen ha et tynt lag hvit maling for beskyttelse og en penere overflate. Informasjon om denne PCM-sparkelen er begrenset ettersom produktet fortsatt er i utviklingsstadiet.

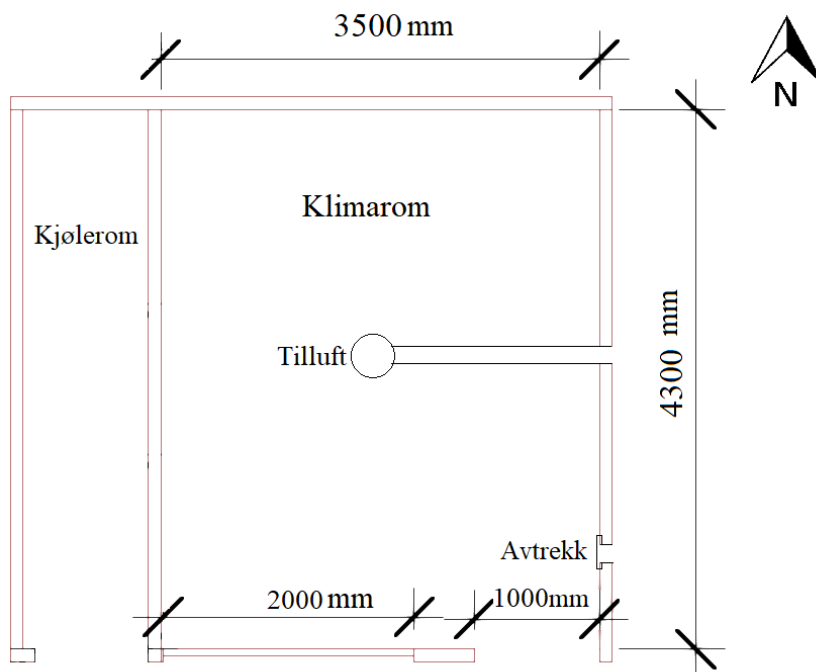
Måling ble utført i et klimarom som etterlignet et cellekontor med varmetilskudd som tilsvarte en varm sommerdag. Målinger ble utført på to identiske cellekontorer, med og uten PCM-sparkel. Dette kapitlet drøfter hvordan eksperimentet ble utarbeidet og gjennomført.

3.1.1 Klimarom

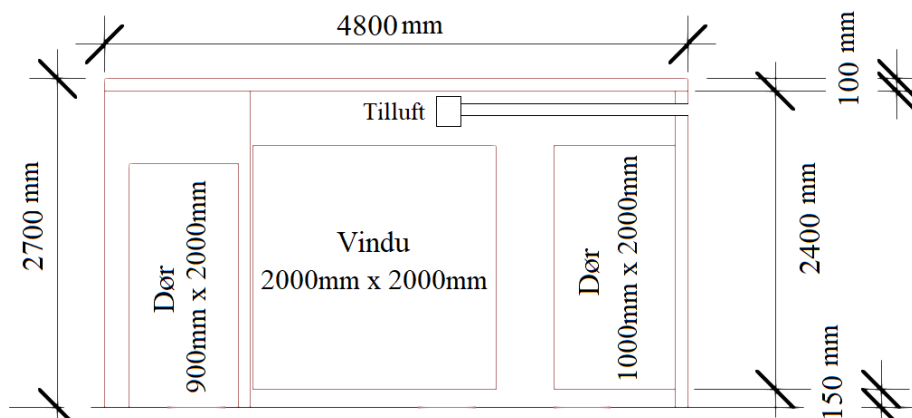


Figur 3.1: Illustrasjon av klimarommet benyttet til eksperiment

Eksperimentet ble utført i klimarom PH856 som befant seg på OsloMet ved Pilestredet 35. Klimarommet hadde indredimensjon på $3,5m$ bred, $4,3m$ lang og $2,4m$ høy, med gulvareal på $14,6m^2$ og volum på $35m^3$. På den sørvendte vegg var et stort trelags glassvindu på $2m*2m$ med en standard kjøleromsdør på $2m*1m$ montert på høyre siden av vinduet, se figur 3.1. Plantegning av klimarommet og snittegning av sørveggen er vist i figur 3.2 og 3.3.



Figur 3.2: Plantegning av klimarommet



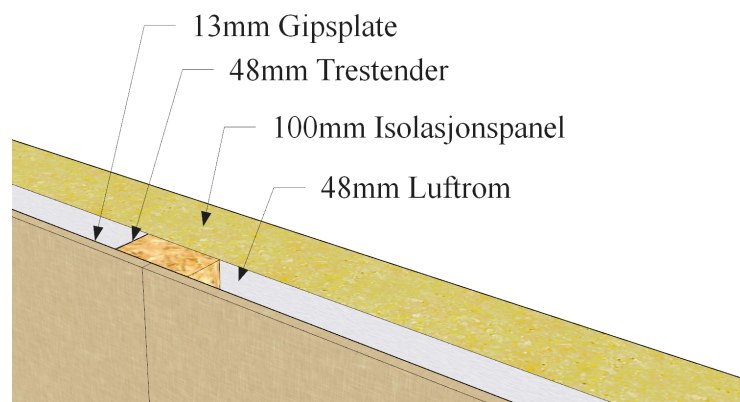
Figur 3.3: Snitttegning av klimarommet sett fra sørvendte vegg

Ventilasjon

Klimarommet hadde et ventilasjonsaggregat montert på siden av klimarommet, se figur 3.1. Ventilasjon i klimarommet var balansert med omrøringsventilasjon der tilluftsventilen var plassert med høyde på 2,2m midt i rommet. Avtrekket var plassert 1,8m fra tilluftsventilen med høyde på 2,2m. Plasseringen av ventilasjonsventilene er vist i plantegningen, figur 3.2. Ventilasjonsaggregatet hadde en roterende varme-gjenvinner, et elektrisk varmebatteri og et kjølebatteri. Innstillinger for luftmengde, driftstid og temperatur kunne gjøres via et kontrollpanel.

Vegg og takkonstruksjon

Vegg, tak og gulvkonstruksjon for klimarommet var bygget av Fresvik [26] isolasjonspanel. Isolasjonspanelet var 100mm tykt, med overflate av aluminium og polyester som isolasjon. Produktdatabladet fra Fresvik opplyste at isolasjonspanelet hadde en total U-verdi på $0,22\text{ W/m}^2\text{K}$ [26].



Figur 3.4: Oppbygging av vegg og tak med isolasjonspanel, trestendere og gips

Gipsplater med størrelse $2,4\text{m} \times 2\text{m}$ og tykkelse på 13mm ble tilpasset og montert på vegger og himling i klimarommet, slik at PCM-sparkelen kunne smøres på. Trestendere med tykkelse på $48\text{mm} \times 98\text{mm}$ ble brukt til å lage rammer for montering av gipsplater. Etter at gipsplatene var installert, ble vindhastighetmåler (Swema3000) brukt til å gjennomgå luftlekkasje mellom gipsplatene. Ved å måle på lufthastigheten i mellomrommet på gipsplater, kunne luftlekkasje lokaliseres når endringen i lufthastigheten skjedde drastisk. Eventuelle luftlekkasje mellom gipsplatene ble tettet med Gaffateip. Figur 3.5 viser hvordan klimarommet ble bygget opp med trestendere og gipsplater.



Figur 3.5: Klimarom med og uten gipsplater

3.1.2 Etterligning av cellekontor i klimarom

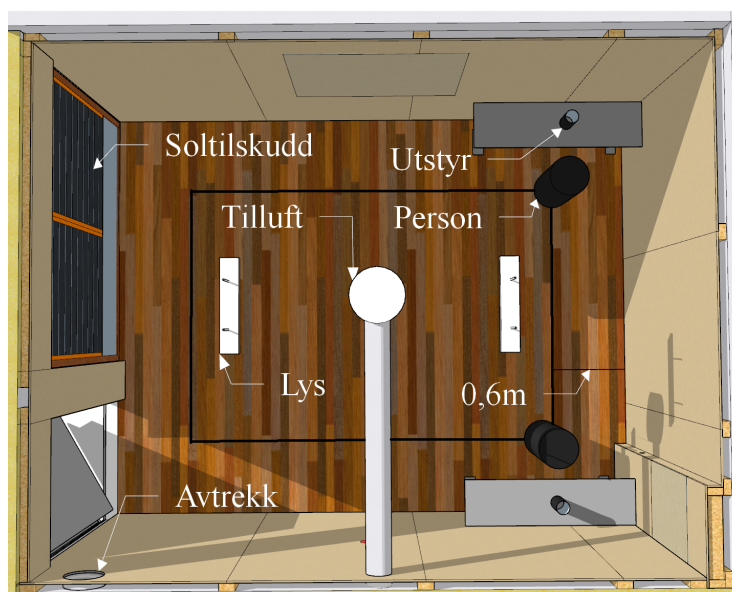
Klimarommets hensikt var å gjenskape temperaturutviklingen i et cellekontor på en typisk sommerdag i Oslo. Antagelser og valg av driftstid, intern-varmetilskudd og ventilasjon i klimarommet ble gjort iht Byggteknisk forskrift (TEK17), Arbeidstilsynets veiledning, ASHRAE Fundamentals Handbook. Ekstern-varmetilskudd ble estimert ved hjelp av dynamisk simulering.

Driftstid og ventilasjon

Cellekontorets driftstid i eksperimentet ble forenklet og antatt å være fra 08.00 til 18.00. Dette betyr at alle varmetilskuddene i klimarommet ble aktivert klokken 08:00 og ble deaktivert klokken 18:00. Utenfor driftstiden fra kl. 18:00 til 08:00 ble ventilasjonaggregatet stilt inn på nattkjølingsmodus for nedkjøling av PCM-sparkelen i klimarommet. Forenklingen av driftstiden ble gjort for å unngå samtidig oppvarming og nedkjøling av rommet og begrense kompleksiteten av tolkningen av temperaturmålingene.

Tilluftsluftmengde ved driftstiden ble hentet fra preakseptert verdi iht. Tek17 § 13-3 [27]. Kravet til tilførsel av frisk luft på grunn av forurensning fra materialet var $2,5m^3/tm^2$ og luftmengde for personbelastning var $36m^3/t$ per person. Tillufttemperatur-settpunkt under driftstid ble satt til $19^\circ C$ for å unngå nedkjøling av klimarommet og for å opprettholde god omrøring av tilluften. Tilluftsluftmengde for nattventilasjon ble satt til på $250m^3/t$ med tillufttemperatur-settpunkt på $15^\circ C$. Dette var for å sikre tilstrekkelig avkjøling og størkning av PCM-materialet ved kl. 08:00. Størkningstemperaturen på PCM-materialet er oppgitt av produsenten til å være $18^\circ C$.

Plassering av varmetilskudd



Figur 3.6: Oppsett av klimarommet med plassering av varmetilskuddene

Figur 3.6 på forrige side viser en oversikt over plasseringen av varmetilskudd for eksperimentet. Oppholdssonen i klimarommet er markert med svarte streker $0,6m$ ut fra veggene. Det var forestilt et scenario der to personer i cellekontor satt og jobbet hver for seg med ryggen mot hverandre. Begge personene skulle sitte $0,6m$ vekk fra vegg, foran et bord med en bærbar datamaskin. For at lyset skulle bli godt fordelt over hele rommet, ble glødelysstoffrørene hengt opp på hver side av tilluftsventilen med lik avstand fra hverandre. Varmematten som ble brukt til soltilskudd ble hengt opp på vinduet på sørveggen.

Varmetilskudd fra personbelastning

Arbeidstilsynet [28] setter et minimum gulvareal for arbeidsplass på $6m^2$ per person. Etter at klimarommet var ferdig bygget med stendere og gips var størrelse på gulvareal $14,1m^2$. To personer ble derfor beregnet å være i rommet i drifttiden.

Som nevnt i kapittel 2.3 skjer varmeveksling mellom menneskekropp og omgivelse på fire måter: ved stråling, konveksjon, fordunstning og varmeledning. Eksempler på fordeling av varmeavgivelse og væsketap for en person ved forskjellige romtemperatur er vist i tabell 3.1, der en større andel av varmetapet skjer ved stråling.

Tabell 3.1: Varmetap for stillesittende person med normal bekledning [16].

Romtemp [°C]	Totalt [W]	Konveksjon [W]	Stråling [W]	Fordunstning [W]
15	130	45	65	20
20	120	35	60	25
25	120	15	60	45
30	120	-8	58	70

I et eksperiment utført av Thunshelle et al. [29] ble oppvarming via tilluftsventil ved lavt oppvarmingsbehov undersøkt. I eksperimentet ble det benyttet ventilasjonskanal for imitere personbelastning, på tilsvarende vis ble det brukt ventilasjonskanal i dette eksperimentet. Ventilasjonskanalene hadde en blank overflate med lav emissivitet og ble malt med matt-svart maling på innsiden og utsiden for å øke emissiviteten, figur 3.7. Ventilasjonskanalen hadde en diameter på $315mm$ og en høyde på $1000mm$. I dette eksperimentet ble varmetveksling via fordunstning, som latent varme for personbelastning, ikke tatt hensyn til. Varmeavgivelse fra personbelastning var forutsatt til å være $90W$ for lett aktivitet i et kontor med normal bekledning. To glødepærer ble brukt i ventilasjonskanalen som varmeskilde.



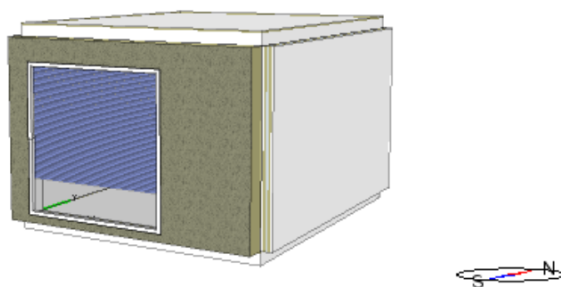
Figur 3.7: Ventilasjonskanal og lyspære brukt som varmetilskudd fra person og utstyr

Varmetilskudd fra belysning og utstyr

For belysning på cellekontoret ble fire glødelysstoffrør hengt opp på himling, som representerte varmetilskudd fra belysning. Glødelysstoffrør var godt fordelt i klimarommet slik at hele rommet ble opplyst, se figur 3.6. Utstyr i cellekontoret var forutsatt til å være en bærbare-PC per person, med antatt to personer i et cellekontor førte dette til to bærbare-PCer. Matt-svart ventilasjonskanal med glødepære ble også benyttet å fremstille varmeavgivelse tilsvarende bærbare-PC. Typisk varmetilskudd fra PC-utstyr er $58W$ [30].

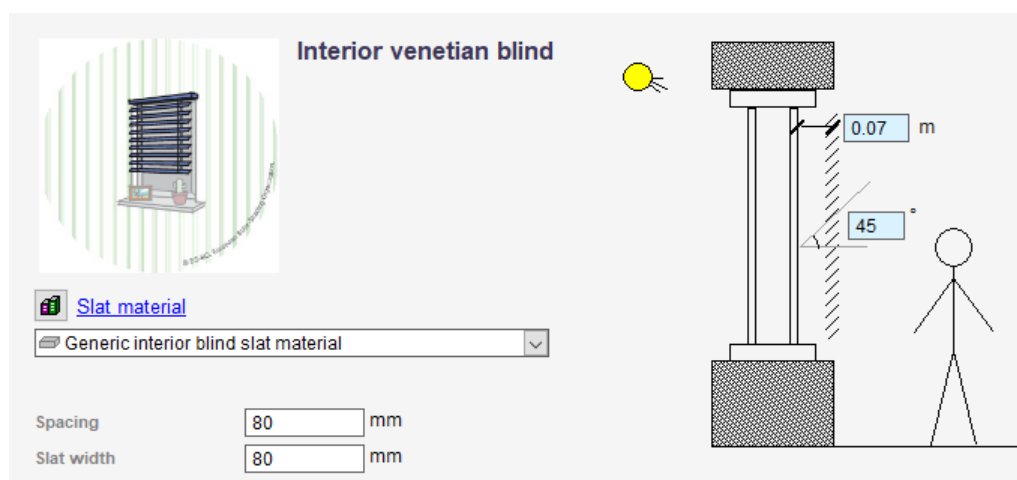
Ekstern-varmetilskudd

Ekstern-varmetilskudd til klimarommet ble antatt å være solvarmetilskudd tilført gjennom vinduet plassert på sørveggen. Vinduet hadde en størrelse på $2m*2m$ med indre solskjerming. Indre solskjerming ble valgt over ytre solskjerming for å motta så mye varme som mulig.



Figur 3.8: IDA-ICE modell av klimarommet for estimering av soltilskudd

Estimering av solvarmetilskudd ble utført med simuleringstøytø IDA-ICE. Simuleringsmodellen var en forenklet representasjon av klimarommet, modellert med riktig volum, vindusareal og indre solskjerming, se figur 3.8. IDA-ICE har implementert en funksjon for modellering av forskjellige typer solskjerming, og beregning av den totale g-verdien for vinduet og den modellerte solskjermingen.



Figur 3.9: Modellering av indre solskjermingen i IDA-ICE

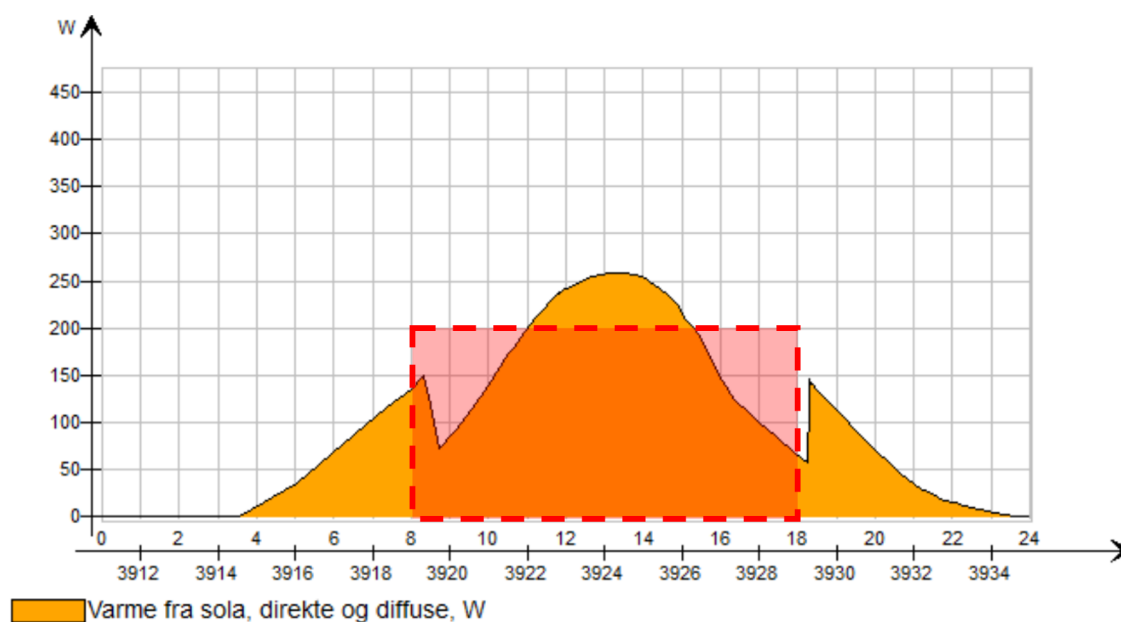
G-verdi er et mål på hvor mye solvarme som blir sluppet inn gjennom en bygningskonstruksjon. Ved høy g-verdi for et vindu vil mer solvarme passere gjennom. Figur 3.9 viser indre solskjerming som var modellert i IDA-ICE og figur 3.10 viser den beregnede totale g-verdien for vinduet med og uten solskjerming. Solskjermin-gen ble kontrollert med automatisk styring slik at solskjermen gikk opp eller ned i forhold til hvor mye av sollyset som slapp inn gjennom vinduet.

	Without shading	With shading
Solar heat gain coefficient (g)	0.528	0.461
Solar transmittance (t)	0.386	0.157
Visible transmittance	0.694	0.284
U-value	1.127	1.066
Diffusion factor	0.0	0.282

Figur 3.10: Resultatet av beregning av g-verdi i IDA-ICE

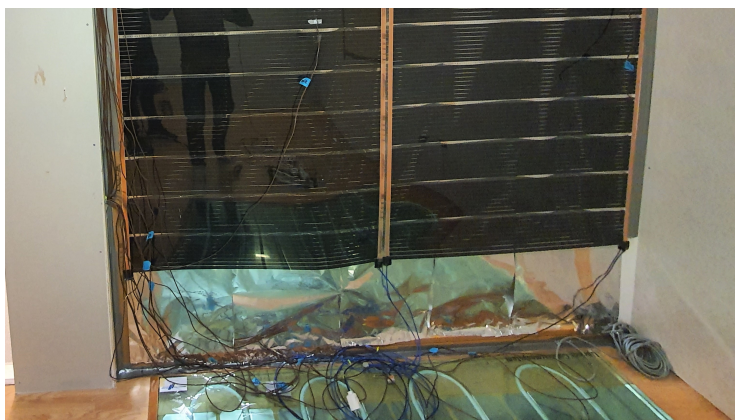
Simulering ble gjennomført med klimadata for Oslo-Gardermoen for hele juli perioden. Grafen i figur 3.11 viser resultatet fra simuleringen som representerer det gjennomsnittlige solvarmetilskuddet for hele juli perioden. Resultatet i figur 3.11 ble derfor brukt til å representere det totale varmetilskuddet fra solen i klimarommet. På grunn av praktiske begrensninger ble varmetilskuddet fra solen utført med varmematte med konstant varmeeffekt. For at den totale energitilførselen i tidsperioden 08:00-18:00 i klimarommet skulle samsvare med totale energitilførsel ved soltilskudd i simulering, var en varmematte med 200W den beste løsningen.

Området skravert med rødt i figur 3.11 illustrerer den totale energitilførselen i klimarommet ved i tidsperioden 08:00-18:00.



Figur 3.11: Resultatet fra estimering av soltilskudd med Oslo-klimadata

Varmematte ble hengt opp ved vinduet på innsiden av klimarommet som vist i figur 3.12. Aluminiumsfolie ble hengt mellom vinduet og varmematten for å minimere varmetap ved stråling gjennom vinduet.



Figur 3.12: 200W varmematten benyttet for soltilskudd

Eksperiment parametere

Tabellen 3.2 nedenfor lister opp parametere som ble brukt for dette eksperimentet. Som nevnt innledningsvis var intensjonen å etterligne et cellekontor i klimarommet med hensyn til å benytte verdier i henhold til gjeldende veiledning og krav. På grunn av begrensninger på utstyr og materialer ble det besluttet å bruke de nærmeste verdiene. Varmetilskuddene i klimarommet ble kontrollert med tidsur.

Tabell 3.2: Oversikt over parametrene som ble brukt i eksperimentet

Netto størrelse på klimarom med gipsplate og trestender						
	Vegg		Gulv	Himling	Vindu	Dør
	Nord/sør	Øst/vest				
Lengde [m]	-	4,178	4,178	4,128	-	-
Bredde [m]	3,378	-	3,378	3,378	2	1
Høyde [m]	2,339	2,339	-	-	2	2
Areal [m ²]	7,9	9,8	14,1	-	4	1
Ventilasjon settpunkt						
Temperatur [°C]	Luftmende [m ³ /t]		Driftstid			
19	135		08:00-18:00			
15	250		18:00-08:00			
Varmetilskudd						
	Effekt [W]	Antall	Totalt [W]	Driftstid		
Person	90	2	160	08:00-18:00		
Utstyr	60	2	120	08:00-18:00		
Belysning	58	2	118	08:00-18:00		
Soltilskudd	200	1	200	08:00-18:00		
Sum			598			

Total effekt tilført i klimarommet har blitt kontrollert med energimåler.

3.1.3 Utstyr

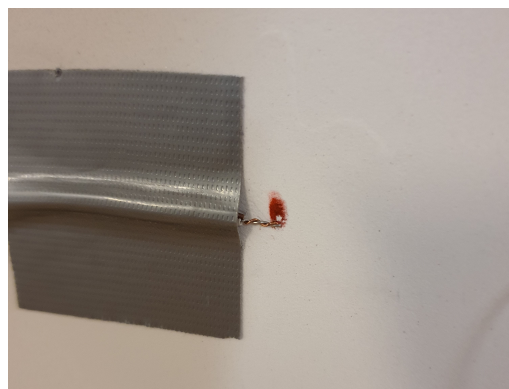
Intab PC-Logger 3100i

PC-Logger 3100i fra Intab ble brukt til måling og logging av luft- og overflate-temperatur. Instrumentet hadde 24 innganger og brukte termoelementer som temperaturfølere. I dette prosjektet ble det brukt *grade wire* termoelementet Type T [31] som besto av kobber og nikkel.

Termoelement fungerer slik, det er to forskjellige typer metaller som tvinner seg sammen og skaper et krysspunkt med hverandre, se figur 3.13b. ved forskjellige temperaturer genereres termoelektriske spenninger ved dette krysspunktet [32]. Den andre enden av termoelementet kobles til inngangen til instrumentet som registrerer den termoelektriske spenningen og oversetter dette til temperatur. Ved å stille inn spenningsinngangsområdet på inngangene til Intab PC-logger 3100i til $\pm 50mV$ og bruker dette med termoelement type T, ble oppløsning på temperaturmålingen på $0,1^{\circ}C$ og nøyaktighet på $\pm 1,5^{\circ}C$ [33].



(a) Intab PC-Logger 3100i



(b) Termoelement type T

Figur 3.13: Utstyr for logging og måling av temperatur

Målingene på alle inngangene ble logget hvert minutt. Dette var for å sikre tilstrekkelig observasjon av temperaturendringene. Resultatene fra målingene ble lagret i internminnet på Intab PC-logger som senere ble eksportert som .txt-fil via programvaren EasyView for videre behandling av data. PC-logger ble kalibrert av produsenten før eksperimentene ble utført.

INNOVA 1221 Thermal Comfort-logger

I tillegg til PC-Logger 3100i ble INNOVA 1221 Thermal Comfort-logger brukt som reservemåling. Thermal Comfort-logger kunne måle og logge parametere for termisk komfort som operativ temperatur, lufthastighet og relativt luftfuktighet. Basert på målingene kunne instrumentet beregne PMV- og PPD-indeks utifra ønsket bekleddning og aktivitetsnivå. Produsenten av instrumentet oppga at beregningen av indeksene var i henholdt til ISO 7730 [34].

Swema3000

Swema3000 er et håndholdt instrument som hovedsakelig ble brukt til logging og måling av lufthastighet. Dette instrumentet kan kobles til forskjellige følere. SWA03-følere i figur 3.14a ble brukt til å måle og logge lufthastighet i klimarommet. SWA03-vindhastighetfølere er retningsuavhengige og kan måle lufthastighet i alle retninger.



(a) SWA03 Retningsuavhengig



(b) Swema3000 Lufthastighetsmåler

Figur 3.14: Utstyr benyttet til måling og logging av lufthastighet

I tillegg til logging av vindhastighet, ble Swema3000 brukt til å regulere luftmengden for tilluft og avtrekk i klimarommet. Instrumentet ble koblet til målekorset i ventilasjonskanalene via to slanger hvor luftmengden ble avlest direkte fra målekorset.

Nøyaktighet og måleområde for måleutstyr

Tabell 3.3: Måleområde og nøyaktighet på instrumentene gitt av produsentens datablad [33], [35]–[38]

Instrument	Føler/Sensor	Måleparametere	Måleområde	Oppløsning	Nøyaktighet
PC-Logger Intab 3100i		Eletriskspenning	$\pm 50\mu V$	$\pm 2\mu V$	$\pm 400\text{ppm}^*$
	Termoelement Type T	Lufttemperatur Overflatetemperatur	-270 til 370°C	0,1°C	$\pm 1,5^\circ\text{C}$
Innova 1221 Thermal Comfort	-	-	-	-	-
	MM0060	Operativ Temperatur	-20 til 1000°C	0,1°C	$\pm 0,3^\circ\text{C}$
	MM0038	Lufthastighet	0 til 10m/s	-	$\pm 0,05\text{m/s}$
	MM0037	Luftfuktighet	-20 til 100°C	0,1°C	$\pm 0,05\text{K}$
Swema3000	-	-	-	-	-
	SWA03 Retningsuavhengig	Lufthastighet/ Trekk	0,05-3m/s	-	$\pm 0,04\text{m/s}$
	SWA31 Anemometer	Lufthastighet	0,1-10m/s	-	$\pm 0,05\text{m/s}$

*ppm er en forkortelse for parts per million [39].

Oversikt over nøyaktigheten og måleområdet for instrumentene er listet opp i tabell 3.3 ovenfor. Informasjon og tekniske data listet i tabellen ble hentet fra produsentens datablad.

3.1.4 Tilrettelegging og måling

Måleplan

Måleplan utarbeidet for dette eksperimentet er vist tabell 3.4 nedenfor. Måleplan viser måleparametere, formål med måleparametere og utstyr som brukes til målingene.

Tabell 3.4: Måleplan for eksperimentet

Hva	Hvor	Hensikt	Utstyr
Lufttemperatur	Oppholdssone	Beregning av operativ temperatur	Termoelement type T Intab PC-logger 3100i
		Analysere PCM innflytelse på temperatur	
	Vurdering av termisk komfort		
	Utenfor Klimarommet	Observere omgivelsetemperatur	
	Tilluftsventil	Varmebalanse	
	Avtrekkventil	Varmebalanse	
Overflatetemperatur	Veggene, 5 punkter	Beregning av operativ temperatur	Termoelement type T Intab PC-logger 3100i
		Observere PCM temperatur	
	Himling, 5 punkter	Beregning av operativ temperatur	
		Observere PCM temperatur	
	Gulv, 5 punkter	Beregning av operativ temperatur	
	Vindu, 1 punkt	Beregning av operativ temperatur	
	Dør, 1 punkt	Beregning av operativ temperatur	
Operativ temperatur	Oppholdssone	Reserve måling Validere beregnet operativ temperatur	INNOVA 1221-PC-Logger MM0060
Relativt luftfuktighet	Oppholdssone	Vurdering av termisk komfort	MM0037
Lufthastighet	Oppholdssone	Vurdering av termisk komfort	Swema 3000 SWA03
	Øst- og Sør- vegg	Konveksjon	

Måling og logging av tillufts- og avtrekkstemperatur og luftmengde

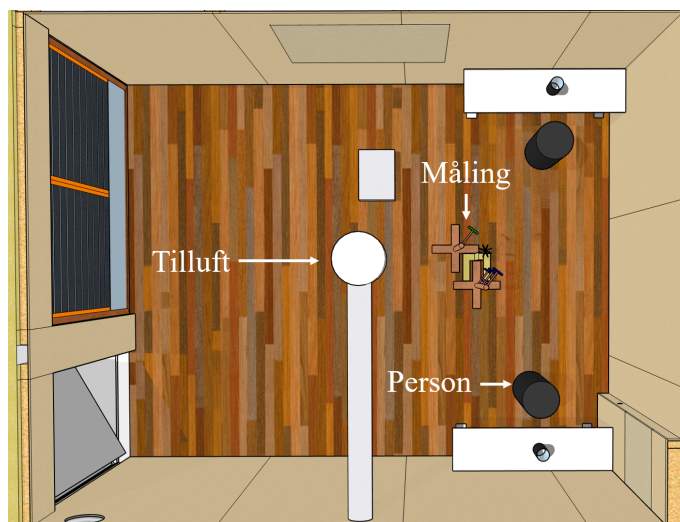
Tilluft- og avtrekkstemperaturen ble målt og logget gjennom hele eksperimentet. Hensikten var å dokumentere tilluftstemperatur for eksperimentene med og uten PCM-sparkel. Måling av tilluftstemperaturen ble utført ved tilluftsventilen. Termoelementet ble plassert i tilluftsventilen for å sikre korrekt måling av lufttemperatur som ble tilført i klimarommet.

Under prøvekjøring av eksperimentet ble det oppdaget at temperatursett-punktet på ventilasjonagregatet ikke stemte overrens med den målte tilluftstemperaturen. Temperaturen målt ved ventilen var 2°C høyere enn sett-punktet på ventilasjonsagregatet. Dette skyldtes at tilluftskanalen hadde en lang strekning uten isolasjon, og tilluften ble derfor varmet opp på vei til klimarommet. Settpunktet for tilluftstemperaturen ble derfor kompensert med 2°C lavere.

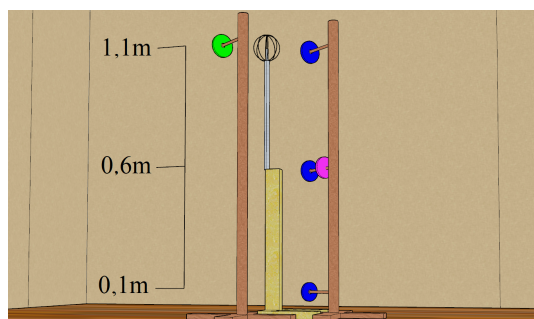
På grunn av begrensning med måleutstyr, kunne ikke logging av luftmengde under eksperimentene utføres. Luftmengden ble regulert før eksperimentet startet, og på det tidspunktet ble det antatt til å være tilstrekkelig.

Måling av termisk komfort parametre i oppholdssone

Måling av termisk komfort parametre ble utført i henhold til Byggforskserien 421.501 [18], NS-EN ISO 7730 [20] og NS-EN ISO 7726 [22]. Sensorene ble plassert mellom personbelastning og tilluftsventilen. Dette for å unngå målefeil som kunne oppstå ved å ha temperatursensorene for nærme en varmebelastning, og vindhastighetsmåler for nær tilluftsventilen, se figur 3.22. Termisk komfort parametre ble målt i tre forskjellige høyder, se figur 3.16.



Figur 3.15: Plassering av sensorene for måling av termisk komfort



Figur 3.16: Tre høyder for måling av termisk komfort parametre

- Ved $1,1m$ er hodehøyden til en sittende person. Hodet er det mest følsomme området for termisk ubehag. I denne høyden ble lufttemperatur, operativ temperatur, lufthastighet og relativ fuktighet målt.
- Ved $0,6m$ er tygdepunktet for sittende person. Lufttemperatur og globetemperatur ble målt ved denne høyden. Lufttemperatur ble benyttet for beregning av middelstrålingstemperatur iht. NS-EN ISO 7726 [22] og globetemperatur ble benyttet for beregning av middelstrålingstemperatur iht. Byggforskserien 421.501 [24], som videre ble brukt til å beregne operativ temperatur.
- Ved $0,1m$ er ankelhøyden som også er veldig følsom for termisk ubehag. I denne høyden ble det kun målt lufttemperatur.

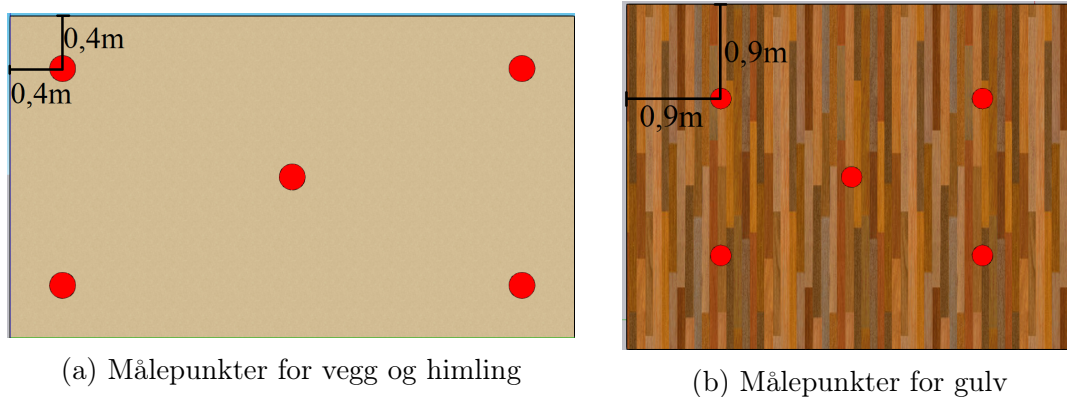
I tillegg anbefalte Byggforsk [24] å beskytte lufttemperaturfølere for varmstråling. Figur 3.17 nedenfor viser løsning som ble brukt til avskjerming av termoelementene med aluminiumsfolie.



Figur 3.17: Skjerming av termoelement for varmestråling

Måling av overflatetemperatur

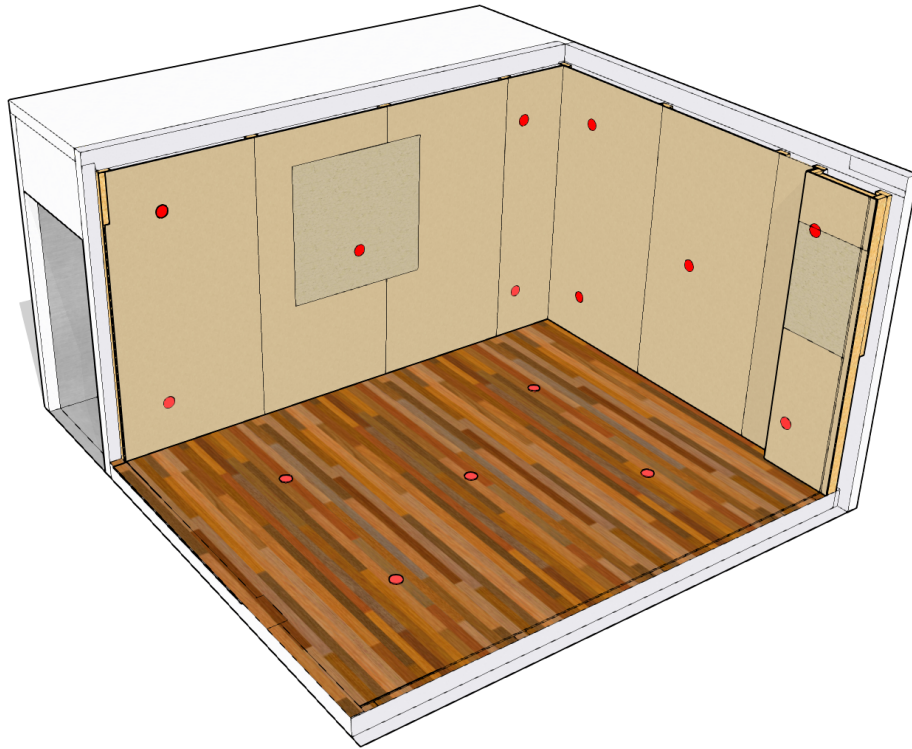
Hensikten med å måle overflatetemperaturen på vegger, himling og gulv var å kunne beregne middelstrålingstemperatur knyttet til vurdering av termisk komfort. Samtidig kunne også overflatetemperaturene brukes til å overvåke faseovergang for PCM. Ved overflatetemperaturer under 20°C og over 24°C kan man forvente at sparkellet var i henholdsvis i begynnelse av smeltefasen og fullstendig smeltet. Tekniske data for PCM-sparkelen står beskrevet i tabell 4.3 under kapittel 4.1.3.



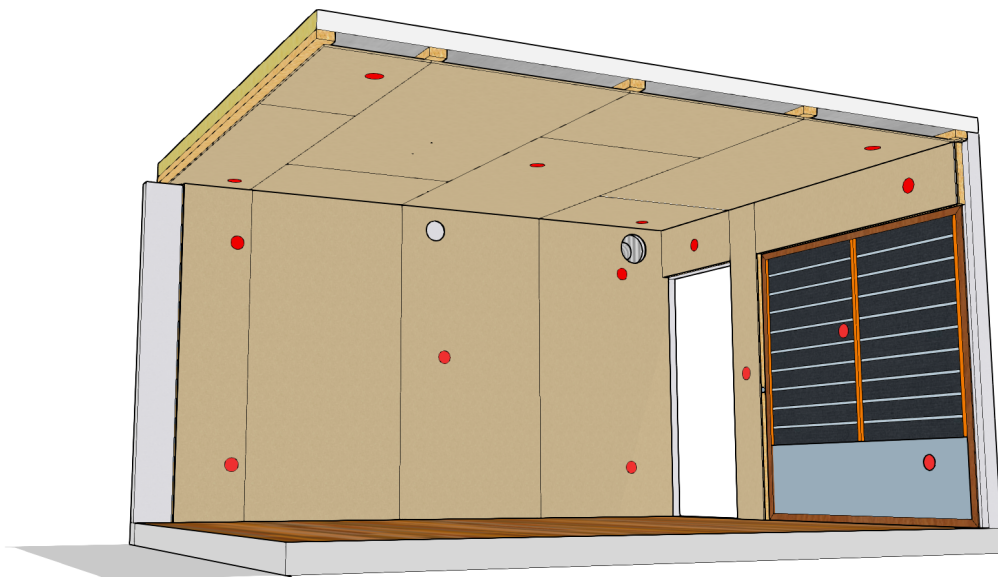
Figur 3.18: Plassering av målepunkter for alle overflatene i rommet.

Fem målepunkter ble plassert på hver av flatene, fire i hjørnene og ett punkt i midten, se figur 3.18. På vegg- og himlingsoverflate ble målepunktene i hjørnet plassert med $0,4\text{m}$ avstand fra hver vegg, mens på gulvoverflaten var $0,9\text{m}$ inn. Årsaken til at målepunktet på gulvoverflaten ved hjørnene måtte plasseres lenger inn, var for å unngå at den simulerte personbelastningen, plassert $0,6\text{ m}$ fra hjørnene skulle gi feilmåling av temperatur, se figur 3.15 på forrige side.

Figur 3.19 og 3.20 på neste side viser en oversikt over alle målepunktene for overflatetemperatur satt opp i klimarommet fra forskjellige perspektiv, merket med røde prikker. Overflatetemperaturene ble målt med et termoelement som ble hengt opp med Gaffateip. I tillegg ble overflatetemperaturen til varmematten også målt, se figur 3.20.



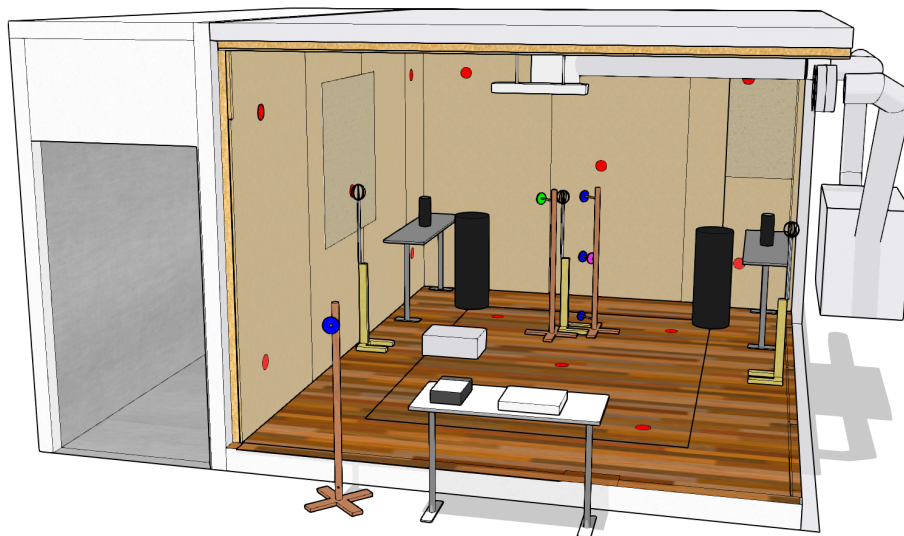
Figur 3.19: Oversikt over målingene av gulv- og veggoverflatetemperatur



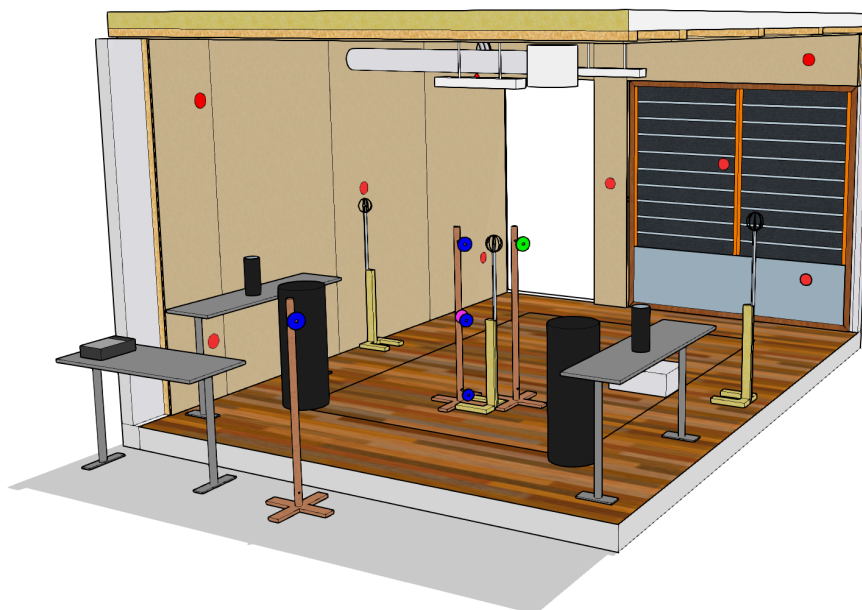
Figur 3.20: Oversikt over målingene av himling- og veggoverflatetemperatur

Ferdigstilt eksperimentoppsett i klimarommet

Figur 3.21 og 3.22 viser komplette oppsett for eksperimentet i klimarommet sett fra sør og nord.



Figur 3.21: Ferdig opprigget klimarommet for eksperimentet sett fra sør



Figur 3.22: Ferdig opprigget klimarommet for eksperimentet sett fra nord

På grunn av mange målepunkter ble to Intab PC-loggere brukt til å måle alle de ønskede målepunktene. For å overvåke temperaturutvikling i klimarommet uten forstyrrelser, ble Intab PC-logger plassert utenfor klimarommet. Figur 3.22 og 3.21 viser hvordan Intab PC-loggere ble plassert på et bord utenfor klimarommet. Omgivelsestemperaturen utenfor klimarommet ble målt ved siden av Intab PC-loggere, med temperaturfølere hengt opp på et stativ med høyde på 1,1m.

3.1.5 Gjennomføring av måling

En tidligere bachelorgruppe hadde gjennomført en test av PCM med en annen implementeringsmåte, i det samme klimarommet våren 2016 [40]. I rapporten kommer det frem, av gruppens egen konklusjon, at det var utfordringer knyttet til tilstrekkelig avkjøling av klimarommet under nattventilasjon. I tillegg ønsket gruppen også å la eksperimentet foregå over en lengre periode, fordi det ble observert under PCM-eksperimentet at temperaturen i klimarommet ikke hadde stabilisert seg.



Figur 3.23: Påføring av PCM-sparkel på vegg- og himlingoverflatene

Prøvekjøring av eksperiment ble derfor utført tre dager før referanseekspertimentet. Under testeksperimentet ble temperaturutviklingen i klimarommet grundig observert og små justeringer i driftstid, varmetilskudd, ventilasjonsluftmengde og temperatursettpunkt ble gjort. Ventilasjonsaggregatet hadde ingen utfordringer med å levere lave tilluftstemperatur om natten, og temperaturutviklingen i klimarommet viste seg å være stabil.

Referansemålingen ble utført i tidsperioden 21.01.2020-27.01.2020 og deretter ble PCM-sparkelen påført i klimarommet av en dyktig håndverker, se figur 3.23. PCM-sparkelen trengte to dager for å strøkne fullstendig før den andre målingen kunne settes i gang. Den andre målingen med PCM-sparkel ble utført i tidsperiode 30.01.2020-06.02.2020. Oppsettet av klimarommet og måleutstyrene var identiske for begge målingene, se figur 3.24 og 3.25. I løpet av begge eksperimentperiodene var klimarommet stengt og hadde ingen forstyrrelser.



Figur 3.24: Bildet av ferdig opprignet klimarommet for referansemåling



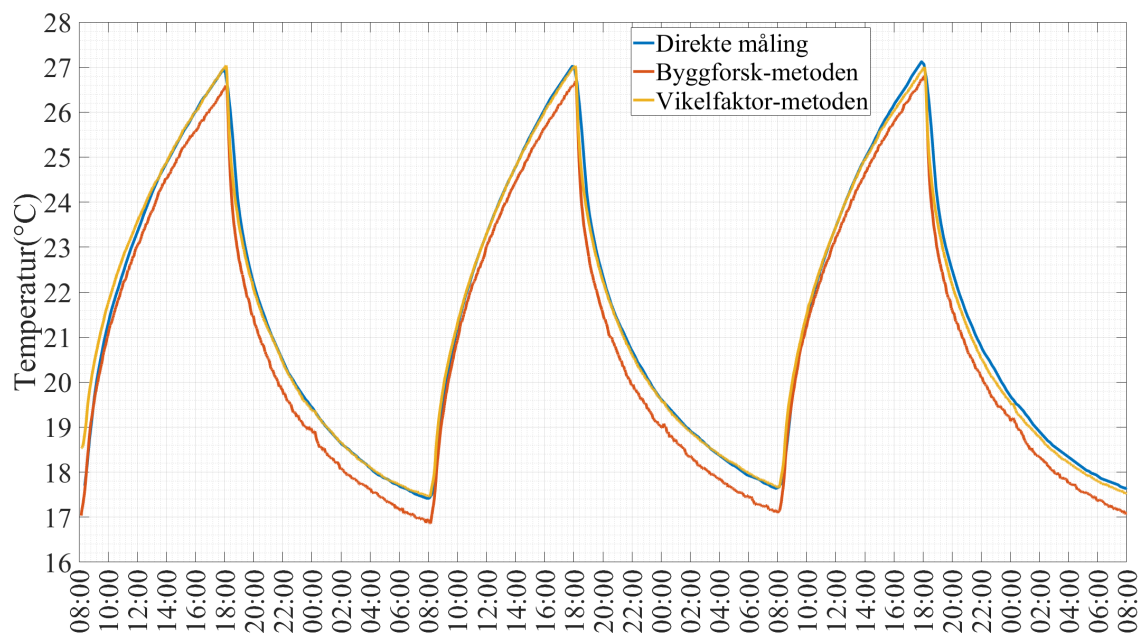
Figur 3.25: Bildet av ferdig opprignet klimarommet for måling med PCM-sparkel

3.2 Beregning av termisk komfort parametere

Operativ temperatur

Formel 2.2 i kapittel 2.3 ble brukt til å beregne operativ temperaturen i klimarommet, der middelstrålingstemperaturen ble beregnet på to måter som beskrevet i kapittel 2.3.3. Den første måten var iht. Byggforsk 421.501 [18] 2.4, og andre måten var vinkelfaktor-metode iht. NS-EN ISO 7726 [22]. De beregnede operative temperaturene ble deretter validert med måling i klimarommet målt med INNOVA1221 Thermal Comfort.

Beregning av middelstrålingstemperatur ved bruk av vinkelfaktormetoden i henhold til NS-EN ISO 7726 [22] ble betraktet for en sittende person $0,6m$ fra veggen, slik at lufttemperaturen målt ved $0,6m$ ble brukt til beregningen.



Figur 3.26: Sammenligning av beregnede og målt operativ temperatur for referanse-måling

Figur 3.26 viser en sammenligning av operativ temperatur fra beregningene og målingen i referanseeksperimentet. Operativ temperatur beregnet ut ifra vinkelfaktormetoden iht. NS-EN ISO 7726 [22] ble observert til å best overensstemmelse med målingen, som førte til videre bruk av vinkelfaktormetoden for vurdering av termisk komfort. Sammenligning av operativ temperatur fra måling fra PCM-eksperimentet viste tilsvarende resultat, der operativ temperatur beregnet etter vinkelfaktormetode samsvarte mest med målingen, se i vedlegg A.

PMV og PPD-indeks

Koden for beregning av PMV- og PPD-indeksene ved programmering gitt i vedlegg D i NS-EN ISO 7730 [20] var ufullstendig beskrevet i BASIC-programmeringsspråk og kunne derfor ikke brukes. Den samme standarden beskriver også at et annet programmeringsspråk eller program kan brukes til å beregne indeksene, men forutsatt at programmet ha blitt validert med outputdata som er gitt i tabellen D.1 i NS-EN ISO 7730 [20].

Forutsetninger for beregning av PMV og PPD-indeks

I denne oppgaven ble PMV- og PPD-indeksene beregnet med kode hentet fra pythermalcomfort [41]. Koden var skrevet på programmeringsspråk Python og hadde blitt validert med outputdata iht. NS-EN ISO 7730 [20], se tabell 3.6. For å beregne indeksene krevde de seks inngangsparametre, disse parametrene er listet med forklaringer i tabell 3.5 nedenfor. Koden brukt til beregningen er presentert i vedlegg B.

Tabell 3.5: Input parametere for beregning av PMV- og PPD-indeks

Input-parametere	Kommentar
Tdb: Lufttemperatur [°C]	Gjennomsnitt av lufttemperatur i klimarommet
Tr: Middelstrålingstemperatur [°C]	Beregnet med vinkelfaktor-metode iht. til NS-EN 7726
Vr: Relativt lufthastighet* [m/s]	Beregnet med pythermalcomfort [42]
RF: Relativt luftfuktighet [%]	Målt i oppholdssone fra betraktningsspunkt
Met: Aktivitetsnivå = 1,2 Met	For stillesittende aktivitet i kontor.
Clo: Bekledning = 0,6 Clo	For skjorte med korte ermer, truser, strømpebukser

*Vr beregnet av lufthastighet målt i rommet og aktivitetsnivå [42].

PMV- og PPD-indeksene var beregnet for personer som antas å oppholde seg i klimarommet som ble gjenspekt som et cellekontor, under forhold som tilsvarte en sommerdag i Oslo. Bekledning var derfor antatt til å være på 0,6 clo som er den typisk sommer bekledning [19], med aktivitetsnivå på 1,2 Met som tilsvareer sittestillende person i et kontor.

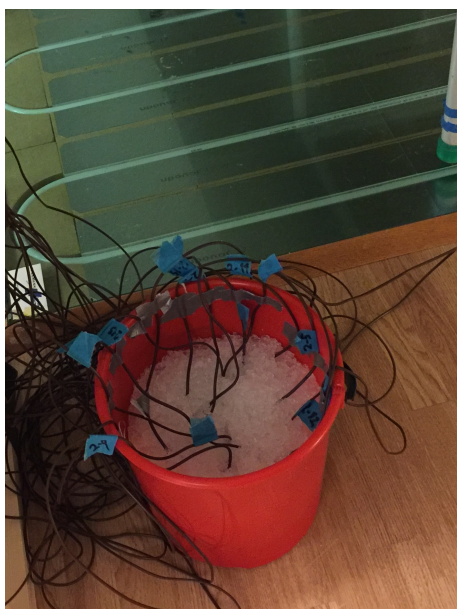
Tabell 3.6: Output parametere for validering av beregningsprogrammet

Nr.	Input parametere						Output iht. NS-EN ISO 7730		Output fra beregning	
	Tdb	Tr	Vr	RF	Met	Clo	PMV	PPD	PMV	PPD
1	22,0	22,0	0,10	60	1,2	0,5	-0,75	17	-0.752287	16.918638
2	27,0	27,0	0,10	60	1,2	0,5	0,77	17	0.765369	17.340701
3	27,0	27,0	0,30	60	1,2	0,5	0,44	9	0.433768	8.92431
4	23,5	25,5	0,10	60	1,2	0,5	-0,01	5	-0.01311	5.003562
5	23,5	25,5	0,30	60	1,2	0,5	-0,55	11	-0.554982	11.448751
6	19,0	19,0	0,10	40	1,2	1,0	-0,60	13	-0.598406	12.507807
7	23,5	23,5	0,10	40	1,2	1,0	0,50	10	0.462010	9.727623
8	23,5	23,5	0,30	40	1,2	1,0	0,12	5	0.121622	5.306404
9	23,0	21,0	0,10	40	1,2	1,0	0,05	5	0.052645	5.057379
10	23,0	21,0	0,30	40	1,2	1,0	-0,16	6	-0.166242	5.572790
11	22,0	22,0	0,10	60	1,6	0,5	0,05	5	0.047515	5.046739
12	27,0	27,0	0,10	60	1,6	0,5	1,17	34	1.171359	33.859830
13	27,0	27,0	0,30	60	1,6	0,5	0,95	24	0.950902	24.098594

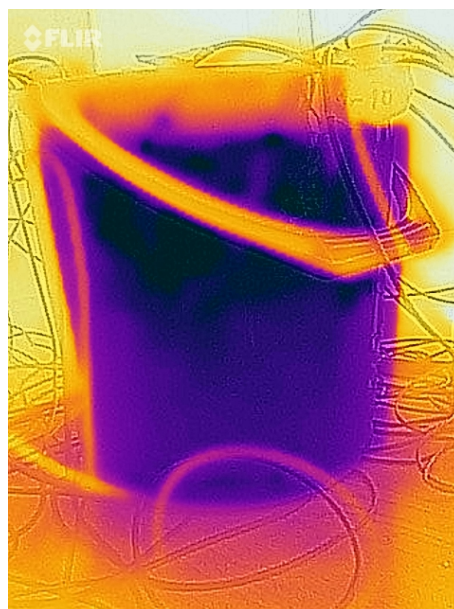
3.3 Isvannstest av termoelementer

Nøyaktigheten til Intab PC-loggere er oppgitt i produsentens datablad til å være på $\pm 1,5^\circ\text{C}$ og instrumentene hadde nylig gjennomgått en kalibrering rett før eksperimentene ble utført. Til tross for dette innebærer det allikevel en usikkerhet rundt måleinstrumentenes nøyaktighet. Derfor ble det utført en test av instrumentene i isvann for å vurdere nøyaktigheten til Intab PC-loggere og termoelementer for temperaturmåling. Temperaturen for faseovergangen fra fast- til væskeform av vann er kjent for å være 0°C . Ved å måle temperatur i isvannbøtte over en periode, kan måleinstrumentenes nøyaktighet vurderes hvis store avvik mellom forventet og målt temperatur ble observert.

Isvannstesten ble utført på Intab PC-loggere for å få et overblikk over avvikene av de forskjellige inngangskanalene, og ekskludere inngangskanalene som kunne indikere stort avvik i temperaturmåling. Testen ble utført i en plastbøtte fylt med isbiter og termoelementene festet til bøttens inside med Gaffateip figur 3.27a. Det ble sørget for at isvannet ble godt rørt om under testen for minst mulig temperaturgradient. Figur 3.27b viser temperaturgradient i isvannbøtten under testing av termoelementene.



(a) Isvannbøtte brukt til testing av termoelementene



(b) Bildet av temperaturgradient i isvannbøtte tatt med termokamera

Figur 3.27: Isvannstest med termoelementene

Under gjennomføring av testen ble det observert at plastbøtten ikke hadde tilstrekkelig tykkelse mellom isvannet og omgivelsen, og plastbøtten ble derfor varmet opp ved direkte kontakt med gulvet i form av ledningsvarme. En ny test ble planlagt med en bedre isolert beholder, men på grunn av begrenset tilgang til laboratoriet ble det ikke utført en ny test. Resultat fra isvannstesten utført i figur 3.27a ble derfor benyttet for vurdering av målenøyaktighet for termoelementene istedenfor.

Kapittel 4

Numerisk metode

4.1 Undersøkelse av PCM-sparkelens kjøleytelse ved numerisk metode

Etter å ha utført målingene i klimarommet med PCM-sparkelen, ble PCM-egenskapene og effektiviteten for avkjøling videre undersøkt ved hjelp av numeriske simuleringer. Ulike scenarier for simulering ble utarbeidet for dette studie, og simuleringene ble utført med simuleringsverktøyet IDA-ICE. En funksjon implementert i IDA-ICE som håndterer PCM i bygningkonstruksjon ble brukt til dette formålet. Cornaro et al. 2007 [43] har validert denne funksjonen ved å sammenligne temperaturutvikling i simulering med reelle eksperimenter, og resultatene indikerte en god overensstemmelse mellom det eksperimentelle og det simulerte. Studien har dermed bekreftet at PCM-funksjonen i IDA-ICE var godt implementert og egnet for håndtering av PCM i bygningkonstruksjon.

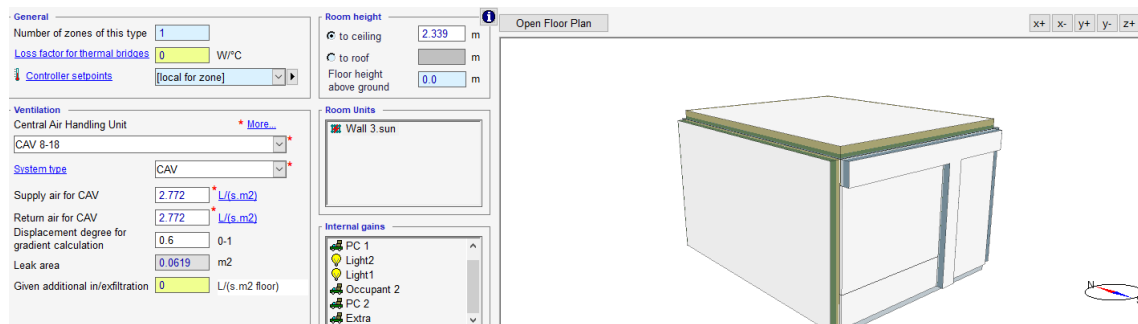
Dette kapitlet drøfter fremgangsmåten for modellering av klimarommet i IDA-ICE og validering av PCM-data knyttet til simuleringene. Videre blir ulike simuleringsscenarioer for studien av PCM-sparkelens egenskaper og kjølevirking presentert.

4.1.1 Oppbygning av simuleringsmodell



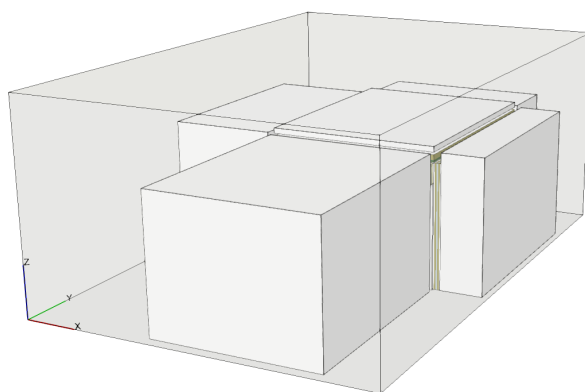
Figur 4.1: IDA-ICE modell av klimarommet

Hensikten var å modellere en simuleringsmodell som kunne gjengi utviklingen av lufttemperatur lik den utviklingen som ble observert i klimarommet under referansemålingen. Når et resultat som var i god overensstemmelse med referansemålingen ble oppnådd, ble denne modellen videre brukt til å validere PCM-data.



Figur 4.2: Oversiktsmeny for klimarommet i IDA-ICE

Figur 4.2 ovenfor viser et oversiktsvindu for klimarommet modellert i IDA-ICE. I dette vinduet kunne ulike parameterne relatert til modellen bestemmes og justeres. For eksempel lokaltemperatursettpunkt, størrelse på klimarommet, installert varme- og/eller kjøleelement, intern-, eksternt-varmestilskudd, ventilasjonsluftmengde, tilluftstemperatur og oppbygning av bygningskonstruksjon.

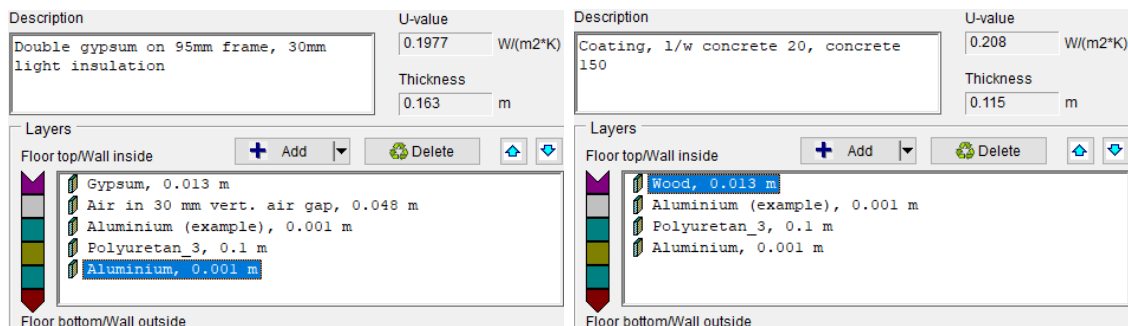


Figur 4.3: Soner plassert rundt klimarommet

Klimarommet befant seg i et større laboratorium med kontrollert lufttemperatur, og uten direkte kontakt med uteklimaet. Det ble gjort målinger av omgivelsestemperaturen for klimarommet. Disse ble logget og var relativt konstante med en gjennomsnittstemperaturen på 23°C. For å kunne gjengi det samme miljøet i en simuleringsmodell ble klimarommet modellert som en enkel sone med fem soner rundt, se figur 4.3. Disse fem sonene hadde et konstant temperatursettpunkt på 23°C og ble plassert inntil klimarommet. Klimaforhold Oslo ble brukt til simuleringen.

Klimarom konstruksjon

Modifisering av bygningskonstruksjon for klimarommet i IDA-ICE gjøres ved å direkte klikke på vegg-, tak- eller gulvkonstruksjonene på 3D modellen i oversiktsmenyen, se figur 4.2. Figur 4.4 viser oversikt over de utvalgte konstruksjonene bygget opp lagvis sammensatt av forskjellige komponenter. Tykkelser og egenskaper, som varmeledningsevne, spesifikk varmekapasitet og tetthet for komponentene kan endres etter behov.

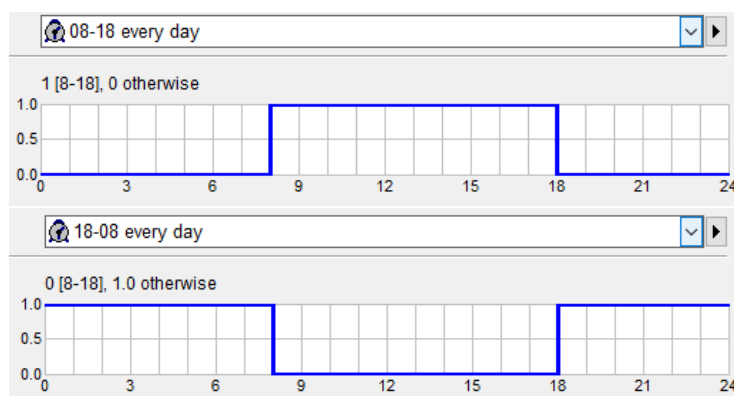


Figur 4.4: Vegg- og gulvkonstruksjon for klimarommet i IDA-ICE

Figurene 4.4 over viser de ferdig bygde vegg- og gulvkonstruksjonene som ble brukt i simuleringsmodellen, der takkonstruksjon ble konstruert på samme måte som veggkonstruksjon. Konstruksjonene i simuleringsmodellen ble modellert basert på samme Fresvik-isolasjonspanel som klimarommet ble bygget av. Isolasjonspanelet var 100mm tykt, med overflate av aluminium og polyester som isolasjon. Produktdatablad oppga at isolasjonspanelet hadde en total U-verdi på $0,22\text{ W/m}^2\text{K}$ [26]. Med ekstra varmemotstand fra $0,048\text{m}$ lufte- og $0,013\text{m}$ gipsplate ble totale U-verdi for vegg og takkonstruksjonene på $0,1977\text{ W/m}^2\text{K}$.

Tidstyring

Styring av parametere i simulering ble utført av to enkle kontroller som vekslet med hverandre i to tidsperioder, 08:00-18:00 og 18:00-08:00, se figur 4.5. Disse kontrollene ble brukt til å styre driftstid, varmetilskudd, veksling av ventilasjon i og utenom driftstid.

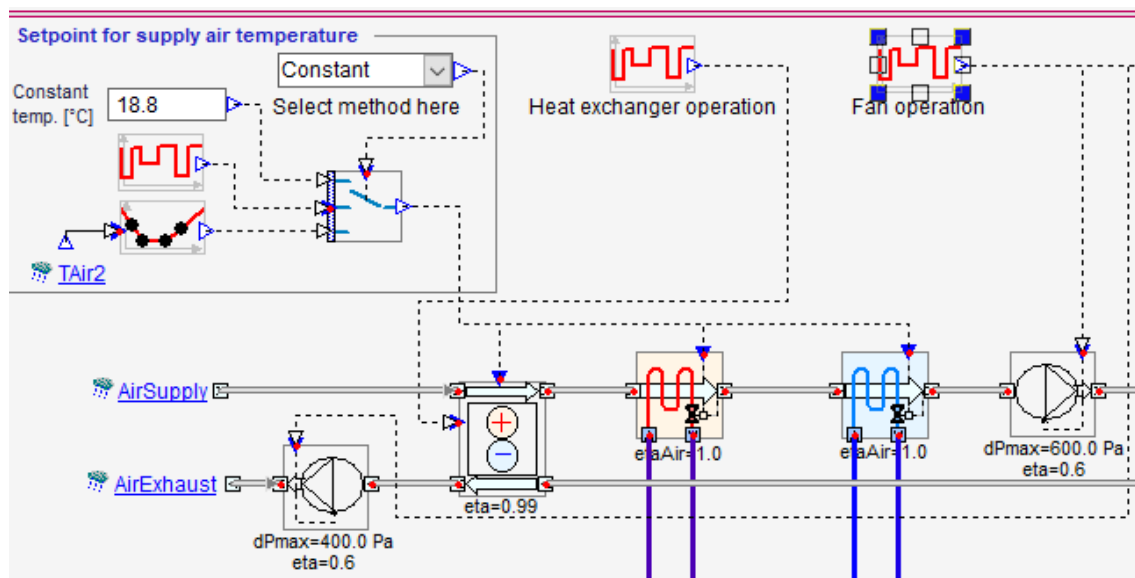


Figur 4.5: Kontroller for tidstyring

Ventilasjon

08:00-18:00

Figur 4.6 viser konfigurasjonen av ventilasjonssystemet under driftstid. Tilluftstemperaturen ble satt til en konstant verdi på 18,8°C, som var gjennomsnittlige tilluftstemperaturen målt under referanseeksperimentet. Ventilasjonsluftmengde ble satt til 135m³/t, som var luftmengde innregulert før gjennomføring av laboratorieeksperimentene.



Figur 4.6: Konfigurasjon av ventilasjonssystemet under driftstid

18:00-08:00

Nattventilasjon hadde en tilsvarende konfigurasjon av ventilasjonssystemet i figur 4.6, der temperatursettpunktet ble satt til 14,6°C og ventilasjonsluftmengde ble satt til 250m³/t. Veksling mellom drift av ventilasjonen ble styrt av en kontroller vist i figur 4.5.

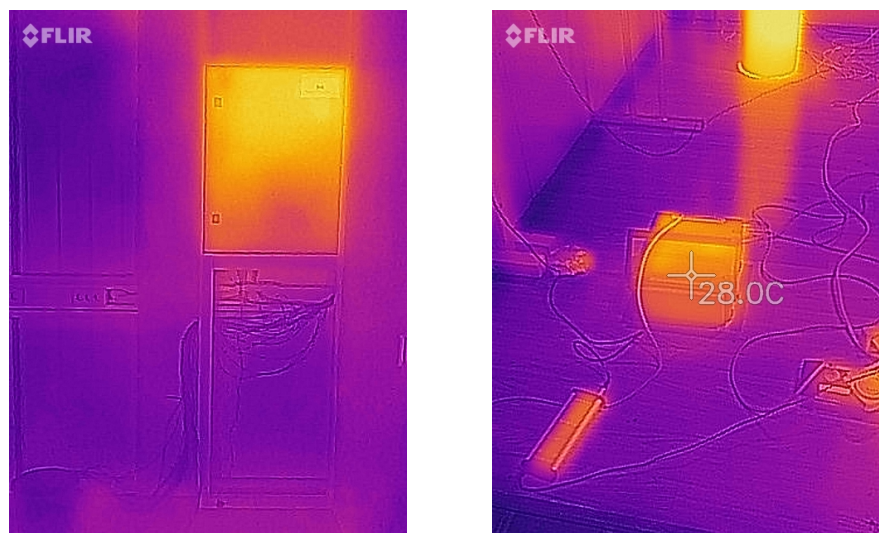
Central air handling unit	System type	Return air for CAV, L/(s m ²)	Supply air for CAV, L/(s m ²)	Return terminal height, m	Connected as
CAV 8-18	CAV	2.772	2.772	2.2	Central AHU
CAV 18-8	CAV	4.927	4.927	2.2	Central AHU

Figur 4.7: Oversikt over luftmengde i og utenom driftstid

Figur 4.7 ovenfor viser oversikt over luftmengde brukt simuleringsmodellen i driftstid og nattventilasjon gitt i l/s.

Ekstra varmetilskudd fra dataskap og måleutstyr

Under gjennomføring av eksperimentene ble det observert et dataskap som avga konstant varme i klimarommet. Temperaturen på dataskapet ble målt med et termisk kamera, men varmeeffekten forble ukjent. I tillegg avga måleutstyret litt ekstra varme i klimarommet. Se figur 4.8. Disse ekstra varmeavgivelsene fra dataskap og utstyr ble derfor valgt å ta hensyn til ved modellering av simuleringsmodellen.



Figur 4.8: Bilder av dataskap og måleutstyr tatt med termokamera

Intern-varmetilskudd

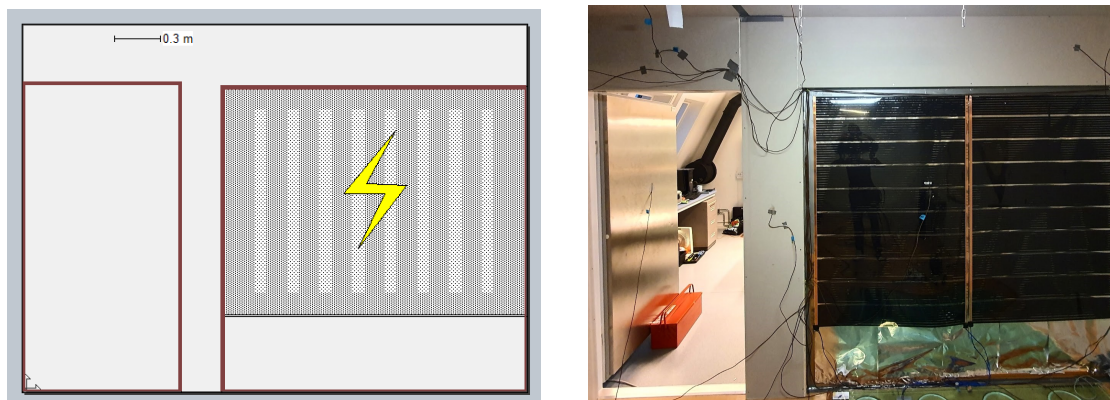
Figur 4.9 nedenfor viser en oversikt over de interne-varmetilskuddene som var modellert i klimarommet. I IDA-ICE kunne varmetilskudd fra personbelastning modelleres med ønsket aktivitetsnivå og bekledning. I stedet ble varmetilskudd fra personbelastning for denne simuleringsmodellen modellert som utstyr med konstant effekt. Grunnen var for å ha fullstendig kontroll over over den eksakte tilførte effekten i rommet, slik det ble gjort i eksperimentet der personbelastningene ble etterlignet med ventilasjonskanal og lyspærer med konstant effekt. Ekstra varmetilskudd ble justert for å kunne tilpasse temperaturutvikling i klimarommet, som tilsvarte 40W.

Name	Type	Group	Number of units	Power, W	C	Schedule
Person	© Equipment		1.0	90.0		08-18 every day
PC 1	© Equipment		1.0	60.0		08-18 every day
Belysning	© Light		1.0	28.0		08-18 every day
Person2	© Equipment		1.0	90.0		08-18 every day
PC 2	© Equipment		1.0	60.0		08-18 every day
Ekstra varmeti...	© Equipment		1.0	40.0		© Always on
Belysning2	© Light		1.0	28.0		08-18 every day

Figur 4.9: Varmebelastninger brukt i IDA-ICE modellen

Varmetilskuddene ble tidstyrt med en kontroller som aktiverte varmebelastningene i tidsperioden 08:00-18:00. Mens ekstra varmetilskudd var forutsatt til å avgi varmeeffekt på heltid.

Ekstern-varmetilskudd



Figur 4.10: Soltilskudd modellert i IDA-ICE og klimarommet

Under gjennomføring av målingene i klimarommet ble soltilskudd imitert med en varmematte med konstant effekt på 200W. I simuleringsmodellen ble soltilskudd modellert som et elektrisk varmeelement plassert ved vinduet mot sør. Varmeelementet var modellert til å dekke det meste av vinduets areal, slik det ble gjort i eksperimentene, se figur 4.10.

Input data for parametere benyttet i IDA-ICE modellen

Tabell 4.1: Oversikt over input parametere for validering av IDA-ICE modellen

Ventilasjon			
	Tilluftsettpunkt [°C]	Luftmengde [m^3/h]	
Ventilasjon ved driftstid 08-18	18,8	135	
Ventilasjon utenom driftstid 18-08	14,6	250	
Konstruksjon			
	Areal [m^2]	Høyde [m]	Volum [m^3]
Klimarom størrelse	14,1	2,339	33,1
Vindu størrelse	4	-	-
Dør størrelse	2	-	-
U-verdi Vegg/Tak/Gulv [$W/(m^2k)$]	0,1964/ 0,1964/ 0,208		
U-verdi Vindu/Dør [$W/(m^2k)$]	0,6415/ 0,7806		
Varmetilskudd ved driftstid (08-18)			
Personbelastning [W/m^2]			13,2
Utstyr [W/m^2]			8,5
Belysning [W/m^2]			4
Ekstern [W/m^2]			14,2
Ekstra varmetilskudd (Dataskap og måleutstyr) [W/m^2]			2,8
Normalisert kuldebro			0
Lekkasjetall, n50 (h^{-1})			1,5

4.1.2 Kalibrering av simuleringsmodell

Ved modellering av simuleringsmodellen ble de kjente parametrene først modellert. Deretter ble ukjente parametere justert i modellen, slik at gjennomsnittstemperaturen fra simulering samsvarte mest mulig med referansemåling.

Kjente parametere

- **Oppbygging av vegg-, gulv- og takkonstruksjon.** Teknisk informasjon på isolasjonspanelet som brukes i klimarommet ble brukt til estimering av U-verdi for konstruksjonene.
- **Omgivelsetemperatur og ventilasjonstilluftstemperatur for klimarom.** Begge temperaturene ble målt og logget under eksperimentet. Gjennomsnittstemperaturer for disse ble brukt i simuleringsmodellen.
- **Total effekt på varmetilskudd fra person, belysning, utstyr og soltilskudd.** Disse parametrene ble bestemt under klargjøring av eksperimentene.
- **Driftstid for ventilasjon og varmetilskudd.** Disse parametrene ble også bestemt under gjennomføring av eksperimentene.
- **Størrelse på klimarom.** Nettostørrelse på klimarom etter gipsplater og tre-stendere ble installert brukes til modellering av simuleringsmodellen.

Ukjente parametere

- **Emissivitet på varmetilskudd.** Emissivitet til varmetilskuddene spilte en veldig viktig rolle på hvor hurtig lufttemperaturen i simuleringsmodellen økte i løpet av driftstiden. Under eksperimentene ble utstyr- og personbelastning etterlignet med matt-svart ventilasjonskanaler. Ved å øke emissivitet til nær 0,9 for person og utstyr i simuleringsmodellen, samsvarte økningen i temperatur relativt godt med målingen.
- **Ventilasjonsluftmengde** Ventilasjonsluftmengde under eksperiment ble ikke logget, men regulert før referansemåling ble utført. Usikkerheter rundt denne parameteren oppstod fordi eksakt tilført luftmengde under eksperiment ikke kunne fastsettes. Luftmengde i driftstiden brukes derfor av den regulerte verdien, mens luftmengden utenfor driftstiden måtte justeres slik at lufttemperaturrendringen om natten samsvarte med målingen.
- **Kuldebro** Kuldebro for klimarommet var en utfordrende parametere å anslå. Under modellering ble derfor verdien for kuldebro satt lik 0, som ble kompensert ved justering av U-verdiene til vindu og dør.
- **Ekstra varmetilskudd fra dataskap og måleutstyr.** Ekstra varmetilskudd ble justert og kompensert i simuleringsmodellen med hensyn på innvirkning av temperaturutvikling utenom driftstid. Etter tilpasning førte varmeeffekten på 40 W til temperaturutvikling som samsvarte mest med referansemålingen.
- **Lekkasjetall.** Standard input verdi ble brukt for lekkasjetall. Det ble antatt at lekkasjetall ikke spilte stor rolle med hensyn på virkningen av lufttemperaturen, fordi klimarommet var lokalisert i en kontrollert omgivelse.

4.1.3 Implementering og validering av PCM-data i IDA-ICE

Etter utført kalibrering og validering av simuleringsmodellen i henhold til referansemålingen, ble denne modellen brukt videre for å validere PCM-data. PCM-data ble lagt inn i den validerte simuleringsmodellen mens de andre parameterne forble uendret. Hensikten var å kunne bruke PCM-data med simuleringsmodellen for å estimere temperaturutviklingen i klimarommet i forskjellige simuleringsscenarioer.

Måling av PCM-sparkel tykkelse

For å finne riktig tykkelse på PCM-sparkel som skulle brukes i simulering, ble det tatt fem prøvestykker av gipsplater på veggflatene og himlingflatene i klimarommet, som tilsvarte 25 prøvestykker totalt. Prøvene ble finskåret på kantene slik at alle lagene viste tydelig. I figur 4.11 nedenfor til høyre, vises en klar forskjell mellom disse lagene. PCM-sparkel er det mørkegrå laget med hvit maling på topp, og under PCM-sparkelen var det ett tykt lag med hvite gipsplater. Dette gjorde at PCM-sparkelen syntes veldig tydelig og det var enkelt å måle tykkelsen. PCM-sparkelens tykkelse ble målt med et skyvelær.



Figur 4.11: Prøvestykker av PCM-sparkel tatt fra klimarommet

Måling av prøvestykkene viste seg å ha store variasjoner i tykkelse for prøvene fra veggen, med det tynneste laget på $0,9\text{mm}$ og det tykkeste laget på $2,2\text{mm}$. Mens variasjonene i PCM tykkelse på himling var derimot mindre, med det tynneste laget på $1,9\text{mm}$ og det tykkeste laget på $2,3\text{mm}$.

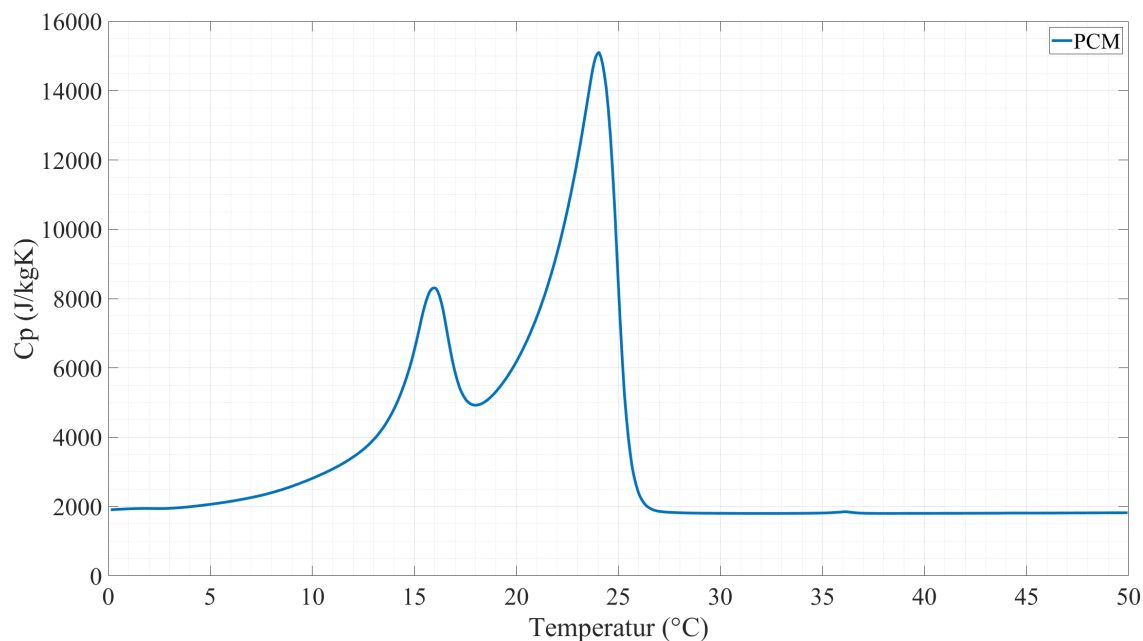
Tabell 4.2: Gjennomsnittlig tykkelse på PCM-sparkel.

Målt tykkelse på PCM-sparkel					
	Himling	Nord-vegg	Sør-vegg	Øst-vegg	Vest-vegg
Gjennomsnittlig tykkelse	$2,1\text{mm}$	$2,12\text{mm}$	$1,6\text{mm}$	$1,83\text{mm}$	$1,52\text{mm}$
Tykkelse benyttet for validering av PCM-data					
Himling	$2,1\text{mm}$				
Vegg overflatene	$1,76\text{mm}$				

Gjennomsnittlig tykkelse på PCM-sparkel på veggoverflatene og den gjennomsnittlige tykkelsen på himlingoverflate er listet opp i tabellen 4.2 ovenfor. Tykkelsen som ble brukt for validering var $2,1\text{mm}$ for himling i gjennomsnittlig tykkelse og $1,76\text{mm}$ for alle veggoverflatene som var arealvektet gjennomsnittlig tykkelse.

PCM-data og tekniske egenskaper

Grafen i figur 4.12 viser PCM-sparkelens spesifikke varmekapasitet ved ulike temperaturer. I tillegg er grunnleggende teknisk informasjon for PCM-sparkelen gitt i tabell 4.3. Både spesifikke varmekapasitet og tekniske data for PCM-sparkelen har blitt levert av fra Gyproc Saint-Gobain, Sweden AB [44].



Figur 4.12: PCM-sparkel spesifikk varmekapasitet ved forskjellige temperaturer. Hentet fra Gyproc Saint-Gobain, Sweden AB [44]

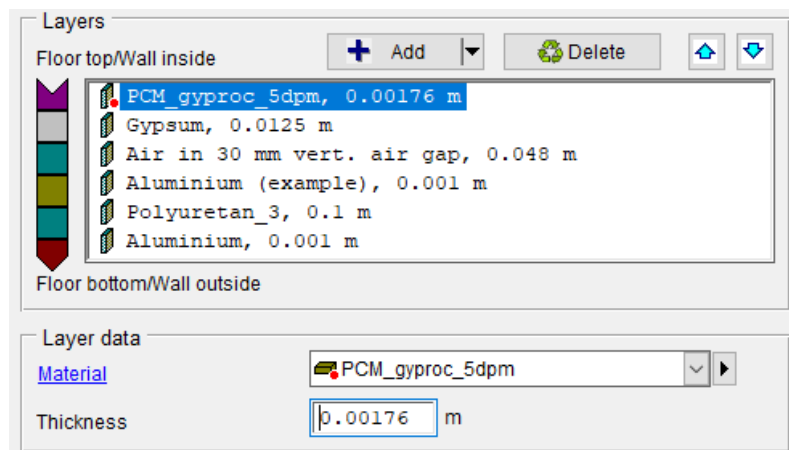
Ved å observere den spesifikke varmekapasiteten for PCM-sparkelen i figur 4.12 over. Indikerer en økning av den spesifikke varmekapasiteten for PCM-sparkelen i temperaturområdet 18-24°C, som tilsvarer faseendringsområdet for PCM. Ved 20°C øker den spesifikke varmekapasiteten og stopper ved den høyeste varmekapasiteten ved temperaturen 24°C. Ved 24°C vil PCM være fullstendig smeltet og gå i metning. Dette stemte godt overens med gitte tekniske data i tabell 4.3, for topp smeltepunkt på 24°C og begynnende smeltepunkt på 20°C.

Tabell 4.3: Tekniske data for PCM-sparkelen. Hentet fra Gyproc Saint-Gobain, Sweden AB [44]

Tekniske data	
Farge	Grå
Tetthet ved 20°C	970kg/m ³
Begynnende smeltepunkt	20°C
Topp smeltepunkt	24°C
Termisk konduktivitet	0,1W/mK

Implementering av PCM-data i IDA-ICE

PCM-sparkelen legges i simuleringsmodellen ved å navigere til tak- og/eller veggkonstruksjonsvinduet, ved å direkte klikke på konstruksjonene på 3D modellen i oversiktsmenyen. I dette tilfellet ble PCM-sparkelen påført på gipsplater, på samme måte som det ble gjort i eksperimentet, se figur 4.13. Tykkelse på PCM-sparkelen ble endret til $2,1\text{mm}$ for himling og $1,76\text{mm}$ for alle veggoverflatene. Ved å trykke "Material" i blått på vinduet i figur 4.13 vil et nytt vindu i figur 4.14 vises.



Figur 4.13: Veggkonstruksjon i simuleringsmodellen med PCM-sparkel

Figur 4.14 nedenfor viser de forskjellige egenskapsparametrene fylt inn for PCM-sparkelen med forklaringer på disse. IDA-ICE bruker delvis entalpi og temperaturkoordinater til å beregne riktig endring i varmekapasitet over faseendringen [43] for PCM-materiale. Data for PCM-spesifikk varmekapasitet på forskjellige temperaturer plottet i figur 4.12 ble lagt inn i parametrene TH, DHDTMELT og DHDTSOLID.

Name	Value	Unit	Description
N	287	items	Number of temperature coordinates
NM1	286.0	items	Number of partial enthalpies (N-1)
RHOSOL	970.0	kg/m ³	Layer density (solid)
CPSOL	1600.0	J/(kg K)	Layer specific heat (solid) (J/(kg K))
LAMBDA SOL	0.1	W/(m K)	Layer heat conductivity (solid) (W/(m K))
CPLIQ	1600.0	J/(kg K)	Layer specific heat (liquid) (J/(kg K))
LAMBDA LIQ	0.1	W/(m K)	Layer heat conductivity (liquid) (W/(m K))
C0	14300.0	J/(kg K)	Specific heat during reversing (c0 <= min(cpSol...
TH[1:287]	{12.047 12.1295...}	°C	Temperatures at which melting/solidifying enthal...
DHDTMELT[1:286]	{3467.208 3501....}	J/(kg K)	Partial enthalpies between temperature coordin...
DHDTSOLID[1:286]	{3467.208 3501....}	J/(kg K)	Partial enthalpies between temperature coordin...

Figur 4.14: Input parametere for PCM-sparkelens egenskap

RHOSOL, LAMBDA SOL og LAMBDA LIQ fylles ut i henhold til tekniske data gitt i tabellen 4.3. For de gjenværende parametrene ble standardverdiene i IDA-ICE brukt. RHOSOL er massetetthet, LAMBDA SOL og LAMBDA LIQ er spesifikke varmekapasitet for PCM-sparkelen ved fast- og væskeform.

4.1.4 Sensitivitetsanalyse av PCM-sparkelens kjøleytelse

Etter at eksperimentet med PCM-sparkelen ble utført i klimarommet, var videre undersøkelser omkring effektiviteten av kjølevirkningen til PCM-sparkelen fortsatt av stor interesse. Med hensyn til begrensninger som tid og ressurser ble eksperiment gjennomført kun en gang. I denne analysen var formålet å undersøke effektiviteten til PCM-sparkelen for avkjøling ved numerisk simulering i IDA-ICE. Tre hovedsimuleringsscenarier var utarbeidet for dette studie. Disse simuleringsscenariene er beskrevet i tabell 4.4, 4.5 og 4.6.

Det første simuleringsscenariet omhandlet PCM-sparkelens kjøleytelse med forskjellige PCM-tykkelser implementert på himlings- og veggoverflater, sammenlignet med referansesimulering, se tabell 4.4. I det andre simuleringsscenariet ble PCM-sparkelens kjøleytelse undersøkt med hensyn på avkjøling av PCM ved ventilasjon utenom driftstid, for å klargjøre PCM til å absorbere varmen i driftstiden. Simuleringsscenariet med variasjon av tilluftstemperatur og ventilasjonsluftmengde parametere for nattventilasjon er beskrevet i tabell 4.5. I det tredje simuleringsscenariet ble en forenklet studie for kjøleytelsen av PCM-sparkelen utført. Studien undersøkte i hvilken grad operativ temperatur ble påvirket av størrelsen på PCM-smøreflater i klimarommet. To scenarier ble utarbeidet for sammenligning med samme mengde PCM-sparkel.

Forutsetning

Forutsetningene for denne analysen vil være de samme som beskrevet i kapittel 3.1. Hvor klimarommet skulle gjengi et cellekontor på en typisk sommerdag i Oslo. For å gjenskape laboratorieeksperimentet ble den validerte simuleringssmodellen og PCM-data brukt i denne studien. Slik at inputparametere som klimarommets konstruksjon, driftstid, intern-og ekstern-varmebelastninger som ble brukt i simulering var de samme parameterne beskrevet i tabellen 4.1. Størrelsen på kjøleeffekten til PCM-sparkelen ble undersøkt ved å inspisere reduksjon i operativ temperatur i klimarommet.

PCM-sparkelens kjøleytelse i forskjellige tykkelser

Tabell 4.4: Simuleringsscenariet for undersøkelse av kjøleytelsen til PCM-sparkelen i forskjellige tykkelser

Simuleringsscenarier ved variasjon av tykkelser på PCM	
	Uten PCM
	1mm PCM på vegg- og himlingflater
1.	2mm PCM på vegg- og himlingflater
	3mm PCM på vegg- og himlingflater
	4mm PCM på vegg- og himlingflater
	Uten PCM
	1mm PCM på himlingflater
2.	2mm PCM på himlingflater
	3mm PCM på himlingflater
	4mm PCM på himlingflater

PCM-sparkelens kjøleytelse ved nattventilasjon

Tabell 4.5: Simuleringsscenariet for å undersøke kjøleytelsen til PCM-sparkelen ved variasjon av tilluftstemperatur og luftmengde for nattventilasjon

Simuleringsscenarier ved variasjon av nattventilasjon parametere			
	Tilluftstemperatur [°C]	Luftmengde [m^3/h]	PCM tykkelse
1.	14	250	3mm på vegg- og himlingflater
	15	250	3mm på vegg- og himlingflater
	16	250	3mm på vegg- og himlingflater
	17	250	3mm på vegg- og himlingflater
2.	15	135	3mm på vegg- og himlingflater
	15	180	3mm på vegg- og himlingflater
	15	225	3mm på vegg- og himlingflater
	15	270	3mm på vegg- og himlingflater

PCM-sparkelens kjøleytelse ved ulike størrelse av smøreflate

Tabell 4.6: Simuleringsscenariet for å undersøke kjøleytelsen til PCM-sparkelen ved variasjon av størrelse på smøreflate

Scenarier	Veggareal [m^2]	Himling [m^2]	Totalt [m^2]	Tykkelse [m^2]	Volum [m^3]	Masse [kg]
1,3mm PCM på himling- og veggflate	30,34	14,1	44,4	0,00127	0,0564	54,7
4mm PCM på himlingflate	-	14,1	14,1	0,004	0,0564	54,7

I klimarommet modellert i IDA-ICE var veggarealet dobbelt så stort som himlingarealet, med $30,34m^2$ for veggareal og $14,1m^2$ for himlingareal. I virkeligheten er smøreflater for PCM i cellekontor ikke like stor og ofte er det begrenset med veggareal PCM-sparkel kan smøres på. Klimarommets størrelse etter at gipsplater og trestendere var installert er beskrevet i tabell 3.2 under kapittel 3.1.

Mengde på PCM-sparkel ble beregnet basert størrelsen på smøreflater og tykkelsen til sparkellaget på overflatene. PCM-sparkelmassetetthet ble antatt å være $970kg/m^3$ [44] som angitt i tabellen 4.3 i kapittel 4.1.3. Tabell 4.6 ovenfor viser oversikt over simuleringsscenarier og beregning for mengde på PCM-sparkel.

Kapittel 5

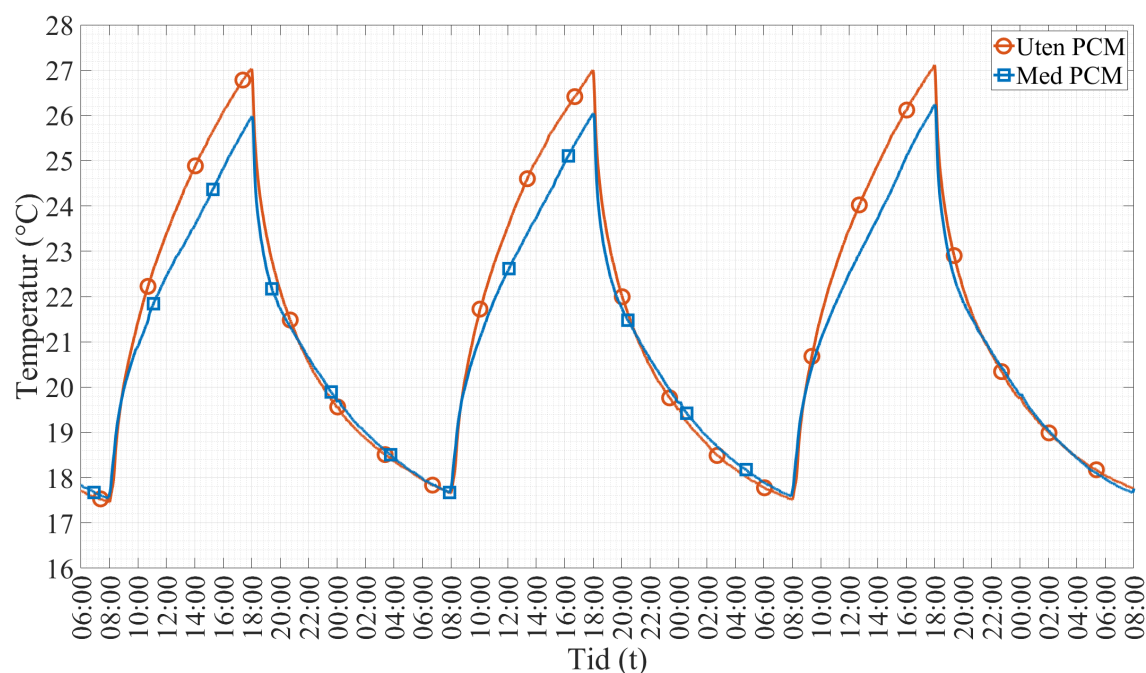
Resultat og diskusjon

5.1 Måling av kjølevirkning av PCM-sparkel

I dette kapittelet blir resultatene fra målingene i klimarommet presentert og diskutert med hensyn til kjøleytelse og forbedring av termisk komfort med PCM-sparkelen. Gjennomsnittlige tykkelse av PCM-sparkel påført i klimarommet var $2,1\text{mm}$ på himlingsoverflate og $1,7\text{mm}$ på veggoverflatene.

5.1.1 Vurdering av operativ temperatur

Grafene i figur 5.1 nedenfor viser operativ temperatur beregnet med vinkelfaktormetoden iht NS-EN ISO 7726 [22], med lufttemperatur målt ved $0,6\text{m}$ høyde over gulvet og overflatetemperaturene. Beregningen var basert på en sittende person $0,6\text{m}$ fra veggen. De målte dataene fra referanseeksperimentet og PCM-eksperimentet fra de tre siste dagenene ble brukt til beregningen.



Figur 5.1: Beregnet operativ temperatur i klimarommet

Tabellen nedenfor viser operativ temperatur som ble oppført til forskjellige tider i løpet av driftstiden. Verdiene listet i tabellen ble hentet fra den nest siste dagen av begge eksperimentene.

Tabell 5.1: Operativ temperatur i løpet av driftstid.

Kl.	Operativ temperatur [°C]										
	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
Uten PCM	17,5	20,1	21,5	22,6	23,5	24,2	24,9	25,6	26,1	26,6	27,1
Med PCM	17,6	19,9	20,9	21,8	22,4	23,0	23,6	24,2	24,8	25,4	26,0
Differanse	-0,1	0,2	0,6	0,8	1,1	1,2	1,3	1,4	1,3	1,2	1,1

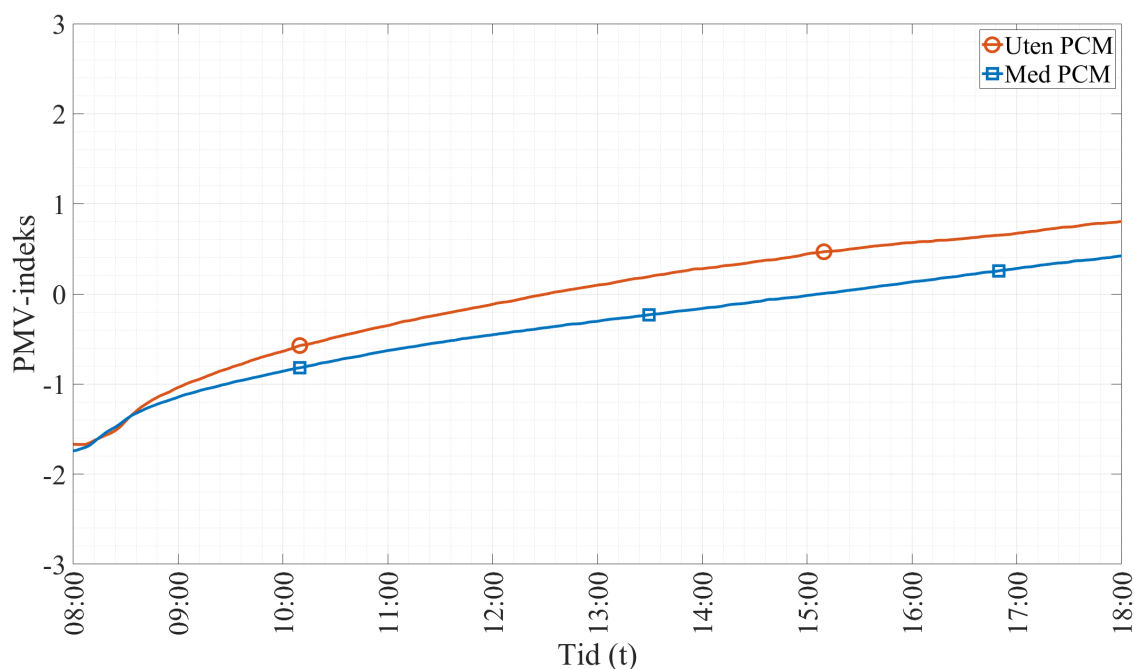
Operativ temperatur er den viktigste faktoren for vurdering av termisk komfort. I figuren over viser grafene tydelig at målingen med PCM-sparkel generelt har lavere operativ temperatur. Kl. 08:00 var starttemperatur for begge eksperimentene tilnærmet identiske med henholdsvis, 17,5°C og 17,6°C. Mellom 08:00 og 08:30 hadde begge eksperimentene lik stigning i operativ temperatur, men klokken 08:30 avtok temperaturstigningen for PCM-eksperimentet. Da operativ temperatur i klimarommet med PCM nådde 20,9°C ved kl 10:00, var operativ temperatur for PCM-eksperimentet 0,6°C lavere, og temperaturforskjellen fortsatte å øke. Tabell 5.1 viser at den operative temperaturen var minst 1,1°C lavere for PCM-eksperimentet allerede ved 12-tiden og denne temperaturforbedringen varte til 18:00. Den høyeste temperaturforskjellen mellom referanseeksperimentet og PCM-eksperimentet ble observert ved kl 15:00 med 1,4°C.

Kravet for operativ temperatur, i henhold til Arbeidstilsynets Veiledning, best.nr 444 [21], ble satt til å ikke overstige 26°C. Referanseeksperimentet nådde kravet til operativ temperatur ved kl 16:00. Operativ temperaturen for PCM-eksperimentet møttet ikke kravet før slutten av driftstiden ved kl 18:00, med maksimal temperatur på 26,0°C, mens referanseeksperimentet nådde 27,1°C på samme tidspunktet. For begge kravene satt med hensyn på operativ temperatur, nådde eksperimentet med PCM-sparkel kravet to timer senere enn referanseeksperimentet.

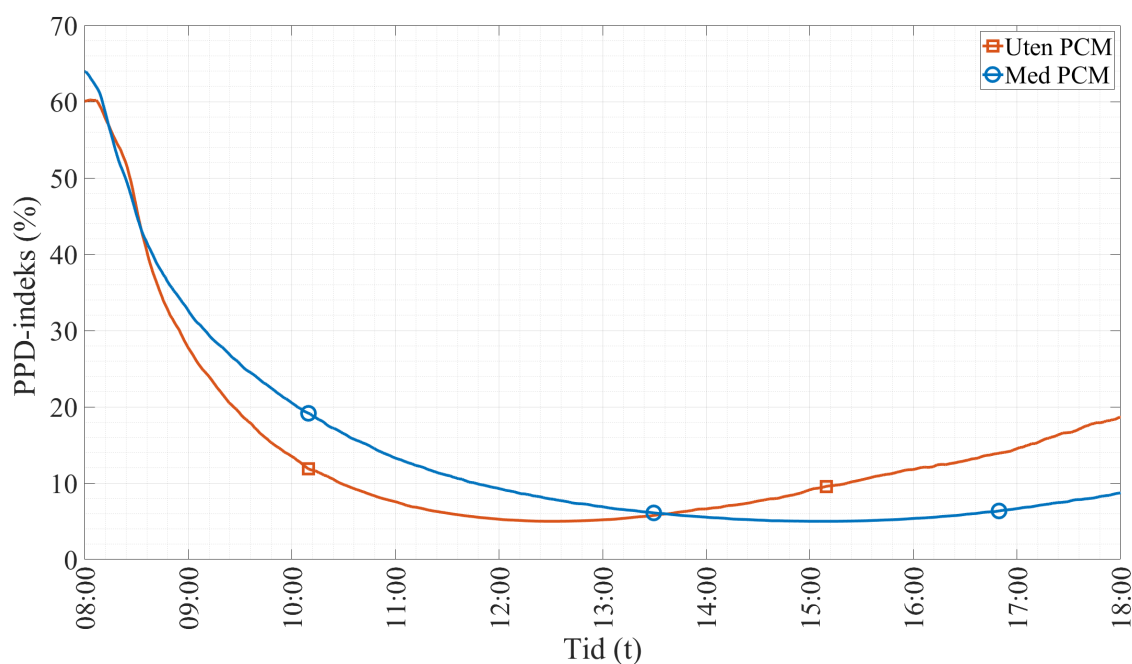
Eksperimentet tyder på at ved påføring med 1,7-2,1mm tykkelse med PCM-sparkel på overflatene i klimarommet, har PCM bidratt til å redusere operative temperaturen i klimarommet betydelig, og forlenget tiden det tok for at operativ temperatur kom opp til 26°C, med to timer. Dette viser at PCM-sparkelen har et stort avkjølingspotensial, som har bidratt til å redusere den operative temperaturen i klimarommet under driftstiden og den maksimale operative temperaturen.

5.1.2 Vurdering av PMV- og PPD-indeks

Figurene 5.2 og 5.3 nedenfor viser henholdsvis de beregnede PMV- og PPD-indeksene i klimarommet under driftstiden, for referanseekspertiment og PCM-eksperiment. Beregningene ble utført med vektet gjennomsnittlig lufttemperatur i klimarommet, gjennomsnittslufthastighet, relativt luftfuktighet, bekleddingsverdi på 0,6 Clo (Typisk sommerbekledning) og aktivitetsnivå på 1,2 Met (Stillesittende aktivitet). Plassering av målesensorene er beskrevet i kapittel 3.1.4.



Figur 5.2: Beregnet PMV-indeks i klimarommet



Figur 5.3: Beregnet PPD-indeks i klimarommet

Tabellen 5.2 nedenfor viser verdiene av beregnet PMV- og PPD-indeks for hver time i løpet av driftstiden, og evaluering i form av forskjellige kategorier i henhold til NS-EN ISO 7730 [20].

Tabell 5.2: Beregnet PMV- og PPD-indeks

	Kl	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
PMV	Uten PCM	-1,67	-1,04	-0,64	-0,35	-0,11	0,10	0,28	0,45	0,57	0,67	0,78
	Med PCM	-1,74	-1,14	-0,85	-0,62	-0,45	-0,30	-0,16	-0,02	0,14	0,28	0,40
PPD[%]	Uten PCM	60	28	13,5	7,6	5,2	5,1	6,6	9,1	11,8	14,5	18,6
	Med PCM	64	32	20	13,3	9,3	6,8	5,5	5	5,3	6,6	8,7
	Differanse	-4	-4	-6,5	-5,7	-4,1	-1,7	1,1	4,1	6,5	7,9	9,9
Kat.	Uten PCM	-	-	C	B	A	A	B	B	C	C	-
	Med PCM	-	-	-	C	B	B	A	A	A	B	B

I tillegg til operativ temperatur er PMV- og PPD-indeksene faktorer som kan brukes til å vurdere termisk inn klima. Indeksene forutsier antall personer som vil være misfornøyde med det termiske inn klimaet basert på bekledning og aktivitetsnivå.

PMV-indeksen fra tabell 5.2 ovenfor indikerer tydelig at kl 08:00 til 10:00 vil personer i klimarommet oppfatte det termiske inn klimaet for begge eksperimentene som kjøling. Men utover dagen vil temperaturen i klimarommet forsette å stige, og personer i klimarommet vil føle seg mindre kalde. PPD-indeksene i figur 5.3 ovenfor viser at ved kl 08:00 er det forventet at en andel på 60% vil være misfornøyde med det termiske inn klimaet i begge eksperimentene. Dette samsvarte veldig godt med PMV-indeksene, som indikerte at klimarommet var for kjølig.

Ved 12:00 nådde operativ temperatur for referanseeksperimentet 23,5°C og PMV-indeks var tilnærmet 0 med evaluering i kategori A, mens PCM-eksperimentet nådde PMV-indeksen kategori A to timer senere ved kl 14:00, da operativ temperaturen var på 23,6°C. Fra klokken 14:00 var det en betydelig forbedring av PMV-indeksene, med hensyn til at klimarommet var for varmt i eksperimentet uten PCM-sparkel. Derfor vil vurdering av forbedring rundt termisk komfort med PCM-sparkel være basert på klokken 14:00 til 18:00.

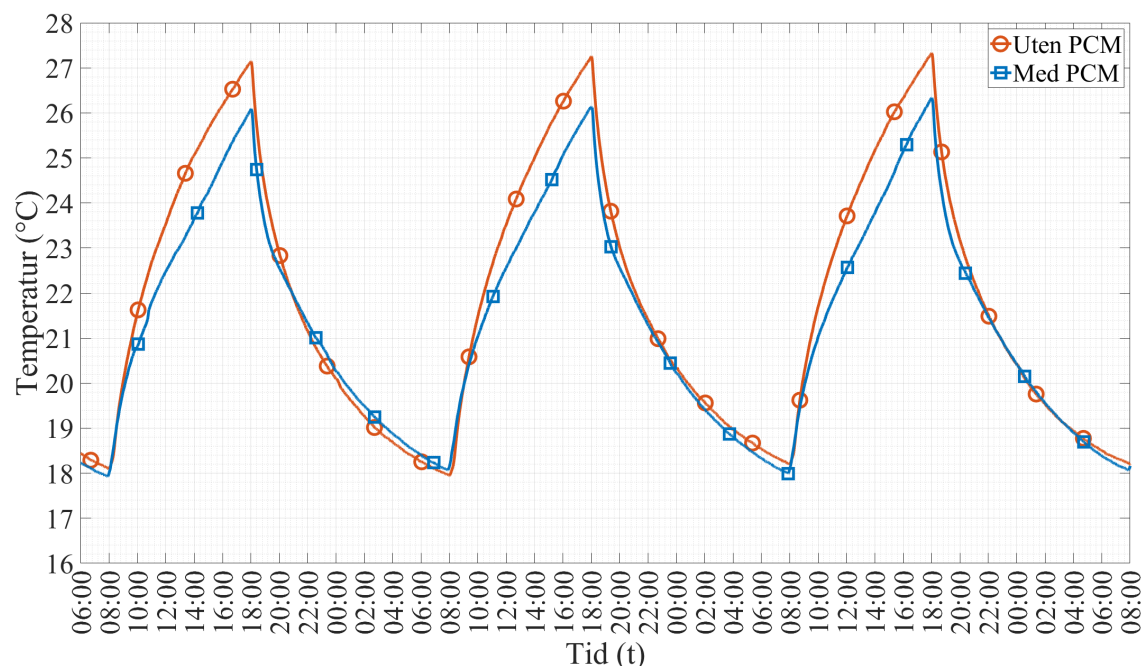
Ved å sammenligne PPD-indeksene og kategoriene for eksperimentene i tabell 5.2 ovenfor fra kl. 14:00-18:00, viser den generell bedre evaluering for eksperimentet med PCM-sparkel. Kl. 14:00 ble den forventede misnøyen på 5,5% evaluert i kategori A for PCM-eksperimentet, mens den forventede misnøyen for referanseeksperiment var på 6,6% som tilsvarer kategori B. Med økende operativ temperatur i løpet av dagen ble forskjellen i forbedring av termisk komfort større for hver time for PCM-eksperimentet. Ved kl 18:00 på slutten av driftstiden hadde PCM-eksperiment fremdeles PPD-indeks evaluering på kategori B, mens referanseeksperimentet ikke var tilstrekkelig for evaluering.

Sammelingen av PMV- og PPD-indeksene for referanseeksperimentet og PCM-eksperimentet indikerer at PCM-sparkel har bidratt til å redusere temperaturøkningen i klimarommet, noe som betydelig forbedret den termiske komforten i klimarommet.

5.1.3 Vurdering av overflatetemperatur

Gjennomsnittlig veggtemperatur

Figur 5.4 nedenfor viser beregnet vektet gjennomsnittlig overflatetemperatur for veggoverflatene i klimarommet for referanse-eksperiment og PCM-eksperiment. Tabell 5.3 nedenfor viser temperaturutviklingen ved forskjellige tider over en hel dag. Grafene i figur 5.4 er fra de siste tre dagene, og verdiene i tabell 5.3 er hentet fra den nest siste dagen av eksperimentene.



Figur 5.4: Vektet gjennomsnittlig overflatetemperatur for veggene i klimarommet

Tabell 5.3: Vektet gjennomsnittlig veggoverflatetemperatur

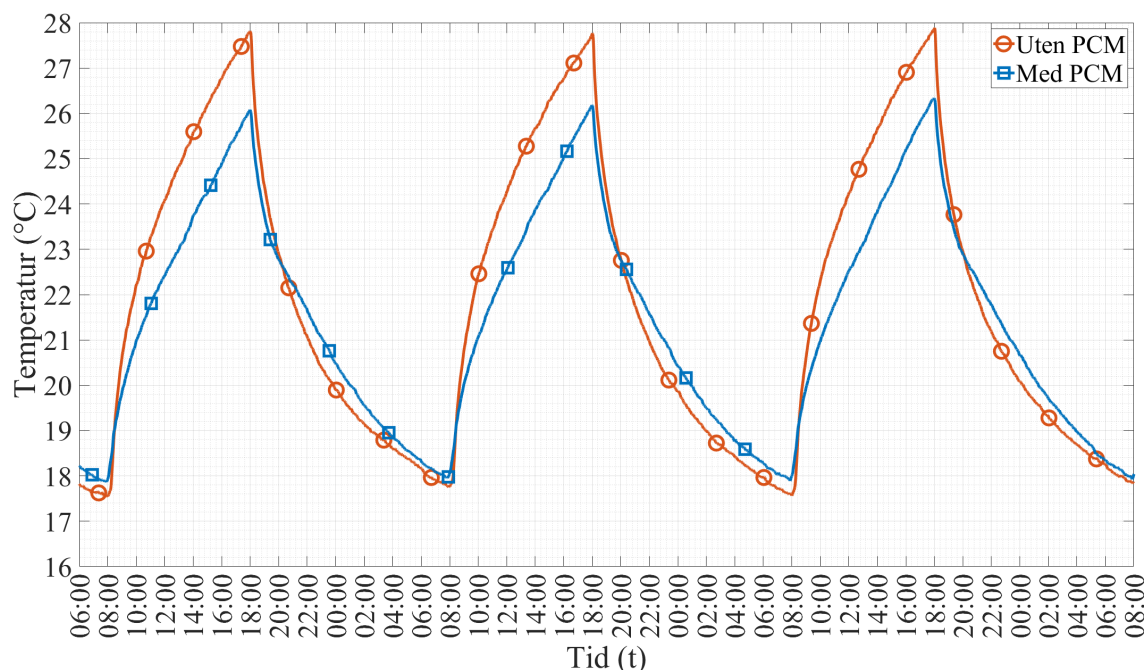
Kl.	Gjennomsnitt overflatetemperatur for alle veggene [°C]											
	08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	00:00	02:00	04:00	06:00
Uten PCM	17,9	21,5	23,5	25,0	26,3	27,3	23,0	21,4	20,3	19,5	18,9	18,3
Med PCM	18,0	21,0	22,6	23,8	25,1	26,1	22,6	21,3	20,2	19,3	18,7	18,4
Differanse	-0,1	0,5	0,9	1,2	1,2	1,2	0,4	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1

Fra klokken 08:00 til 09:00 var det identisk temperaturøkning for veggoverflatene med og uten PCM-sparkel. I det klokken ble 08:30 nådde overflatetemperaturen 19,5°C, og veggoverflate med PCM-sparkel viste en tydelig langsommere temperaturøkning, mens referanseeksperimentet fortsatte med en rask temperaturøkning. Ved temperaturområdet 19,5-20°C er overgangsområdet for PCM, der PCM absorberte varme i det den skifter fase, se figur 4.12 i kapittel 4.1.3. Dette stemte godt med gitt tekniske data med det begynnende smeltepunktet på 20°C for PCM.

Kl. 10:00 var overflatetemperaturen med PCM-sparkel 0,5°C lavere enn overflate uten. Kl. 12:00 økte temperaturforskjellen og steg til 0,9°C, og nådde den største temperaturforskjellen på 1,2°C ved klokken 14:00, denne temperaturforskjellen varte til kl 18:00. Kl. 18:00 nådde veggoverflatene med PCM-sparkelen temperatur på 26,1°C som er på toppen av overgangsområdet for PCM-sparkel, figur 4.12.

Gjennomsnittlig himlingstemperatur

Figur 5.5 nedenfor viser gjennomsnittlig overflatetemperatur for himling fra begge eksperimentene. Tabell 5.4 viser sammenligningen av gjennomsnittstemperaturen for himling med og uten PCM-sparkel. Grafene i figur 5.5 er hentet fra de siste tre dagene av eksperimentene, og verdiene i tabell 5.4 ble tatt fra den nest siste dagen.



Figur 5.5: Gjennomsnittlig temperatur for himlingsoverflate i klimarommet

Tabell 5.4: Overflatetemperatur for himling

Gjennomsnittlig overflatetemperatur for himling [°C]												
Kl.	08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	00:00	02:00	04:00	06:00
Uten PCM	17,8	22,4	24,3	25,7	26,8	27,8	22,7	21,0	19,9	19,0	18,4	18,0
Med PCM	18,0	21,0	22,5	23,9	25,1	26,2	22,7	21,5	20,4	19,5	18,8	18,3
Differanse	-0,2	1,4	1,8	1,8	1,7	1,6	0	-0,5	-0,5	-0,5	-0,4	-0,3

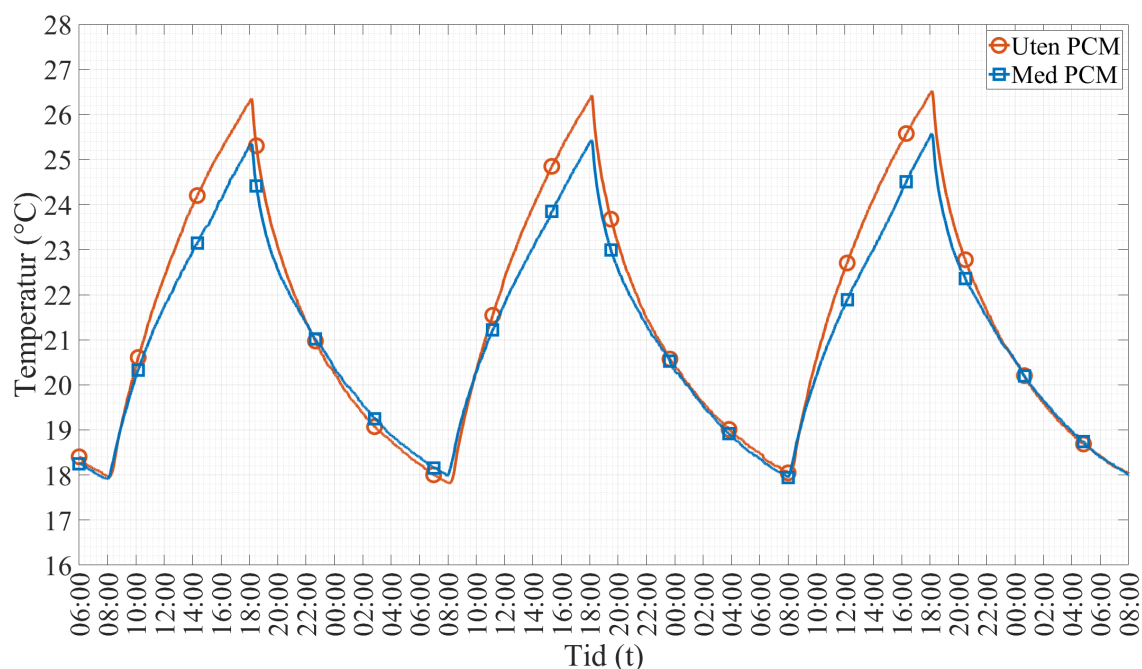
Figur 5.5 viser en klar forskjell i temperaturutvikling mellom himlingsoverflate med og uten PCM-sparkel. Kl. 08:00 var det tydelig at overflatetemperaturen på himling med PCM-sparkelen hadde høyere starttemperatur, med variasjon på 0,1-0,3°C. Sammenligning av grafene viser alt i alt raskere temperaturøkning for overflaten uten PCM-sparkel. Temperaturforskjellen begynte å bli synlig ved 19,4°C, som er i overgangsområdet der PCM begynte å smelte. Kl. 10:00 var temperaturforskjellen mellom overflatene allerede 1,4°C og fortsatte å øke. Den største temperaturforskjellen ble observert kl. 12:00 til 14:00 på 1,8°C.

Sammenligning av temperaturforskjeller på himlingsoverflater med veggoverflatene indikerte at kjølevirkningen av PCM-sparkelen var betydelig kraftigere på himlingsoverflatene. PCM-sparkel reduserte veggoverflatetemperaturen med 0,9-1,2°C ved 12:00-18:00, mens himlingsoverflatene hadde temperaturreduksjon på 1,6-1,8°C ved samme tid. Det ble observert identiske maksimale overflatetemperaturer ved kl 18:00 for himlingsoverflate og veggoverflatene med PCM-sparkel på 26,2°C.

I løpet av avkjølingsperioden, fra 18:00 til 20:00, falt overflatetemperaturen med og uten PCM-sparkelen like raskt, se figur 5.5. Umiddelbart etter at overflatene med PCM-sparkel nådde 23°C , viste det en tydelig knekk hvor temperaturen falt mye saktere. Tekniske data fra Gyproc opplyste at toppsmeltepunktet for PCM var 24°C , se tabell 4.3 i kapittel 4.1.3. Knekkpunktet ved kl 20:00 indikerte at PCM var i overgangsfase ved 23°C , som i dette tilfellet, avgitt den termiske energien som var lagret i driftstiden. Som et resultat var overflatetemperaturen med PCM-sparkelen høyere, dette forklares hvorfor starttemperaturen klokken 08.00 var høyere for overflater med PCM.

Gjennomsnittlig gulvtemperatur

Figur 5.6 nedenfor viser gulvets gjennomsnittlige overflatetemperatur for referanseeksperiment og PCM-eksperiment. Grafene i figuren er hentet fra de siste tre dagene for begge eksperimentene.



Figur 5.6: Gjennomsnitt overflatetemperatur for gulvet i klimarommet

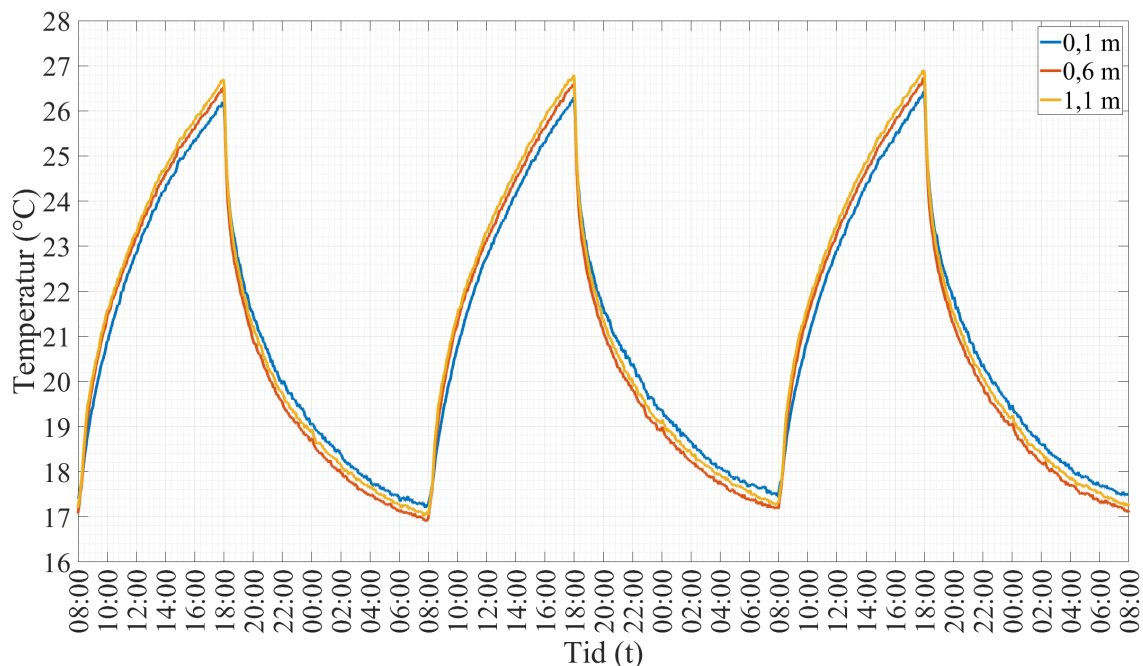
Grafene i figur 5.6 ovenfor indikerte at selv om PCM-sparkel ikke ble påført på gulvflatene, ble gulvets overflatetemperatur likevel redusert. Den gjennomsnittlige overflatetemperaturen på gulvet oppførte seg relativt identisk med overflatetemperaturen på veggene, med $0,7\text{--}0,8^{\circ}\text{C}$ lavere ved kl. 09:00–18:00. Dette betyr at ved å redusere lufttemperaturen klimarommet, vil temperaturen på gulvoverflaten også reduseres.

Etter å ha observert overflatetemperaturutviklingene i klimarommet tyder det at kjølevirkningen til PCM-sparkelen startet øyeblikkelig da overflatetemperaturen nådde smeltepunktet ved 20°C . Derfor er det viktig å ta hensyn til smeltepunktet til PCM-sparkelen når den skal påføres, slik at PCM begynner å smelte tidlig på dagen for full utnyttelse av temperaturreduksjonen.

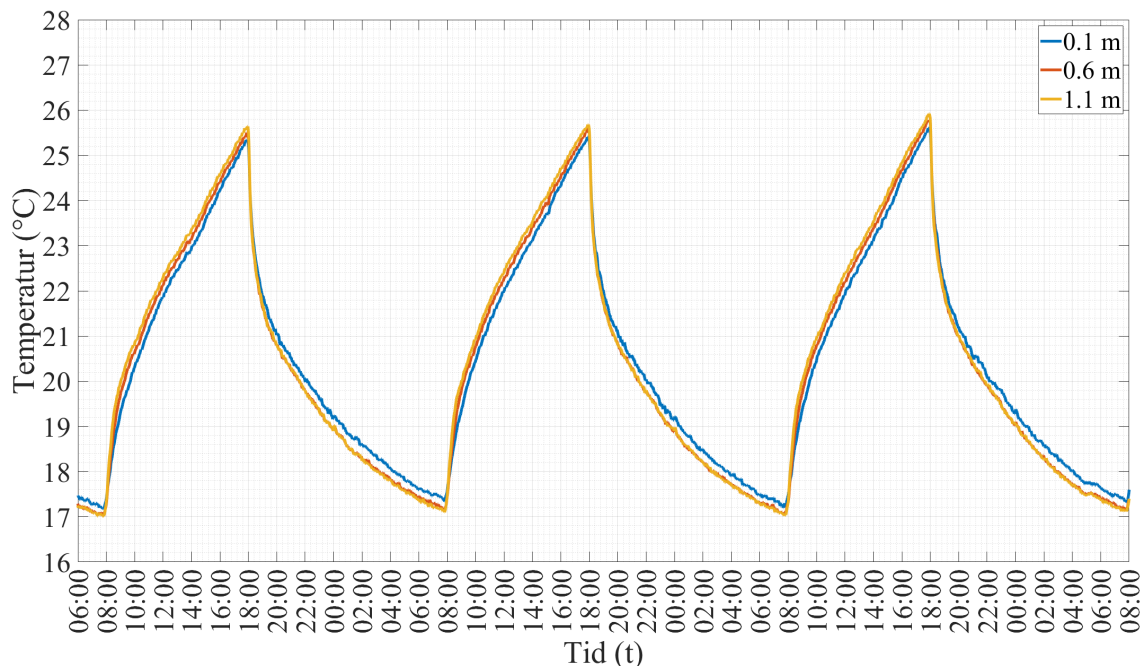
5.1.4 Måling i oppholdssone

Lufttemperatur

Figurene 5.7 og 5.8 nedenfor viser grafene for lufttemperatur målt i oppholdssonen fra de tre siste dagene med eksperiment uten og med PCM-sparkel. Måling av lufttemperatur ble utført i tre høyder: 0,1m, 0,6m og 1,1m.



Figur 5.7: Lufttemperatur målt i referanse eksperiment uten PCM-sparkel



Figur 5.8: Lufttemperatur målt i eksperiment med PCM-sparkel

Hensikten var å vurdere lokal termisk ubehag ved å undersøke forbedringen av den vertikale lufttemperaturforskjellen med PCM-sparkel. Grafene ble derfor valgt å fremstilles på to separate figurer for lettere tolkning. På grunn av den lave temperaturgradienten i forskjellige høyder for begge eksperimentene ble vurdering av lokal termisk ubehag derfor ikke gjennomført.

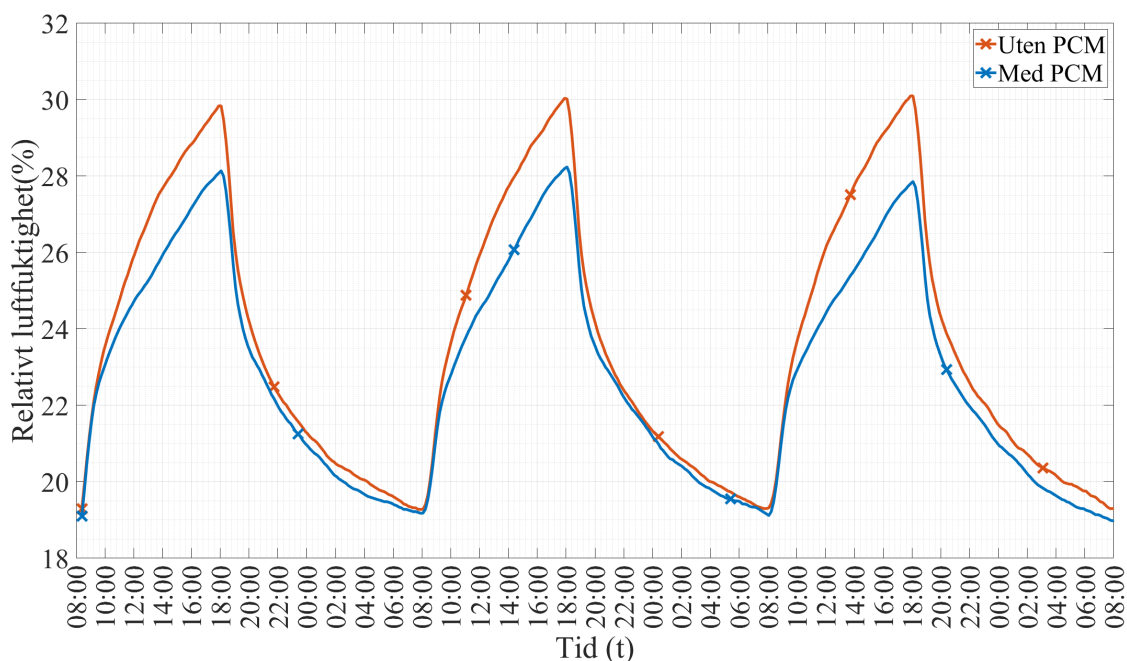
Tabell 5.5: Sammenligning av lufttemperaturene målt i klimarommet

	Lufttemperatur målt i oppholdssone [°C]					
	Ved 0,1 m		Ved 0,6 m		Ved 1,1 m	
	Uten PCM	Med PCM	Uten PCM	Med PCM	Uten PCM	Med PCM
Ved kl. 08:00	17,2	17,2	16,9	17,1	17,0	17,0
Ved kl. 18:00	26,5	25,4	26,7	25,5	26,9	25,8

I tabellen 5.5 ble det observert like starttemperaturer ved kl. 08:00 for begge tilfellene. Temperaturforskjellen ved klokken 18:00 for referanseeksperimentet og PCM-eksperimentet var $1,1^{\circ}\text{C}$ ved $0,1\text{m}$ høyde, $1,2^{\circ}\text{C}$ ved $0,6\text{m}$ høyde og $1,1^{\circ}\text{C}$ ved $1,1\text{m}$ høyde. Disse temperaturforskjellene indikerte at temperaturreduksjonen med PCM-sparkel var like for alle høyder. Kjølevirkning av PCM-sparkel startet da PCM var i overgangsområdet ved klokken 08:30, som førte til lavere temperaturøkning.

Relativ luftfuktighet

Relativ luftfuktighet er en faktor som er utfordrende å ha full kontroll over, fordi relativ luftfuktighet i bygninger er avhenging av uteluften som blir benyttet til ventilering [24].

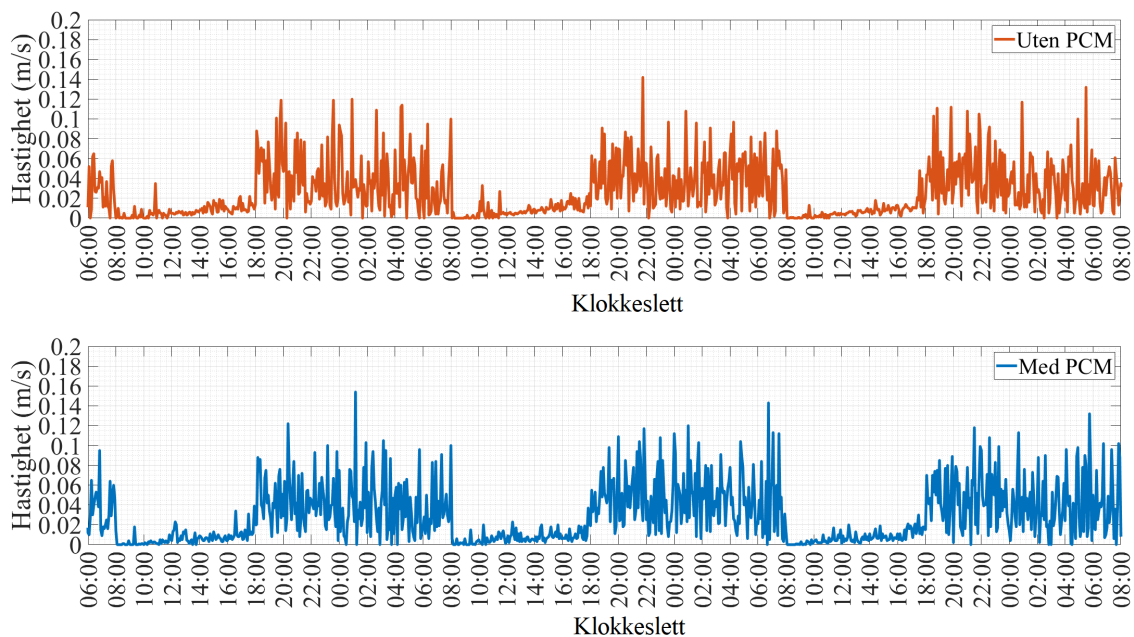


Figur 5.9: Relativt luftfuktighet mål i klimarommet ved $1,1\text{m}$ over gulvet

Målingene i figur 5.9 indikerte liten variasjon for relativt luftfuktighet i begge eksperimentene, med variasjon fra 20 til 30% (Eksperimentene utført i vintermånedene). Om sommeren vil relativ luftfuktighet innendørs være høyere og gjerne opp til 60% [45] eller mer. 30% som er den høyeste verdien i måling ble derfor brukt til beregning av PMV- og PPD-indeksene.

Lufthastighet

Grafene i figur 5.10 nedenfor viser lufthastighet målt i referanseeksperiment og PCM-eksperiment. Målingene er hentet fra de siste tre dagene for begge eksperimentene.



Figur 5.10: Lufthastighet i målt i oppholdssone ved 1,1m over gulvet

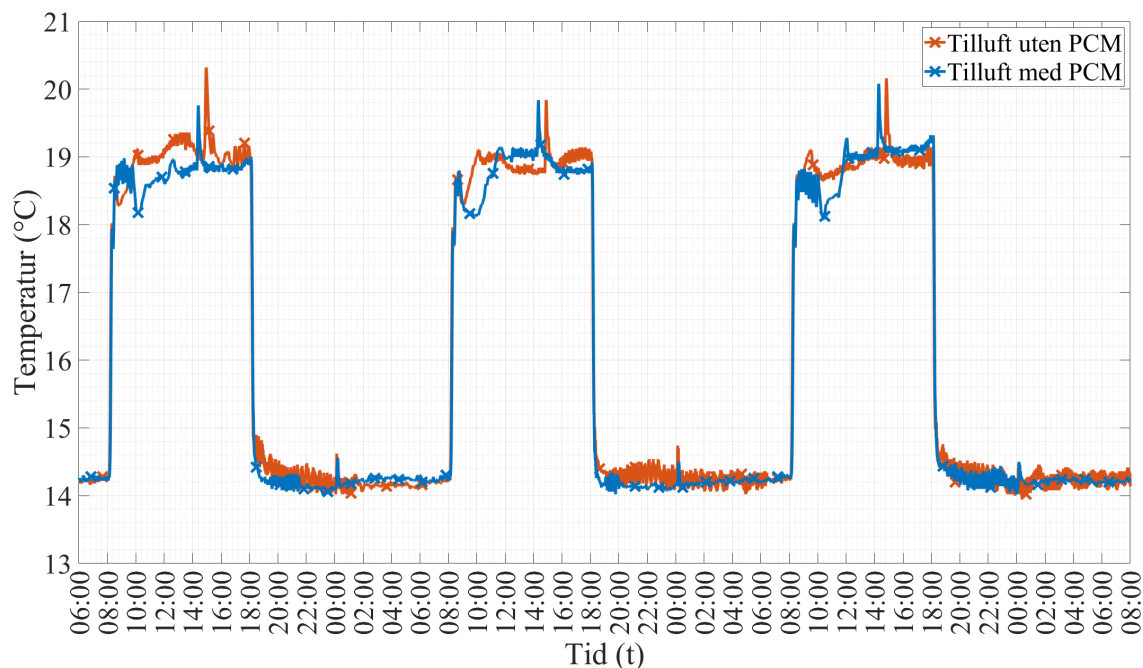
Grafene i figur 5.10 viser større forskjell på lufthastighet mellom 18:00-08:00 sammenlignet med lufthastighet mellom 08:00-18:00. Dette skyldtes at nattventilasjon for nedkjøling av PCM-sparkel ble satt i gang ved kl 18:00 til kl 08:00, med mye høyere luftmengde. Målingene i grafene over viser også at lufthastigheten aldri steg over $0,2m/s$, noe som er et viktig kriterium for bruk av formelen 2.2 til beregning av operativ temperatur.

Gjennomsnittlig lufthastighet i og utenom driftstid ble beregnet, og det ble oppdaget at begge eksperimentene hadde identisk gjennomsnittlig lufthastighet, både i og utenom driftstid. Den beregnede gjennomsnittlige lufthastighet, $0,007m/s$, under driftstid ble brukt til å beregne PMV- og PPD-indeksene for begge eksperimentene.

Lokal termisk ubehag i funksjonene ble ikke vurdert. Årsaken var at den målte lufthastigheten og beregningen av gjennomsnittstemperaturen i klimarommet viste relativt identisk lufthastighet for begge eksperimentene. Dette er selvfølgelig fordi PCM-sparkelen ikke påvirket lufthastigheten i klimarommet.

5.1.5 Tilluftstemperatur

Figur 5.11 nedenfor viser måling av tilluftstemperaturen for eksperimentene utført med og uten PCM-sparkel. Måling og logging av tilluftstemperatur var utført for å dokumentere at tilluftstemperatur var uendret for begge eksperimentene. Det var viktig å holde tilluftstemperatur uendret både for referanseeksperiment og PCM-eksperiment, fordi det direkte påvirket temperaturutviklingen i klimarommet.



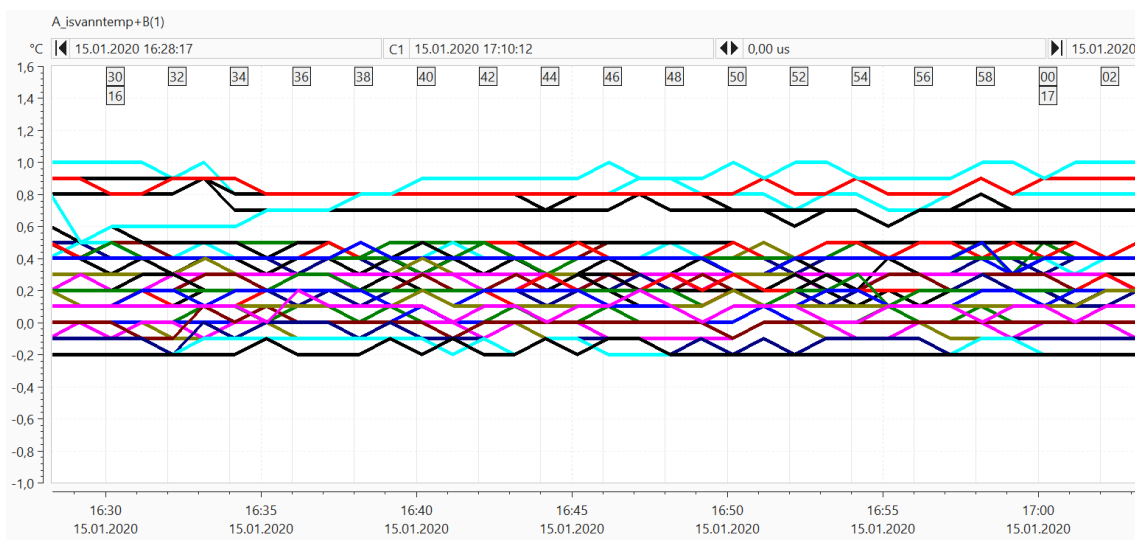
Figur 5.11: Tilluftstemperatur målt i eksperimentene med og uten PCM-sparkel

Måling av tilluftstemperatur indikerte at ventilasjonssystemet hadde utfordringen med å levere jevn tilluftstemperatur i driftstiden. I en kort periode steg tilluftstemperaturen raskt til 20°C, og dette skjedde regelmessig for begge eksperimentene.

Derfor ble den gjennomsnittlige tilluftstemperaturen i og utenfor driftstiden beregnet for begge eksperimentene for sammenligning. Verdier som brukes til å beregne gjennomsnittlig lufttemperatur er hentet fra de siste tre dagene av begge eksperimentene. Resultatet viste at den gjennomsnittlige tilluftstemperaturen for begge eksperimentene var identiske. Med gjennomsnittlig tilluftstemperatur i driftstid på 18,83°C og 18,92°C, og 14,26°C og 14,29°C for utennomsdriftstid. Det kunne derfor fastslås at tilluftstemperaturen var uendret for begge eksperimentene, og vil derfor ikke ha noen innflytelse på målingen av temperaturen i klimarommet.

5.1.6 Isvannstest

Figur 5.12 nedenfor viser isvannstestgrafene fra Intab PC-loggere og termoelementene som ble logget i 30 minutter. Selv om måleinstrumentene som ble brukt til eksperimentene var kalibrert før eksperimentene ble utført, var det fremdeles en usikkerhet om målenøyaktigheten gitt av produsentens datablad på $1,5^{\circ}\text{C}$ [33]. Praktisk vurdering av målenøyaktigheten til disse temperaturfølerne ble derfor utført, ved å logge temperaturen i isvann mens isen smelter. Temperaturen på ismeltingen er kjent for å være ved 0°C , og temperaturfølere som hadde store avvike kunne identifiseres.



Figur 5.12: Isvannstesten logget i 30 minutter

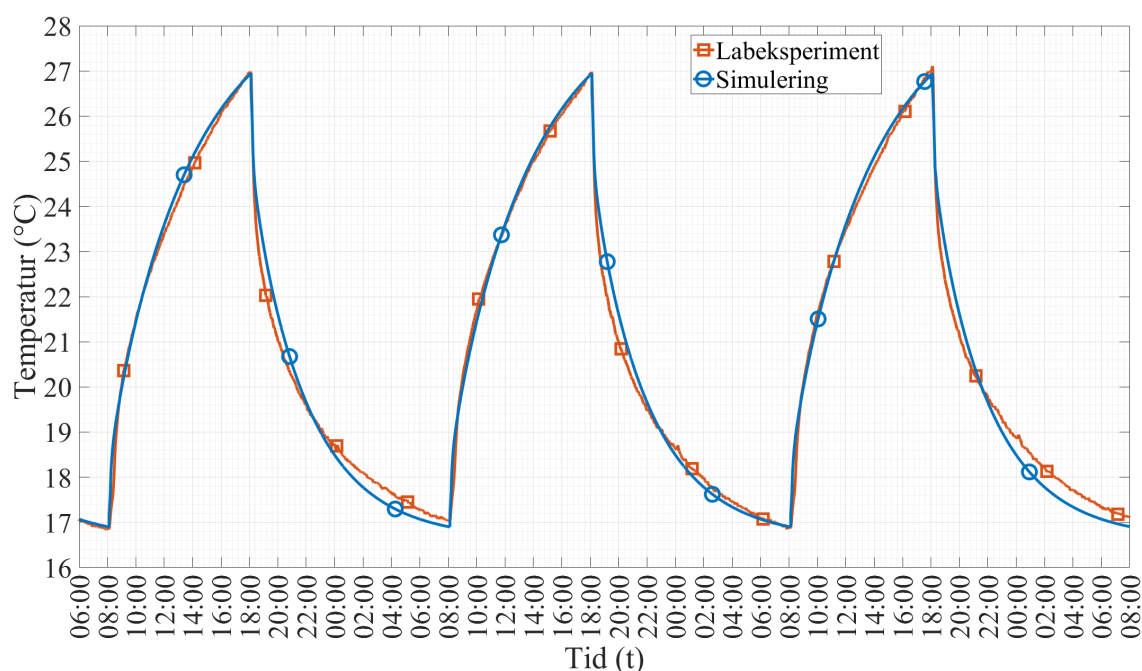
Isvannstesten indikerte gode nøyaktighet for de fleste temperaturfølerene, som var godt under oppgitt nøyaktighet av produsenten, se figur 5.12. Selv om isvannstesten ikke var helt optimalt med hensyn til temperaturgradient, var de fleste temperaturfølere i området målt fra $-0,2^{\circ}\text{C}$ til $0,5^{\circ}\text{C}$, med unntak av fire temperaturfølere som var i måleområdet $0,6^{\circ}\text{C}$ til 1°C . Det kan derfor bekreftes at temperaturfølerne lå godt under produsentens oppgitte nøyaktighet. Likevel bør det bli forventet et avvik på målingene med $0,2^{\circ}\text{C}$ til 1°C .

5.2 Numerisk simulering

I dette kapittelet blir resultatene fra nøyaktighetsvurdering for simuleringmodellen og PCM-data brukt i simuleringene presentert. Videre vil resultatene fra analysen med numeriske simuleringer fra IDA-ICE presenteres og diskuteres, med hensyn til innvirkning på kjøleytelsen av PCM-sparkel ved de forskjellige simuleringsscenarioer.

5.2.1 Validering av simuleringmodell og PCM-data

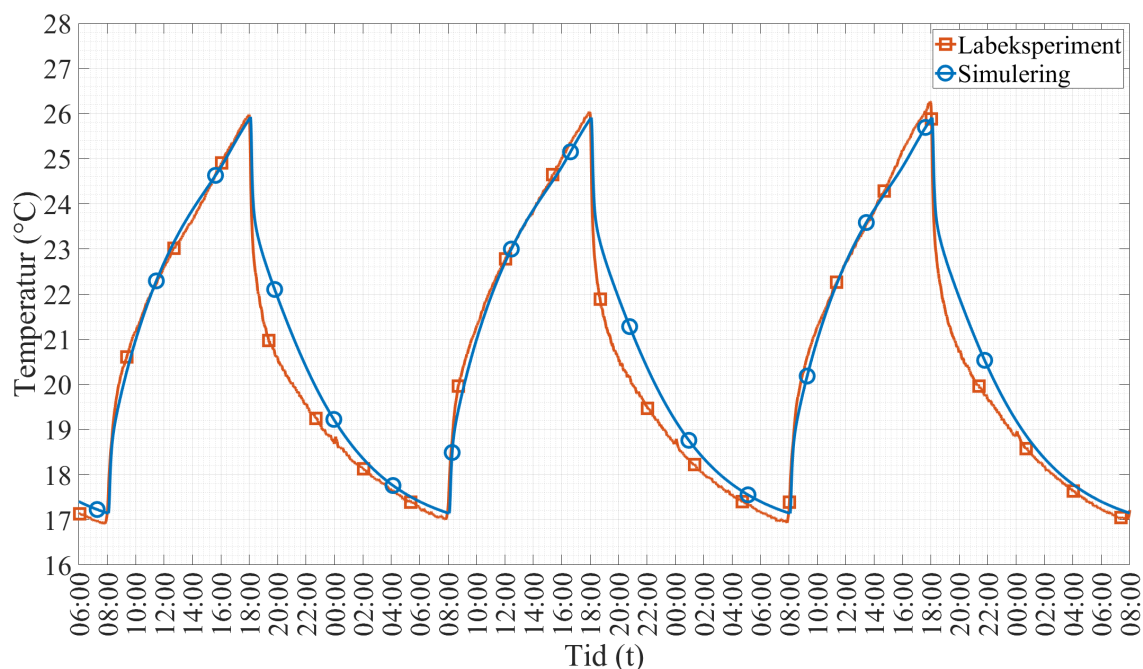
Figur 5.13 nedenfor viser en visuell sammenligning mellom referansemåling fra eksperimentet uten PCM-sparkel og resultatet fra simulering i IDA-ICE, og figur 5.14 på neste side er sammenligning av måling i klimarommet med PCM-sparkel, og resultatet fra simulering med PCM-data implementert i den validerte IDA-ICE-modellen.



Figur 5.13: Sammenligning av gjennomsnitt lufttemperatur mellom referansemåling og simulering i IDA-ICE

I figurene 5.13 og 5.14 blir vektet gjennomsnittlig lufttemperatur målt i klimarommet sammenlignet med den gjennomsnittstemperaturen simulert i IDA-ICE. Vektet gjennomsnittlig lufttemperaturen i klimarommet ble beregnet for lufttemperatur målt i høyder 0,1m, 0,6m, 1,1m og 2,2m (ved avtrekksventilen).

Under oppvarming av klimarommet i tidsperioden mellom kl 08:00-18:00, viser grafene i begge figurene nesten identisk temperaturutvikling mellom måling og simulering. Start-, slutttemperatur og temperaturøkning for simulering stemte meget bra med målingene. Avkjøling av klimarommet mellom 18:00 og 08:00 viste alt i alt relativt lik temperaturutvikling for figur 5.13 ovenfor, mens i figur 5.14 på neste side var avviket større i tidsperioden kl 18:10-02:00.



Figur 5.14: Sammenligning av gjennomsnitt lufttemperatur mellom PCM-eksperiment og simulering i IDA-ICE

Nøyaktighetsvurdering

Måling fra referanseeksperimentet i periode 08:00 24.01.2020 til 08:00 27.01.2020 ble brukt for å validere simuleringmodellen, og måling fra PCM-eksperimentet i periode 08:00 03.02.2020 til 08:00 06.02.2020 ble brukt for å validere PCM-data brukt i simuleringmodellen, se tabell 5.6 nedenfor. Temperatur-datapunktene ble logget hvert minutt under eksperimentene. Med måleperiode på tre dager og datapunkter logget hvert minutt, tilsvarte dette totalt 4321 datapunkter som ble brukt til nøyaktighetsvurderingene. Formel for beregning av RMSE, NRMSE og CVRMSE er beskrevet i kapittel 2.4.

Tidsperiode		RMSE [°C]	NRMSE [%]	CVRMSE [%]
24-27/01/2020	Validering av simuleringmodell	0,31	3	1,49
03-06/02/2020	Validering av PCM-data	0,49	5,3	2,41

Tabell 5.6: Nøyaktighetsvurdering av simuleringmodell

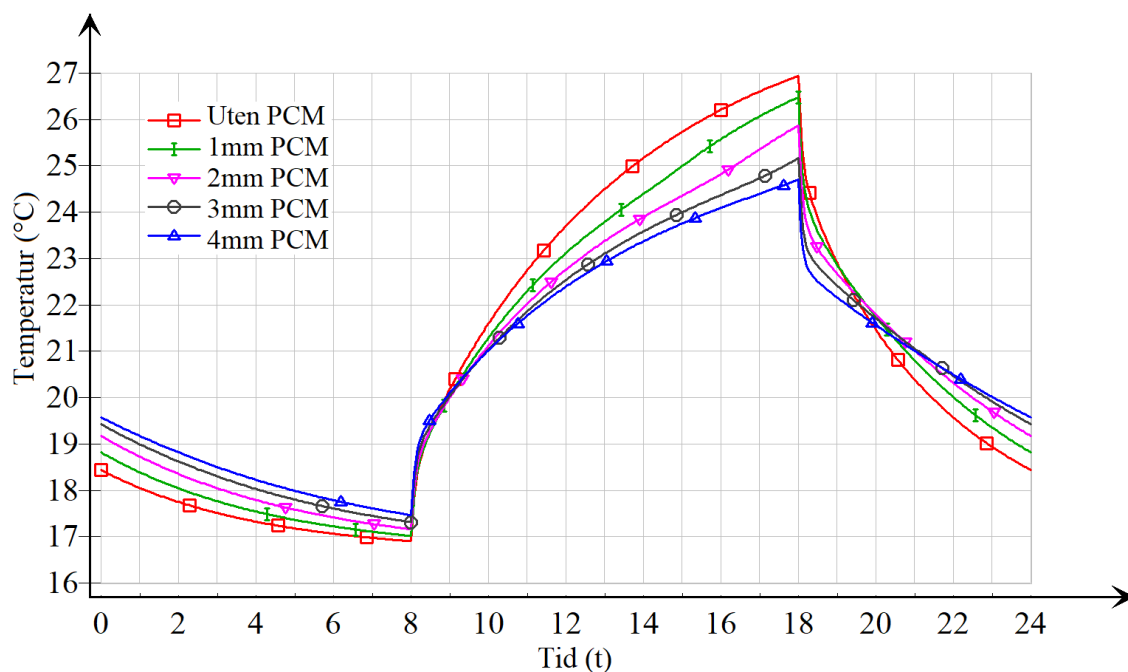
ASHRAE Retningslinje 14-2014 [1] beskrevet at modellen kan betraktet som kalibrert hvis CVRMSE-indeks er lavere enn 15% når den månedlig data er benyttet og 30% når timesvis data er benyttet. Resultatene fra beregningen viser meget god CVRMSE-indeks på 1,49% og 2,41%. Dette betyr at både simuleringmodellen og PCM-data brukt i simulering hadde en meget god overensstemmelse med målte dataene fra eksperimentene.

Sammenligning av beregnet NRMSE-indeks for validering av PCM-data på 5,3% og NRSME-indeks for eksperimentet utført av Cornaro et al. 2007 [43] viser at dette har en veldig god overensstemmelse. Hvor NRMSE-indeksene var 5,0% og 5,1% for eksperimentene som validerte PCM-håndtering i IDA-ICE.

5.2.2 Kjøleytelse for PCM-sparkel i forskjellige tykkelser

Figurene 5.15 og 5.16 er resultatet av IDA-ICE simuleringene for å undersøke kjøleytelsen på PCM-sparkelen med tykkelse 1mm , 2mm , 3mm og 4mm . Simuleringene ble utført med Oslo-klimadata og under forutsetningen om å reprodusere de samme forholdene som ble brukt i eksperimentene.

Forskjellige PCM-tykkelse påført på vegg- og himlingsoverflater



Figur 5.15: Operativ temperatur med ulike PCM-tykkelse på vegg- og himlingsoverflate

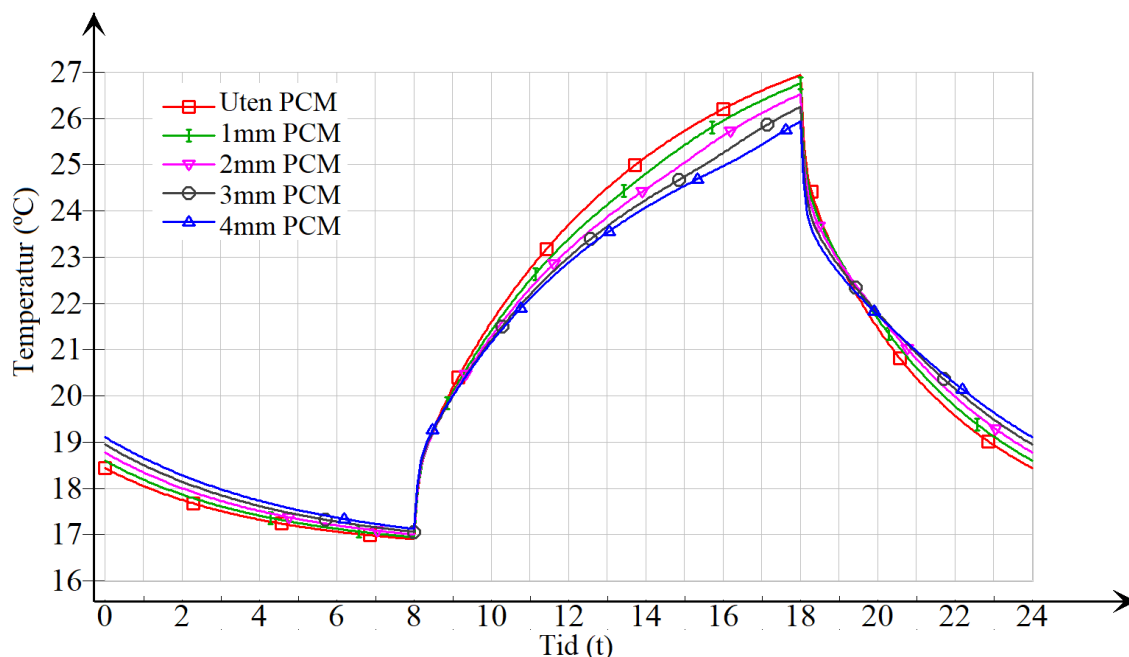
Figur 5.15 ovenfor viser operativ temperatur fra simuleringene for PCM-sparkelen påført på vegg- og himlingsoverflatene. Resultatene indikerte at tykkere lag med PCM-sparkel generelt ga bedre kjøleytelse og tilsvarte høyere temperaturreduksjon. I tillegg samsvarte temperaturutviklingen med labeksperimentet, der temperaturøkningen i klimarommet med PCM-sparkel steg saktere i det PCM var i faseendring ved 20°C kl 09:00. Maksimal temperaturreduksjon ble observert til å variere ved forskjellige tykkelser med forskjellige tider. For simulering med PCM-sparkel på 2mm var den største temperaturreduksjonen kl. 14:00 og for 4mm var det tre timer senere ved kl. 17:00.

Kl. 18:00 nådde referansesimuleringen operativ temperatur på 27°C , og 1mm med PCM-sparkel nådde $26,5^{\circ}\text{C}$. Dette betyr at man kan fremdeles forvente reduksjon i temperaturtoppen på $0,5^{\circ}\text{C}$ med 1mm PCM-sparkel. Likevel var temperaturen over 26°C , som var kravet satt i henhold til Arbeidstilsynet Veiledning 444 [21]. Mens 2mm , 3mm og 4mm med PCM-sparkel var godt under kravet ved samme tidpunktet, med reduksjon av temperaturtoppene på $2,4^{\circ}\text{C}$ for 4mm , $1,9^{\circ}\text{C}$ for 3mm og $1,1^{\circ}\text{C}$ for 2mm .

Etter kl 18:00 da PCM-sparkel ble avkjølt, ble det observert at operativ temperaturen falt mye saktere når et tykkere lag med PCM-sparkel benyttes. Dette tyder

at PCM frigjorde den absorberte latente varmen til omgivelsene ved avkjøling. Tykkere lag og større mengde med PCM-sparkel førte til større lagringskapasitet, noe som betyr at mer varme frigjøres ved avkjøling av PCM. Derfor hadde tykkere lag med PCM-sparkel høyere starttemperatur kl 08:00.

Forskjellige PCM-tykkelser påført på himlingoverflate



Figur 5.16: Operativ temperatur med ulike PCM-tykkelse på himlingoverflate

I figur 5.16 viser grafene for operativ temperaturutvikling fra simulering med PCM-sparkel påført på himlingoverflaten. Grafene tyder at kjøleytelsen av PCM-sparkelen ble kraftig redusert på grunn av mindre PCM-mengder og smøreoverflate.

Likevel viser grafene betydelig kjøleytelse for PCM-sparkelen med 3-4mm på himlingoverflaten. Simuleringen tydet på at i dette tilfellet var det mulig å redusere temperaturtoppen med $0,8^{\circ}\text{C}$ ved kl 18:00, og over 1°C ved tidspunktet 14:00-18:00, hvis 3mm med PCM-sparkel ble påført på himlingoverflaten. Det ble observert at operativ temperatur for simulering med 1mm PCM påført på himlingoverflaten nådde 26°C ved 16:00, som er 30 minutter senere enn referansesimulering. Figur 5.16 og 5.15 tydet på at tiden det tok før temperaturen nådde 26°C tok lengre tid med tykkere lag med PCM-sparkel.

Fra observasjon av simuleringene, indikeres det at tykkelsen på PCM-sparkelen har stor innvirkning på PCM-sparkelens evne til å redusere romtemperaturen. I figur 5.15 på forrige side ble det oppdaget at den maksimale temperaturreduksjonen skjedde ved forskjellige tykkelser av PCM-sparkelen. Med tykkere lag av PCM-sparkel forekom den maksimale temperaturreduksjonen ved senere tidspunkt, som tydet at tykkere lag med PCM-sparkel brukte lenger tid på å smelte fullstendig. Det er tydelig at tykkere lag med PCM-sparkel har et større lagringspotensial, noe som betyr større kjølepotensial. Men for å få full utnyttelse av PCM-sparkelen må tykkelsen vurderes for å oppnå fullstendig smelting av PCM i løpet av driftstiden.

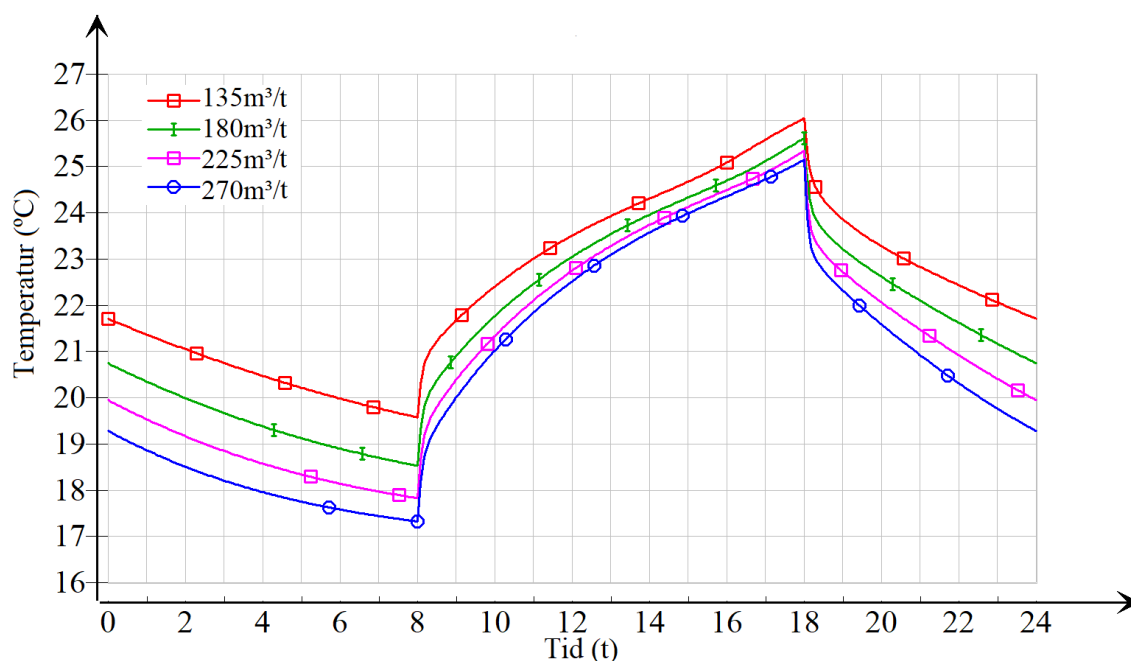
5.2.3 Kjøleytelse for PCM-sparkel ved variasjon av nattventilasjon

Når PCM lagres med latent termisk energi på slutten av dagen, har nattventilasjon en viktig innflytelse for PCM for å avgi den lagrede latente varmen, slik at PCM er klar til å lagre mer varme dagen etter. I disse simuleringsscenariene ble effektiviteten av nattventilasjon undersøkt for avkjøling av PCM-sparkelen, ved å forberede PCM-sparkelen for varmelagring dagen etter.

Tilluftstemperaturen og luftmengden ble variert for den samme simuleringssmodellen, med PCM-sparkelen påført på vegg- og himlingoverflater med tykkelse på 3mm. Simuleringene ble utført med Oslo-klimadata og forutsatt å reprodusere de samme forholdene som ble brukt i labeksperimentet.

Variasjon av luftmengde for nattventilasjon

I dette simuleringsscenariet ble effektiviteten av luftmengde for avkjøling av PCM-sparkel undersøkt. Tilluftstemperaturen var satt til 15°C med varierende luftmengder på 135m³/t, 180m³/t, 225m³/t, og 270m³/t.



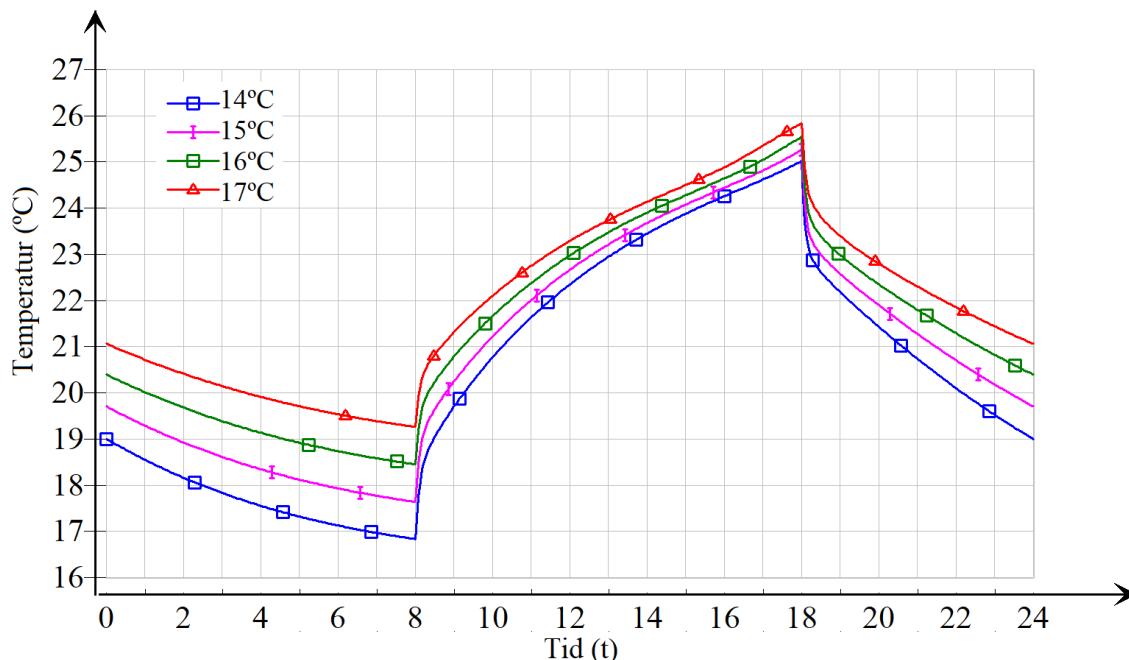
Figur 5.17: Operativ temperatur ved variasjon av luftmengde for nattventilasjon

Figur 5.17 indikerer at luftmengde har stor innvirkning for avkjøling av PCM. Høyere luftmengde har hjulpet PCM-sparkelen med å gi bedre temperaturreduksjon under driftstiden, og reduksjon av temperaturtoppen ved slutten av driftstid.

Som nevnt tidligere var smeltetemperatur for PCM på 20°C. Med en stor forskjell i starttemperaturen kl. 08:00, ble PCM smeltepunktet nådd på forskjellige tidspunkt. I tilfellet der starttemperaturen var lav, tok det lengre tid før PCM oppnådde smeltetemperatur. Dette medførte at den maksimale temperaturreduksjon ville variere for disse tilfellene, selv med samme tykkelse på PCM-sparkel. Ved kl. 10:00 var temperaturforskjellen mellom luftmengde på 135m³/t og 270m³/t på 1,4°C, men ved kl 13:00 var temperaturforskjellen 0,8°C.

Variasjon av tilluftstemperatur for nattventilasjon

I dette simuleringsscenarioet ble effektiviteten av tilluftstemperaturen for nattventilasjon til avkjøling av PCM-sparkel undersøkt. Luftmengden var satt til $240m^3/t$ for alle simuleringene, med variasjon på tilluftstemperatur på 14°C , 15°C , 16°C og 17°C .



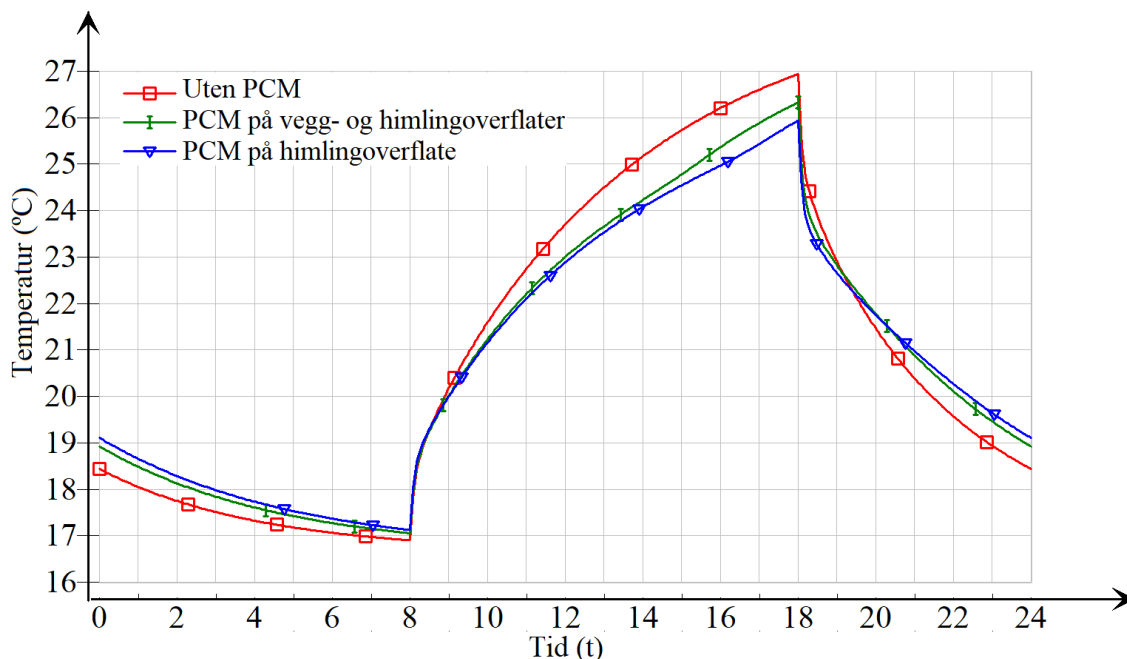
Figur 5.18: Operativ temperatur ved variasjon av tilluftstemperatur for nattventilasjon

Figur 5.18 viser at tilluftstemperaturen, på samme måte som luftmengden, er en viktig faktor som bidrar til å avkjøle av PCM. Grafene over viser at starttemperaturen kl 08:00 senkes tilnærmet proporsjonal med tilluftstemperaturen. Dette indikerte at tilluftstemperaturen har veldig stor innvirkning på avkjøling av PCM. Forskjellige tidspunkter for maksimale temperaturreduksjon ble også observert i denne figuren.

Fra observasjon av simuleringene, viser det at ved å hjelpe PCM med avkjøling og størkning om natten, vil PCM-sparkelen ha større potensial for latent varmelagring dagen etter, hvor tilluftstemperaturen og luftmengden har store innvirkninger på avkjøling av PCM-sparkelen. Nattventilasjon bør utformes til å gi tilstrekkelig avkjøling av PCM om natten, slik at PCM stivner helt med passende starttemperatur om morgenen.

5.2.4 Innvirkning av størrelsen på PCM-smøreflater

Figur 5.19 viser resultatet av simuleringene ved sammenligning av grafer med samme mengde PCM-sparkelen og referansesimuleringen. Den ene grafen viser utviklingen av operativ temperatur med 4mm PCM-sparkel påført bare på himlingsoverflate, og den andre grafen viser temperaturutviklingen for $1,27\text{mm}$ med PCM-sparkel fordelt på vegg- og himlingsoverflatene. Simuleringene ble utført med Oslo-klimadata med forutsetning om å reprodusere de samme forholdene som ble brukt i labeksperimentet.



Figur 5.19: Temperaturutvikling ved variasjon på størrelsen på PCM-smøreflate

Figur 5.19 indikerte at med samme mengde PCM-sparkel, ga påføring av sparkel med tykkelse 4mm på himlingsoverflater større kjøleytelse, sammenlignet med å fordele PCM-sparkel utover en større overflate med tynnere lag. Temperaturforskjellen mellom disse var relativt liten fram til kl 16:00, da 4mm med PCM-sparkel på himlingsoverflate nådde den maksimale temperaturreduksjonen ved senere tidpunkt, med temperaturforskjell på $0,5^\circ\text{C}$.

Som det ble observert i figur 5.15 ved sammenligning av ulike tykkelse, i det tilfellet der et tykkere lag med PCM-sparkel ble brukt, tok det lenger tid før maksimal temperaturreduksjon ble nådd. Dette indikerte at tynnere lag med PCM-sparkel tok kortere tid å smelte fullstendig, mens tykkere lag med PCM-sparkel brukte lengre tid, noe som førte til ytterligere kjølevirkning.

Fra observasjon av simuleringene, indikeres det at med samme mengde PCM-sparkel, vil størrelsen på smøreflatten ha liten innvirkning på kjøleytelsen. Men tykkelsen på PCM-sparkel derimot spiller en større rolle, fordi tykkere lag med PCM-sparkel tok lenger tid til å nå fullstendig metning, noe som førte til ytterligere kjølevirkning.

Kapittel 6

Konklusjon

Hensikten med denne oppgaven var å undersøke effektiviteten til PCM-sparkel med hensyn til passiv kjøling av et kontor om sommeren. Målinger ble utført i et klimarom med et gulvareal på $14m^2$, der PCM-sparkelen ble påført på vegg- og himlingoverflatene med en tykkelse på $1,7-2mm$. Temperatur i rommet ble målt over fem påfølgende dager med varmetilskudd og ventilasjonsluftmengde som er representative for sommerforhold. Resultatene fra målingene ble deretter brukt til å modellere og validere simuleringsmodellen for ytterligere å undersøke PCM-sparkelens kjøleytelse ved parametrisk analyse. Validering av simuleringsmodellen og PCM-data viste gode overensstemmelse med målingene i klimarommet med CVRMSE-indeks på 1,49% og 2,41%, som er godt under kravet for ASHRAE-retningslinjer 2017 [1] på 15%.

Følgende spørsmål knyttet til problemstillingen besvares i denne konklusjonen.

Hvor mye bidrar PCM-sparkelen til å redusere romtemperaturen i et kontor på en varm sommerdag?

I eksperimentet ble det observert at PCM-sparkelen hadde redusert operativ temperatur kraftig med $1,1-1,4^{\circ}C$ under driftstid, og reduserte den operative temperaturtoppen med $1,1^{\circ}C$. Som et resultat har PCM-sparkelen forbedret den termiske komforten i klimarommet betydelig, og forlenget tiden det tok for at operativ temperatur nådde $26^{\circ}C$ med to timer. Kjølevirkning startet da overflatetemperaturen nådde smeltepunktet til PCM, ved $20^{\circ}C$. Det er derfor viktig å vurdere PCM-sparkelens optimale smeltepunkt, ettersom det er ønskelig å få PCM smeltet tidlig i løpet av driftstiden for å få full utnyttelse av temperaturreduksjonen.

Hvordan varierer kjøleytelsen med tykkelse på PCM-sparkelen?

Tykkelse på PCM-sparkel har stor innvirkning på PCM-sparkelens evne til å redusere romtemperaturen i driftstid. Simuleringene viste større kjøleytelse for tykkere lag med PCM-sparkelen. Med PCM-sparkelen påført på vegg- og himlingoverflatene i rommet med tykkelse på $1mm$, ble den operative temperaturtoppen redusert med $0,5^{\circ}C$, med tykkelse $2mm$ ble den redusert med $1,1^{\circ}C$, tykkelse $3mm$ med $1,9^{\circ}C$ og tykkelse $4mm$ med $2,4^{\circ}C$. PCM-sparkelens kjøleytelse ble kraftig redusert ved mindre PCM-mengder og smøreoverflate. Likevel, med en begrenset smøreoverflate, kan en god avkjølingseffekt på PCM-sparkelen oppnås.

Ved å påføre PCM-sparkelen på himling med en tykkelse på 3-4mm, ble den operative temperaturtoppen redusert med 0,8°C for 3mm og 1°C for 4mm. I tillegg ble det observert at maksimal temperaturreduksjon forekom på forskjellige tidspunkter ved forskjellige tykkelser. Tykkere lag av PCM førte til maksimal temperaturreduksjon på et senere tidspunkt, som betyr at tykkere lag med PCM-sparkel brukte lenger tid på å smelte fullstendig. For å få full utnyttelse av PCM-sparkel bør mengden og tykkelsen påført på vegg-og/eller himlingoverflatene optimaliseres for å smelte fullstendig i driftstiden for full utnyttelse av temperaturreduksjon.

Hvordan varierer kjøleytelsen til PCM-sparkelen ved nattkjøling?

Tilluftstemperatur og luftmengde har stor innvirkning på avkjølingen av PCM-sparkelen, som er nødvendig for å forberede PCM til å absorbere varme dagen etter. Dette betyr at, for å utnytte PCM-sparkelen til sitt fulle potensial, bør nattventilasjon utformes for å gi tilstrekkelig avkjøling av PCM-sparkelen, slik at PCM stivner fullstendig, mens det samtidig tas hensyn til riktig starttemperatur om morgenen.

Hvordan varierer kjøleytelsen til PCM-sparkelen ved størrelse på smøreoverflater?

Med samme mengde PCM-sparkel, vil størrelsen på smøreoverflaten ha liten innvirkning på kjøleytelsen til PCM. Imidlertid vil tykkelsen av påført PCM-sparkel spille en større rolle. Med et tykkere lag sparkel tar det lenger tid før faseendringsmaterialet går i metning, noe som fører til økt kjøleytelse.

Det kan konkluderes med at denne PCM-sparkelen har stort avkjølingspotensial. Bruk av denne PCM-sparkelen i bygninger vil kunne bidra til å forbedre termisk komfort.

Kapittel 7

Videre arbeid

Resultatene presentert i denne oppgaven har i stor grad fokusert på temperaturreduksjonen som kan oppnås med denne PCM-sparkelen samt den parametriske analysen som undersøkte PCM-sparkelens kjøleytelse ved forskjellige parametere. I oppgaven ble en simuleringsmodell basert på produsentens tabellverdier for PCM-materialet sammenlignet med de eksperimentelle resultatene fra klimarommet. Modellen viste god overensstemmelse med de eksperimentelle resultatene.

Validering av simuleringsmodell

Selv om det var god enighet mellom resultatet fra simuleringsmodellen og målt data fra eksperimentet, bestod datagrunnlaget bare av måling med én tykkelse PCM-sparkel. Det bør gjøres flere eksperimenter med forskjellig tykkelse på PCM-sparkelen for å skape et bredere datagrunnlag å validere simuleringsmodellen og PCM-dataene mot.

Numerisk simulering med PCM-data

Simuleringsmodellen var modellert etter klimarommet, uten direkte kontakt med uteklimaet, slik at soltilskudd og varmetap gjennom konstruksjon ikke var realistiske. Ettersom PCM-data som ble brukt i simulering er validert med de eksperimentelle resultatene, kunne det vært interessant å undersøke PCM-sparkelen ved å utvide simuleringsmodellen til å omfatte hele bygningsmassen samt å inkludere flere eksterne faktorer.

Ville det vært interessant å undersøke PCM-sparkelen nærmere ved simulering anvendt i bygningsnivå med realistiske betingelser. Videre studie ved numeriske simuleringer kan omfatte følgende.

- Energibesparelse som kan oppnås med PCM-sparkelen i bolig eller næringsbygg.
- Optimalisering av PCM-sparkelens tykkelse og avkjølingsstrategi.
- Effekt av PCM-sparkelen i vinterhalvåret.

Bibliografi

- [1] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. I: *"2017 ASHRAE® Handbook - Fundamentals (SI Edition): 19.7 Model Calibration"*. American Society of Heating, Refrigerating og Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE). ISBN: 978-1-939200-58-7. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011GGJW1/ashrae-handbook-fundamentals/model-calibration>.
- [2] BP Global. *"Statistical Review of World Energy"*. en. URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (sjekket 12.06.2020).
- [3] Matheos Santamouris og Dimosthénis Asimakopoulos. *"Passive cooling of buildings"*. Earthscan, 1996.
- [4] D. G. Leo Samuel, S. M. Shiva Nagendra og M. P. Maiya. *"Passive alternatives to mechanical air conditioning of building"*. en. Bd. 66. Aug. 2013, s. 54–64. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.04.016. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132313001212> (sjekket 12.06.2020).
- [5] Hussein Akeiber, Payam Nejat, Muhd Zaimi Abd Majid mfl. *"A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes"*. Elsevier, 2016, s. 1470–1497.
- [6] Simen Edsjø Kalnæs og Bjørn Petter Jelle. *"Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities"*. Bd. 94. Elsevier, 2015, s. 150–176.
- [7] Alvaro de Gracia. *"Dynamic building envelope with PCM for cooling purposes—Proof of concept"*. Bd. 235. Elsevier, 2019, s. 1245–1253.
- [8] Ruben Baetens, Bjørn Petter Jelle og Arild Gustavsen. *"Phase change materials for building applications: a state-of-the-art review"*. Bd. 42. 9. Elsevier, 2010, s. 1361–1368.
- [9] Luisa F. Cabeza, I. Martorell, Laia Miró mfl. *"Introduction to thermal energy storage (TES) systems"*. Journal Abbreviation: Adv Therm Energy Storage Syst. Des. 2015, s. 1–28. ISBN: 978-1-78242-088-0. DOI: 10.1533/9781782420965.1.
- [10] Atul Sharma, V Veer Tyagi, CR Chen mfl. *"Review on thermal energy storage with phase change materials and applications"*. Bd. 13. 2. Elsevier, 2009, s. 318–345.
- [11] George Ashel Lane, red. *"Solar heat storage: latent heat materials"*. Boca Banton, Fla: CRC Press, 1983. ISBN: 978-0-8493-6585-0 978-0-8493-6586-7.

- [12] A Abhat. *"Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials"*. Bd. 30. 4. Pergamon, 1983, s. 313–332.
- [13] Alexis Sevault, Hanne Kauko, Mette Bugge mfl. *"Phase change materials for thermal energy storage in low-and high-temperature applications: a state-of-the-art"*. SINTEF Energi AS, 2017.
- [14] Y Özonur, M Mazman, HÖ Paksoy mfl. *"Microencapsulation of coco fatty acid mixture for thermal energy storage with phase change material"*. Bd. 30. 10. Wiley Online Library, 2006, s. 741–749.
- [15] Lei Cao, Fang Tang og Guiyin Fang. *"Synthesis and characterization of micro-encapsulated paraffin with titanium dioxide shell as shape-stabilized thermal energy storage materials in buildings"*. Bd. 72. Elsevier, 2014, s. 31–37.
- [16] Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet og SINTEF. *"ENØK i bygninger effektiv energibruk"*. Norwegian. OCLC: 1028441177. Oslo: Gyldendal undervisning, 2007. ISBN: 978-82-05-37496-6.
- [17] Klaus Daniels. *"Gebäudetechnik: ein Leitfaden für Architekten und Ingenieure"*. ger. 3., überarb. Aufl. OCLC: 845353117. Zürich: Hochschulverlag AG ETH, 2000. ISBN: 978-3-486-26414-2 978-3-7281-2727-3.
- [18] SINTEF Byggforsk. *"421.501 Termisk inneklima. Betingelser, tilrettelegging og målinger - Byggforskserien"*. URL: https://www.byggforsk.no/dokument/193/termisk_inneklima_betingelser_tilrettelegging_og_maalinger (sjekket 29.04.2020).
- [19] H. E Hansen, P Kjerulf-Jensen og Ole B Stampe. *"Varme- og klimateknik: grundbog"*. Danish. OCLC: 895019765. S.l.: Danvak ApS, 1988. ISBN: 978-87-982652-1-4.
- [20] Standard Norge. *"NS-EN ISO 7730: Ergonomi i termisk miljø- Analytisk bestemmelse og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD-indeks og lokal termisk komfort"*. 2006.
- [21] Arbeidstilsynet. *"Klima og luftkvalitet på arbeidsplassen Veiledning 444"*. 2016.
- [22] Standard Norge. *"NS-EN ISO 7726:2001: Ergonomi for termisk miljø - Instrumenter for måling av fysiske størrelser (ISO 7726:1998)"*. 2001.
- [23] Eirik Samuelsen. *"Relativ fuktighet"*. nb. Sep. 2017. URL: http://snl.no/relativ_fuktighet (sjekket 29.04.2020).
- [24] SINTEF Byggforsk. *"421.132 Fukt i bygninger. Teorigrunnlag - Byggforskserien"*. URL: https://www.byggforsk.no/dokument/184/fukt_i_bygninger_teorigrunnlag#i3 (sjekket 24.05.2020).
- [25] Rob J. Hyndman og Anne B. Koehler. *"Another look at measures of forecast accuracy"*. en. Bd. 22. 4. Okt. 2006, s. 679–688. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2006.03.001. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169207006000239> (sjekket 21.05.2020).
- [26] Fresvik.no. *"ISOLASJONSPANEL for kjøle- og fryserom"*. URL: <https://static1.squarespace.com/static/53ba7f0fe4b0b0d4ddf4e7a3/t/5e32cfacf8043d07500ce4c7/1580388268753/Isolasjonspanel.pdf> (sjekket 04.05.2020).

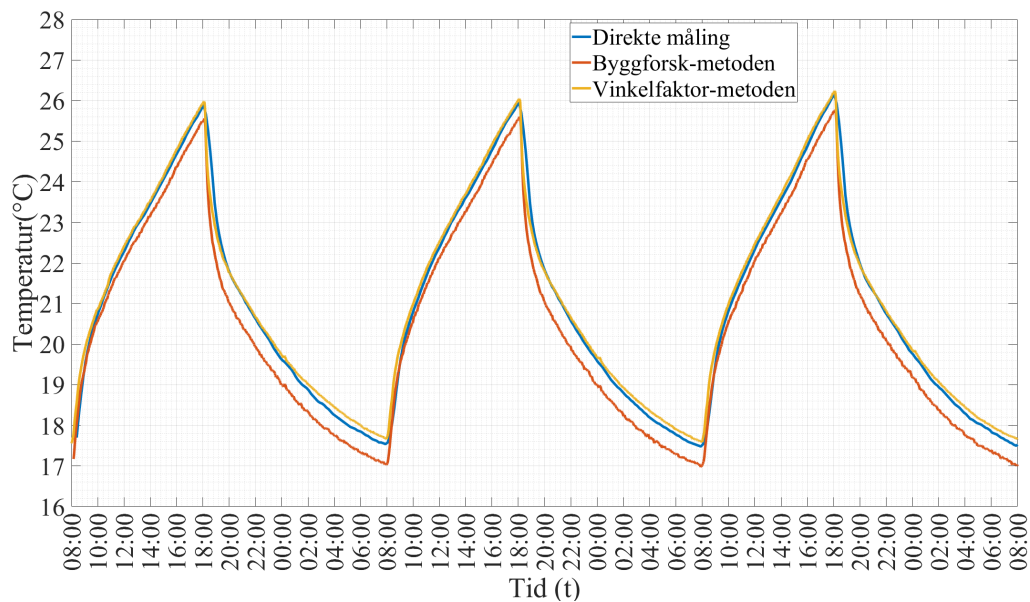
- [27] Byggteknisk forskrift (TEK17). "*Direktoratet for byggkvalitet § 13-3. - Ventilasjon i byggverk for publikum og arbeidsbygning*". URL: <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/13/i/13-3/> (sjekket 04.05.2020).
- [28] Arbeidstilsynet.no. "*Arealkrav til kontorarbeidsplasser*". URL: <https://www.arbeidstilsynet.no/tema/byggesak/veiledning-til-dokumentasjonskrav-ved-soknad-om-arbeidstilsynets-samtykke/arealkrav-til-kontorarbeidsplasser/> (sjekket 04.05.2020).
- [29] Kari Thunshelle, Axel Cable og Mads Mysen. "*Can demand controlled ventilation replace space heating in office buildings with low heating demand?*" 2016.
- [30] Refrigerating and Air-Conditioning Engineers American Society of Heating, red. "*2001 ASHRAE handbook: Fundamentals. SI Edition*". eng. Atlanta, Ga: ASHRAE, 2001. ISBN: 978-1-883413-88-0.
- [31] Thermocoupleinfo.com. "*Type T Thermocouple*". URL: <https://www.thermocoupleinfo.com/type-t-thermocouple.htm> (sjekket 03.05.2020).
- [32] Jakob Sandstad. "*Termoelement*". nb. Mar. 2020. URL: <http://snl.no/termoelement> (sjekket 04.05.2020).
- [33] Intab.se. "*How to use PC-logger 3100i and accessories*". URL: https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/static.wm3.se/sites/217/media/45191_How_to_use_PC-logger_3100i_and_accessories.pdf?1436435125 (sjekket 18.12.2019).
- [34] ISO 7730:2005. en. URL: <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/03/91/39155.html> (sjekket 04.05.2020).
- [35] LumaSense Technologies A/S. "*Product Data- Thermal Comfort Data Logger -INNOVA1221*". URL: http://svg-tech.com/clients/svg-tech/Downloads/1221_Thermal_Comfort_Monitor97201424250PM1.pdf (sjekket 04.05.2020).
- [36] Swema.com. "*Swema 3000 Universal*". URL: <https://www.swema.com/Universal/Swema%203000> (sjekket 04.05.2020).
- [37] Swema.com. "*SWA 31 Air Flow*". URL: <https://www.swema.com/Air%20Flow/SWA%2031> (sjekket 04.05.2020).
- [38] Swema.com. "*SWA 03 draught sensor Air velocity*". URL: <https://www.swema.com/Air%20velocity/SWA%2003%20draught%20sensor> (sjekket 04.05.2020).
- [39] Knut Hofstad. "*ppm*". nb. Aug. 2019. URL: <http://snl.no/ppm> (sjekket 07.06.2020).
- [40] Petter Aslaksrud, Eirik Folkedal og Ottar Øvrevik. "*Faseendringmaterialer for redusert energibehov og forbedret inneklima i passiv og plusshus*". Mai 2016.
- [41] Federico Tartarini, Schiavon Schiavon, Tyler Hoyt mfl. "*Pythermalcomfort.models — pythermalcomfort 0.6.4 documentation*". URL: https://pythermalcomfort.readthedocs.io/en/latest/_modules/pythermalcomfort/models.html#pmv_ppd (sjekket 08.05.2020).
- [42] Federico Tartarini, Schiavon Schiavon, Tyler Hoyt mfl. "*pythermalcomfort.psychrometrics — pythermalcomfort 1.0.2 documentation*". URL: https://pythermalcomfort.readthedocs.io/en/latest/_modules/pythermalcomfort/psychrometrics.html#v_relative (sjekket 08.05.2020).

- [43] Cristina Cornaro, M Pierro, D Roncarati mfl. *"Validation of a PCM simulation tool in IDA ICE dynamic building simulation software using experimental data from Solar Test Boxes"*. 2017.
- [44] Sweden AB Saint-Gobain. *"Gyproc Sverige"*. URL: <https://www.gyproc.se/> (sjekket 31.05.2020).
- [45] Astma- og Allergiforbundet. *"Luftfuktighet"*. no. URL: <https://www.naaf.no/subsites/fersking---foreldre-og-barn/i-hjemmet/inneklima/luftfuktighet/> (sjekket 27.05.2020).

Vedlegg

A Validering av beregnet operativ temperatur

Figuren viser sammenligning av beregnet og målt operativ temperatur for PCM-eksperimentet.



Figur 1: Sammenligning av beregnede og målt operativ temperatur for måling med PCM-sparkel

B Python kode benyttet for beregning av PMV og PPD-indeks

Koden er hentet fra nettside pypi.org/project/pythermalcomfort [41]. Koden har blitt lagt inne en funksjon for å lese input parametere som en .text-fil og skrive ut en ny fil som et resultat av beregningen.

```
import math

from pythermalcomfort import cooling_effect, check_standard_compliance
from pythermalcomfort.psychrometrics import units_converter

def pmv_ppd(tdb, tr, vr, rh, met, clo, wme=0, standard='ISO', units='SI'):
    if units.lower() == 'ip':
        tdb, tr, vr = units_converter(tdb=tdb, tr=tr, v=vr)

    standard = standard.lower()
    if standard not in ['iso', 'ashrae']:
        raise ValueError("PMV calculations can only be performed in compliance with ISO or ASHRAE Standards")

    check_standard_compliance(standard=standard, tdb=tdb, tr=tr, v=vr, rh=rh, met=met, clo=clo)

    # if the relative air velocity is higher than 0.2 then follow methodology ASHRAE
    # Appendix H, H3
    if standard == 'ashrae' and vr >= 0.2:
        # calculate the cooling effect
        ce = cooling_effect(tdb=tdb, tr=tr, vr=vr, rh=rh, met=met, clo=clo, wme=wme)

        tdb = tdb - ce
        tr = tr - ce
        vr = 0.1

    pa = rh * 10 * math.exp(16.6536 - 4030.183 / (tdb + 235))

    icl = 0.155 * clo # thermal insulation of the clothing in M2K/W
```

```
m = met * 58.15 # metabolic rate in W/M2
w = wme * 58.15 # external work in W/M2
mw = m - w # internal heat production in the human body
if icl <= 0.078:
    fcl = 1 + (1.29 * icl)
else:
    fcl = 1.05 + (0.645 * icl)

# heat transf. coeff. by forced convection
hcf = 12.1 * math.sqrt(vr)
taa = tdb + 273
tra = tr + 273
tcla = taa + (35.5 - tdb) / (3.5 * icl + 0.1)

p1 = icl * fcl
p2 = p1 * 3.96
p3 = p1 * 100
p4 = p1 * taa
p5 = (308.7 - 0.028 * mw) + (p2 * math.pow(tra / 100.0, 4))
xn = tcla / 100
xf = tcla / 50
eps = 0.00015

n = 0
while abs(xn - xf) > eps:
    xf = (xf + xn) / 2
    hcn = 2.38 * math.pow(abs(100.0 * xf - taa), 0.25)
    if (hcf > hcn):
        hc = hcf
    else:
```

```
    hc = hcn
    xn = (p5 + p4 * hc - p2 * math.pow(xf, 4)) / (100 + p3 * hc)
    n += 1
    if n > 150:
        raise StopIteration('Max iterations exceeded')

    tcl = 100 * xn - 273

    # heat loss diff. through skin
    hl1 = 3.05 * 0.001 * (5733 - (6.99 * mw) - pa)
    # heat loss by sweating
    if mw > 58.15:
        hl2 = 0.42 * (mw - 58.15)
    else:
        hl2 = 0
    # latent respiration heat loss
    hl3 = 1.7 * 0.00001 * m * (5867 - pa)
    # dry respiration heat loss
    hl4 = 0.0014 * m * (34 - tdb)
    # heat loss by radiation
    hl5 = 3.96 * fcl * (math.pow(xn, 4) - math.pow(tra / 100.0, 4))
    # heat loss by convection
    hl6 = fcl * hc * (tcl - tdb)

    ts = 0.303 * math.exp(-0.036 * m) + 0.028
    pmv = ts * (mw - hl1 - hl2 - hl3 - hl4 - hl5 - hl6)
    ppd = 100.0 - 95.0 * math.exp(-0.03353 * pow(pmv, 4.0) - 0.2179 * pow(pmv, 2.0))

    # return {'pmv': round(pmv, 2), 'ppd': round(ppd, 1)}
    return pmv, ppd
```



```
def do_process(file):
    out = [str()]

    with open(file, 'r') as f:
        content = f.readlines()
        first_line = True
        for l in content:
            if first_line:
                first_line = False
                continue
            # time TA TR VEL Pa Rh Clo MET
            split = l.strip("\n").split("\t")

            if len(split) > 9:
                print(f"WTF: {split}")
            else:
                time, tdb, tr, vr, pa, rh, clo, met, wme = split
                pmv, ppd = (pmv_ppd(tdb=float(tdb), tr=float(tr), vr=float(vr), rh=float(rh),
                met=float(met), clo=float(clo))
                out.append(f"{time}\t{tdb}\t{tr}\t{vr}\t{rh}\t{clo}\t{met}\t{pmv}\t{ppd}\n")

    with open("pmv_ppd_output.tsv", "w") as f:
        f.writelines(out)

if __name__ == "__main__":
    do_process("../Desktop/Uten_PCM.txt")
```