



Institutt for Bygg- og energiteknikk
Postadresse: Postboks 4 St. Olavs plass, 0130 Oslo
Besøksadresse: Pilestredet 35, Oslo

Kandidat NR.

TILGJENGELIGHET:
Åpen

www.OsloMet.no

Masteroppgave

HOVEDPROSJEKTETS TITTEL Bruken av faseendringsmaterialet i kontorbygg under forskjellige klimatiske forhold	DATO: 01.07.2020
	Antall sider 42 / antall vedlegg 13
FORFATTER Mohamed Abdirazak	VEILEDERE Habtamu Madessa og Mehrddad Rabani

UTFØRT I SAMMARBEID MED OsloMet-storbyuniversitet	KONTAKTPERSON n/a Mohamed Abdirazak
---	--

SAMMENDRAG Denne avhandlingen gikk ut på å vurdere bidraget til faseendringsmaterialet så kalt PCM for å få ned temperatur og antall timer over 26 grader celsius samt kjølebehovet i et kontorbygg som tilfredsstillter passivhuskravet, NS3701 i Oslo med bruksareal på 3973 m ² fordelt på tre etasjer. Det er også sett på om samme konsept som i Oslo kan anvendes i andre steder i verden med like forutsetninger. Det er sett på tre forskjellige byer med ulike lokasjoner utenom Oslo, som er Los Angeles, Cape Town og Singapore. Faseendringsmaterialene som er benyttet er Gyproc, Bio-Q25 og SP24E og alle tre hjelper for å få ned operativ temperaturen både før og etter optimalisering. Kjølebehovet fås også ned med disse PCM-ene.
--

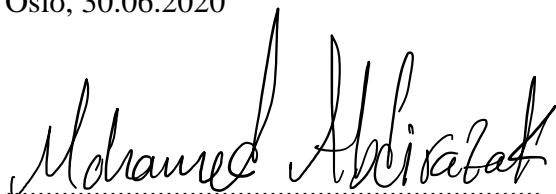
3 STIKKORD
Phase Change Material
Kontorbygg
Optimalisering

Forord

Denne oppgaven markerer slutten på mitt toårige masterstudium i energi og miljø i bygg ved OsloMet-storbyuniversitet, våren 2020. Oppgaven er på 30 studiepoeng. Jeg takker mine veiledere Habtamu Bayera Madessa (Førsteamanuensis) og Mehrdad Rabani (stipendiat) ved Oslomet, for god veiledning. Det har vært en fantastisk god hjelp å alltid ha Habtamu og Mehrdad med på laget selv under COVID-19.

Jeg takker også til Umar (medstudent) som alltid har stilt opp når jeg trengte hjelp. Spesielt takke min kjære mor Khadija Mohammed Noor som alltid har vært motiverende og oppfordret meg til å ta nye utfordringer som denne sivilingeniørutdanningen. En stor takk til min nydelige familie. Det har vært utrolig lærerikt og jeg ønsker å takke alle forelesere som har delt sin kunnskap til oss studenter på OsloMet.

Oslo, 30.06.2020

A handwritten signature in black ink, reading 'Mohamed Abdirazak', written in a cursive style. The signature is positioned above a horizontal dotted line.

Mohamed Abdirazak

Sammendrag

Denne avhandlingen gikk ut på å vurdere bidraget til faseendringmaterialet så kalt PCM for å få ned temperatur og antall timer over 26 grader celsius. Samtidig redusere kjølebehovet i et kontorbygg som tilfredsstillt passivhuskravet, NS3701 i Oslo med bruksareal på 3973 m² fordelt på tre etasjer. Det er også vurdert om samme konseptet som er benyttet i Oslo kan brukes i Cape Town (Sør-Afrika), Los Angeles (USA) og Singapore (Singapore), når forutsetningene er like. Programvarene som er benyttet er IDA-ICE (IDA-Indoor Climate and Energy) som er simuleringsverktøy og GenOpt (Generic Optimization) som er optimaliseringsverktøy.

Det er optimalisert tykkelsene og smeltepunkttemperaturen til PCM. Optimaliseringen er gjort kun i Oslo og for de resterende byene er det simulert. Det er totalt kjørt 24 simuleringer for Cape Town, Los Angeles og Singapore. I Oslo var det 38 simuleringer og optimaliseringer som varte fra to til fire dager når det ble lagt PCM i (yttervegg, innervegg og himling). Simuleringsperioden i Oslo varte fra 01.mai til 30.september, 2020. Etter endt optimalisering viser det seg at temperaturen blir ytterligere redusert med høyere tykkelse og neglisjerbar endring til smeltepunkttemperatur.

For Cape Town, Los Angeles og Singapore er det gjort simuleringer i ett år. PCM-ene som er benyttet er Gyproc, Bio-Q25 og SP24E. Etter alle simuleringer og optimaliseringer ble det sammenlignet resultater for de overnevnte byene. Resultatene viste at alle tre PCM fungerte hele året i Cape Town og Los Angeles, mens i Singapore reduseres temperaturen med Bio-Q25 i noen grad bedre enn SP24E sammenlignet med referansebygget. Resultatet fra simuleringene i alle byer og optimaliseringene for Oslo viser at faseendringmaterialet reduserer både kjølebehovet og temperaturen under forskjellige klimatiske lokasjoner.

Abstract

This dissertation was to evaluate the contribution to the phase change material, so-called PCM, to reduce the temperature and the number of hours above 26 degrees Celsius. At the same time reduce the cooling requirement in an office building that meets the passive house requirement, NS3701 in Oslo with a use area of 3973 m² spread over three floors. It has also been considered whether the same concept used in Oslo can be used in Cape Town (South Africa), Los Angeles (USA) and Singapore (Singapore), when the conditions are the same. The software used is IDA-ICE (IDA-Indoor Climate and Energy) which is a simulation tool and GenOpt (Generic Optimization) which is an optimization tool.

The thicknesses and melting point temperature of the PCM have been optimized. The optimization is only done in Oslo and for the remaining cities it is simulated. A total of 24 simulations have been run for Cape Town, Los Angeles and Singapore. In Oslo, 38 simulations and optimizations lasted from two to four days when PCM was installed (exterior wall, interior wall and ceiling). The simulation period in Oslo lasted from 01 May to 30 September 2020. After the optimization is completed, it turns out that the temperature is further reduced with higher thickness and negligible change to melting point temperature.

For Cape Town, Los Angeles and Singapore, simulations have been done for one year. The PCMs used are Gyproc, Bio-Q25 and SP24E. After all simulations and optimizations, results were compared for the above cities. The results showed that all three PCMs worked throughout the year in Cape Town and Los Angeles, while in Singapore the temperature with Bio-Q25 is reduced somewhat better than the SP24E compared to the reference building. The results from the simulations in all cities and the optimizations for Oslo show that the phase change material reduces both the cooling demand and the temperature under different climatic locations.

Innholdsfortegnelse

<i>Forord</i>	<i>i</i>
<i>Sammendrag</i>	<i>ii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iii</i>
<i>Innholdsfortegnelse</i>	<i>iv</i>
<i>Figurligste</i>	<i>vi</i>
<i>Tabbeliste</i>	<i>vi</i>
<i>Formelliste</i>	<i>vii</i>
<i>Nomenklatur</i>	<i>vii</i>
1.0 Introduksjon	1
1.1 Problemstilling.....	1
1.2 Avgrensning.....	2
1.3 Etisk vurdering	2
2.0 Teori	4
2.1 Om passivhus.....	4
2.2 Inneklima termisk miljø.....	4
2.2.1 Termisk komfort	4
2.2.2 Operativ temperatur	4
2.2.3 Middelstrålingstemperatur	5
2.2.4 Lufthastighet	5
2.2.5 Relativ fuktighet.....	5
2.3 Varmetransport	5
2.3.1 Konduksjon	6
2.3.2 Konveksjon	6
2.3.3 Stråling	6
2.4 Termisk Varmelagringsteknologier	7
2.4.1 Latent	7
2.4.2 Følbar	7
2.4.3 Kjemisk	7
2.5 Faseendringmaterial	8
2.6 IDA-ICE	8
2.7 GenOpt	8
2.7.1 Virkemåten til GenOpt.....	8
3.0 Metode	10
3.1 Referanse kontorbygg.....	10
3.2 Klima	11
3.3 Krav	12
3.3.1 Oppvarming	13
3.3.2 Kjøling.....	13
3.4 Grafisk skript	13

3.5 Simulering	14
3.6 Phase Change Material	15
3.6.1 Plassering.....	16
3.7 Optimalisering	17
3.8 Vindusåpning	18
3.9 Luftmengde.....	19
3.9.1 Tilluftstemperatur.....	19
3.10 Excel.....	20
4.0 Resultat & diskusjon	21
4.1 Referansebygget i Oslo.....	21
4.2 Referansebygget med PCM i Oslo	21
4.2.1 Gyproc.....	22
4.2.1.1 Vegg & overalt	23
4.2.1.2 Himling.....	24
4.2.2 Bio-Q25.....	25
4.2.2.1 Vegg & overalt	25
4.2.2.2 Himling.....	27
4.2.3 SP24E.....	27
4.2.3.1 Vegg & overalt	28
4.2.3.2 Himling.....	29
4.3 C _p vs T	30
4.4 Globalt	31
4.4.1 Sammenligning av PCM-ene	32
4.4.2 Maksimum temperaturdifferanse	34
4.4.3 Kjølebehov	37
5.0 Konklusjon	39
6.0 Videre arbeid	40
7.0 Referanseliste	41
Vedlegg	i
A U-verdier.....	i
B Referansebygget	ii
C Phase Change Material	iii
C.1 Bio Q25	iii
C.2 SP24E	iv
C.3 Gyproc.....	v
D GenOpt algoritme	vi
E Klimafil i IDA-ICE.....	vii
E.1 Oslo.....	vii
E.2 Cape Town.....	viii
E.3 Singapore	ix
E.4 Los Angeles	x
F Simuleringsresultater	xi
F.1 Gyproc	xi
F.2 Bio-Q25	xii

Figurligste

Figur 1-Klassifisering av PCM [15]	8
Figur 2-Virkemåten mellom GenOpt og simuleringsprogrammer [18].....	9
Figur 3-Plantegning for kontorbygget 1-3 etasje	11
Figur 4-3D av referansebygget i IDA-ICE	11
Figur 5-Oppbygning av yttervegg i IDA-ICE.....	12
Figur 6-Grafisk skriptet til referansebygget.....	14
Figur 7-Vertikalsnitt av kontorbygget	16
Figur 8-Input verdier parametric run på IDA-ICE.....	18
Figur 9-Output verdier parametric run på IDA-ICE	18
Figur 10-Vinduskontroller laget i IDA-ICE	19
Figur 11-Luftmengde strategien til kontorbygget.....	19
Figur 12-Tillufttemperaturen som er brukt i kontorbygget med og utenfor driftstid	20
Figur 13-Temperaturendring i cell-27 Gyproc (vegg og overalt).....	23
Figur 14-Soner som overskrider timer over 26 °C med Gyproc (vegg og overalt).....	24
Figur 15-Temperaturendring i cell-27 Gyproc (himling)	24
Figur 16-Soner som overskrider timer over 26 °C med Gyproc (himling)	25
Figur 17-Temperaturendring i cell-27 Bio-Q25 (vegg og overalt).....	26
Figur 18-Soner som overskrider timer over 26°C med Bio-Q25 (vegg og overalt)	26
Figur 19-Temperaturendring i cell-27 Bio-Q25 (himling)	27
Figur 20-Soner som overskrider timer over 26 °C med Bio-Q25 (himling)	27
Figur 21-Temperaturendring i cell-27 SP24E (vegg og overalt)	28
Figur 22-Soner som overskrider timer over 26 °C med SP24E (vegg og overalt)	29
Figur 23-Temperaturendring i cell-27 SP24E (himling)	29
Figur 24-Soner som overskrider timer over 26 °C med SP24E (himling).....	30
Figur 25-Gyproc temperatur i x-akse Cp i y-akse	30
Figur 26-Bio-Q25 temperatur i x-akse Cp i y-akse	31
Figur 27-SP24E temperatur i x-akse Cp i y-akse.....	31
Figur 28-Sammenligning mellom forskjellige PCM i Oslo.....	33
Figur 29-Sammenligning mellom forskjellige PCM i Los Angeles	33
Figur 30-Sammenligning mellom forskjellige PCM i Cape Town.....	33
Figur 31-Sammenligning mellom forskjellige PCM i Singapore	34
Figur 32-Temperaturforskjellen med Gyproc i Oslo (a), Los Angeles (b), Cape Town (c) og Singapore (d).....	35
Figur 33-Temperaturforskjellen med Bio-Q25 i Oslo (a), Los Angeles (b), Cape Town (c) og Singapore (d).....	36
Figur 34-Temperaturforskjellen med SP24E i Oslo (a), Los Angeles (b), Cape Town (c) og Singapore (d).....	37
Figur 35-Reduksjon av kjølebehov i prosent med Gyproc, Bio-Q25 og SP24E i forskjellige byer	38

Tabbeliste

Tabell 1-Etisk diskusjon som er inspirert fra forskningsetisk komite [8,9].....	2
Tabell 2-Areal- og soneinndeling	11
Tabell 3-Innsatte verdier i IDA-ICE [19,20,21]	12
Tabell 4-Timer med tilhørende måneder	15

Tabell 5-Egenskapene til faseendringsmaterialene [24,25,26]	16
Tabell 6-Referansebygg oppfyller kravet	21
Tabell 7-Tykkelsene til faseendringsmaterialene	21
Tabell 8-Kravet er oppfylt med PCM og etter optimalisering	22
Tabell 9-Gjennomsnittlig temperaturforskjell med Gyproc og etter optimalisering	23
Tabell 10-Gjennomsnittlig temperaturforskjeller med Bio-Q25 og etter optimalisering	25
Tabell 11-Gjennomsnittlig temperaturforskjell med SP24E og etter (optimalisering).....	28
Tabell 12-Maks temperaturforskjell i forskjellige byer og PCM.....	35
Tabell 13-Reduksjon i kjølebehov i forskjellige byer og PCM-er.....	38

Formelliste

Formel 1-Operative temperaturen [11]	4
Formel 2-Middelstrålingstemperatur [11].....	5
Formel 3-Konduksjon [12]	6
Formel 4-Konveksjon [12].....	6
Formel 5-Stråling [12]	6
Formel 6-Latent varmekapasiteten med et medium PCM [14]	7
Formel 7-Følbar varmekapasiteten [14].....	7
Formel 8-Høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til oppvarming iht NS3701 [21] ...	13
Formel 9-Høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til kjøling iht NS3701 [21]	13
Formel 10-Arealvektet gjennomsnittlig timer som overskrider 26 °C.....	14

Nomenklatur

Symbol	Beskrivelse	Benevning
t_{op}	Operativ temperatur	°C
t_L	Lufttemperatur	°C
t_{fm}	Gjennomsnittlig strålingstemperatur	°C
t_g	Globetemperatur	°C
v	Lufthastighet	m/s
$\dot{Q}_{Konduksjon}$	Konduksjon	W
K	Termisk konduktivitet	W/mK
A	Materials overflateareal	m ²
$\frac{dT}{dx}$	Temperaturgradient i x-retning	K/m
$\dot{Q}_{Konveksjon}$	Konveksjon	W
h	Varmeovergangstallet	W/m ² K
A_s	Overflateareal	m ²
T_s	Overflate temperatur konveksjon	°C
T_s	Overflate temperatur stråling	K
T_f	Temperaturen til fluidet	°C

$\dot{Q}_{Stråling}$	Stråling	W
ε	Materialenes emissivitet på det minst flaten	[-]
σ	Stefan-Boltzmann konstant	W/m ² K ⁴
T_O	Omliggende temperatur	K
PCM	Phase Change Material	[-]
m	Masse	Kg
C_p	Spesifikt varmekapasitet ved konstant trykk	kJ/kgK
a_m	Fraksjon av smeltet masse	[-]
Δh_m	Varme fra smelting	kJ
T_m	Smeltetemperatur	K
T_i	Initial temperatur	K
C_{sp}	Gjennomsnittlig spesifikt varmekapasitet (initial og smeltetemperatur)	K
C_{ip}	Gjennomsnittlig spesifikt varmekapasitet (smelte og slutt-temperatur)	K
C_{ap}	Gjennomsnittlig spesifikt varmekapasitet (initial og slutt-temperatur)	kJ/kgK
$E_{Oppvarming}$	Høyest beregnede varmebehov til et bygg for passivhus-yrkesbygg	kWh/m ² år
$EP_{H,0}$	Netto spesifikt oppvarmingsbehov	kWh/m ² år
k_1	Klimakoeffisienter	kWh/(m ² år*°C)
θ_{ym}	Årsmiddeltemperatur	°C
$E_{Kjøling}$	Høyest beregnede kjølebehov til et bygg for passivhus-yrkesbygg	kWh/m ² år
β	Kjølebehovskoeffisient	kWh/(m ² år*°C)
DUT_s	Dimensjonerende utetemperatur ved sommerforhold	°C
\bar{t}	Gjennomsnittlig antall timer som overskrider over 26 °C	timer
A_n	Arealene i hver n-te-sone	m ²
t_n	Timene som overskrider 26 °C i hver n-te-sone	timer
n	Antall sone i bygget (totalt 29 soner)	[-]
Iht	I henhold til	[-]
Pga	På grunn av	[-]
CAV	Contant Air Ventilation	[-]

1.0 Introduksjon

Dagens byggkonstruksjoner forbruker for mye energi når det gjelder å varme huset om vinteren og kjøle ned om sommeren. For passivhusbygninger ligger utfordringene i at det blir høye temperatur i sommerperioden og dette fører til dårlig termisk komfort i bygget [1, 2]. Fokuset på fremtidige bygninger er at de skal være mere energieffektive bygninger. Fordelen med faseendringsmaterialet (PCM) er at det bidrar til å forbedre termisk komfort samt redusere energibehovet til konstruksjonen bare ved å bruke PCM når man utnytter omgivelsestemperaturen [3]. En annen fordel med PCM er at man lagrer den termiske energien om det er varme eller kulde, og bruker det når det trengs. Faseendringsmaterialet har mindre varmetap fordi det produseres termisk lagringsenhet som er kompakt innenfor et mindre temperaturområde [3]. Økning av termisk lagringskapasiteten til et bygg kan forbedre oppfattet menneskelig komfort ved å begrense frekvensen av svingningene til innendørs lufttemperaturen, slik at innelufttemperaturen ligger nærmere den ønskede temperaturen over lengre periode [4]. SINTEF er en av de største uavhengige forskningsinstitutter i Europa og har stor tro på faseendringsmaterialet kan være en av de mest effektive teknologiene når det gjelder lagring av termisk energi i fremtiden [3, 5].

Studie som er gjort i distriktet Lambohov i Linköping (Sverige) i et virkelig passivhusbygg viser at det gir forbedret inneklimate og reduserer overflødige temperatur om sommeren med PCM. De varmeste ti dagene viser at innendørs temperaturen blir redusert i sommerperioden fra 0,5 til 2 °C. Simuleringene som ble gjort i studie er estimert å redusere fra 22 til 36 % oppvarmet timer. Simuleringsverktøyet som ble benyttet i studie er IDA-ICE [6]. Et annet studie som er i gjort i Portland og Oregon i USA for passivhusbygg indikerer tilsvarende resultat som i Sverige [7].

1.1 Problemstilling

I denne oppgaven skal det undersøkes bruken av PCM som materiale i et kontorbygg som tilfredsstiller passivhuskravet i Oslo. Mer presist vil jeg analysere hvordan PCM-materialet kan stabilisere de høye temperaturene som oppstår om sommeren i passivhus og samt redusere kjølebehovet i kontorbygg med ulike klimatiske forhold. For å undersøke dette skal følgende spørsmål svares i denne masteroppgaven:

- Reduserer PCM temperaturen i løpet av sommeren?
- Kan PCM redusere antall timer som overskrider 26 grader celsius i mer enn 50 timer?

- Kan PCM redusere kjølebehovet?
- Hvilken del av bygningskonstruksjoner er det egnet å legge PCM i?
- Om samme konseptet kan benyttes i forskjellige land med forskjellige klimatiske forhold?

1.2 Avgrensning

I denne masteroppgaven skal det undersøkes kontorbygg som tilfredsstillter passivhuskravet NS3701 i Oslo klima og tre forskjellige PCM. Det skal vektlegges kjølebehovet og operativ temperatur som overskrider 26 grader celsius i mer enn 50 timer om sommeren. Følgende avgrensninger er gjort for å kunne løse denne oppgaven.

- Kontorbygget som er brukt finnes ikke i virkeligheten, men er virkelighetsbasert i simuleringsprogrammet, IDA-ICE.
- Det er valgt å avgrense masteroppgaven ved å velge tre forskjellige typer PCM.
- Det antas at den spesifikke varmekapasiteten for PCM smelting og størkning er den samme.

1.3 Etisk vurdering

Det er viktig å vurdere etiske spørsmål før man anvender enhver teknologisk løsning. Etisk matrisen er utviklet på 90-tallet av Ben Mepham og danner diskusjon av etikk iht hensyn og konsekvenser ved en problemstilling [8]. Det er gjort egne refleksjoner i forhold til denne masteroppgaven om rettferdighet, verdighet og velferd sammen med de berørte partene. Se tabellen under.

Tabell 1-Etisk diskusjon som er inspirert fra forskningsetisk komite [8,9]

	Rettferdighet	Verdighet	Velferd
Faseendringsmaterial (PCM)	Samme alternativ for ulike bygningstyper for ulike typer PCM.	Mulighet for å redusere energibruk og øke termisk komfort.	Usikkerhet pga ny teknologi, men gir gevinst på lengere sikt iht energibruk.
Passivhus med PCM	Likt tilgang til alle som har ambisjoner om det.	Bli verdsett, effektiv energibruk og redusert kostnader i sikt.	Begrensning iht krav og material.
Samfunn	Utfordringer med kostnad.	Rom for valg av material som er bra for samfunnet.	Besparelse iht energi og kostnad som er bærekraftig.

Forbrukere	Finnes forskjellige typer faseendingsmaterial til ulike formål.	Forbrukere velger fritt type PCM.	Usikkerhet om fremtidige utfall, men mye for pengene på sikt.
Neste generasjon	Fremtidige generasjoner kan muligens få nytte av PCM.	Det å gjøre noe for fremtidige generasjoner.	Unngå helst løsninger som er skadelig for helse, eller miljøet og velge egnet løsning som er bra for bærekraftig utvikling.
Biosfæren	Usikkerhet om fremtidige utfall, men mulig minimal belastning for miljøet.	Begrenset inngrep til naturen.	Usikkerhet om fremtidige utfordringer.

2.0 Teori

2.1 Om passivhus

Passivhus er en bygning som er godt isolert som har lavt energibehov. I Norge er det to krav som gjelder i henhold til boligbygg (NS 3700) og yrkesbygg (NS 3701). Passivhus konseptet er fra Tyskland i 1990. Dette konseptet gikk ut på at bygget isoleres godt slik at oppvarmingsbehovet til bygget tas av ettervarming av tilluften i et balansert ventilasjonsanlegg [10].

2.2 Inneklima termisk miljø

Det er viktig å forstå det termisk inneklima for denne oppgaven siden PCM brukes for å forbedre den termisk komfort. For denne oppgaven er det forklart de viktigste faktorene som er med på å påvirke termisk inneklima. Disse fysiske faktorene omfatter termisk inneklima [11]:

- Lufttemperatur (viktigste årsaken til innetemperatur)
- Strålingstemperatur (veksling av stråling med nærliggende flater)
- Lufthastighet i (oppholdssonen der menneskene befinner seg mesteparten)
- Relativ fuktighet (dette er uttrykk for fuktiginnhold i forhold til mettet luft med den samme temperatur)

2.2.1 Termisk komfort

Termisk komfort er personlig eller sinnstilstand der vi ikke ønsker at det skal verken bli kaldere eller varmere for kroppen eller kroppsdelenene (nakke, føtter eller lignende) som helhet. Termisk komfort er underordnet med termisk inneklima, bekledning og aktivitetsnivået [11].

2.2.2 Operativ temperatur

Operativ temperatur tar hensyn til strålingstemperatur og lufttemperatur. Dette er avhengig av aktivitetsnivå og bekledning til en person. Formel 1 er forenklet formel når man beregner den operative temperaturen som gjelder når lufthastigheten er mindre enn 0,2 m/s eller når temperaturforskjellen mellom strålingstemperatur og lufttemperaturen er mindre enn 4 °C [11].

Formel 1-Operative temperaturen [11]

$$t_{op} = \frac{t_L + t_{fm}}{2}$$

2.2.3 Middelstrålingstemperatur

Middelstrålingstemperatur er den gjennomsnittlige strålingstemperaturen. En del av varmetapet fra kroppen i en bygning skjer strålingsutveksling mellom kroppen og nærliggende flater. Om vinteren hvis en person sitter for nært ved vinduet så vil personen tapet varme på grunn av strålingsutveksling mellom vinduet og kroppen. Det brukes formel for å beregne middelstrålingstemperatur som gjennomsnittsverdi av alle overflatetemperaturer i et rom. Det finnes andre formler for middelstrålingstemperatur som har andre forutsetninger, men formelen under er enklere å bruke ved å måle temperaturen med globetermometer [11].

Formel 2-Middelstrålingstemperatur [11]

$$t_{fm} = t_g + 2,2 \cdot (t_g - t_L) \cdot \sqrt{v}$$

2.2.4 Lufthastighet

Lufthastigheten påvirker den termisk komfort hvis hastigheten er høy. Høy lufthastighet forårsaker nedkjøling deler av kroppen som fører til trekk. De følsomme områdene av kroppsdelen er naken hud som vil si (ansikt, nakke og føtter). Årsaken til trekk er bevegelse av lufta som er forårsaket av ventilasjonsanlegget der deler av flater (vegg, vindu osv.), blir nedkjølt som fører til kaldras eller luftlekkasje til bygningskroppen [11].

2.2.5 Relativ fuktighet

Når temperaturen er den samme er relativ fuktigheten forholdet mellom metningstrykk og partialtrykk. For komfortfølelsen har relativ fuktighet liten påvirkning i et område mellom 20 til 60 %. Det er anbefalt at relativ fuktigheten ikke er over 40 % om vinteren på de tre kaldeste dagene, mens om sommeren anbefales det under 70 %. Hvis relativ fuktighet er for lavt kan dette gi økt virusinfeksjon, tørre øyne [11].

2.3 Varmetransport

Definisjon av varmetransport er etter boka (Heat and Mass Transfer). Varme er en form for energi som blir transportert fra et system til et annet system med temperaturforskjell. Den transporterte energien i form av varme er alltid fra et område med høy temperatur til område med lavt temperatur. Varmen transporteres i tre forskjellige former og det er konveksjon, konduksjon og stråling [12]. For å kunne si noe om egenskapene til PCM er det viktig å forstå fysikken bak varmetransport.

2.3.1 Konduksjon

Konduksjon er den meste effektive varmetransporten som er overføring av energi fra partikler med mere energi til partikler med mindre energi som fører til interaksjoner mellom partiklene. Konduksjon skjer i faste stoffer, væsker og ikke minst gasser. Konduksjon ved væsker og gasser er forsaket av kollisjoner og diffusjon av molekylene med deres tilfeldige bevegelser. Ved faste stoffer er konduksjon en blanding av vibrasjoner av molekylene i gitter og energien som er transportert av frie elektroner [12].

Formel 3-Konduksjon [12]

$$\dot{Q}_{\text{Konduksjon}} = -KA \cdot \frac{dT}{dx}$$

2.3.2 Konveksjon

Konveksjon skjer mellom en fast overflate og væske eller gass som er i bevegelser. Dette vil være en kombinasjon mellom konduksjon og væske i bevegelser. Dersom hastigheten til væsken øker, desto høyere konveksjon varmetransport medfører dette (se formelen under) [12].

Formel 4-Konveksjon [12]

$$\dot{Q}_{\text{Konveksjon}} = hA_s \cdot (T_s - T_f)$$

2.3.3 Stråling

Varmetransport ved stråling er elektromagnetiske bølger. Faktorene som påvirker strålingen er hvordan et legeme reflekterer, transmitterer og absorberer varmetransport. Reflektert (ρ) stråling er den delen av strålingen som blir reflektert direkte. Transmisjon (τ) er den delen av strålingen som transmitteres gjennom et material. For å kunne beregne varmetransport ved stråling kan formelen under benyttes. Formelen er tatt i utgangspunktet fra en liten flate mot en flate som er uendelig stor [12].

Formel 5-Stråling [12]

$$\dot{Q}_{\text{Stråling}} = \epsilon\sigma A_s (T_s^4 - T_0^4)$$

2.4 Termisk Varmelagringsteknologier

Det finnes mange forskjellige teknologier til lagring av den termiske energien. Blant annet tre lagringsteknologier som er latent, kjemisk og følbar lagring. Disse lagringsteknologiene er ulike når det gjelder lagringstiden. Det vil si korttidslagring (timer, dager) eller sesonglagring (månedsvise) [13].

2.4.1 Latent

Latent varmelagring (latent heat storage) er basert på når varmen absorberes eller avgir når materiale skifter sin egen fase (solid til væske eller væske til gass eller omvendt). Faseendringsmaterialet absorberer eller avgir tilnærmet konstant temperatur og lagrer 5 til 14 ganger mere varme per volumenhet enn følbar varmelagring som vann, stein eller murverk se formelene under [14].

Formel 6-Latent varmekapasiteten med et medium PCM [14]

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mC_p dT + ma_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} mC_p dT = m[C_{sp}(T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + C_{lp}(T_f - T_m)]$$

2.4.2 Følbar

Følbar varmelagring (sensible heat storage) er lagring av energi ved temperaturøkning av solid eller væske materialer. Følbar varmelagring utnytter varmekapasiteten og temperaturendring på materialet ved ladning og utladning. Andel lagrede varme avhenger av den spesifikke varmen til mediet, temperaturendringen og andel lagringsmateriale. Vann er den mest effektive følbar varmelagringen som er tilgjengelig. Dette er på grunn av at vann er billig og har veldig høy spesifikk varmekapasitet. Formel 7 tar for seg beregning av den totale varmelagringskapasiteten til følbar [14].

Formel 7-Følbar varmekapasiteten [14]

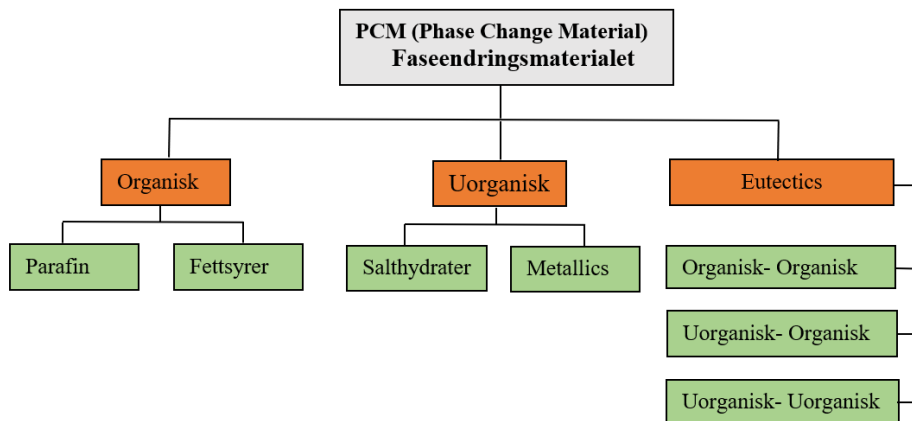
$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mC_p dT = mC_{ap}(T_f - T_i)$$

2.4.3 Kjemisk

For dette underkapittelet skal det snakkes om termokjemisk varmelagring. Denne type varmelagring avhenger absorbert energi og den frigjorte energien ved å bryte eller reformere de molekylære bindinger i fullstendig reversibel kjemisk reaksjon [14].

2.5 Faseendringsmaterial

PCM står for faseendringsmaterialet dersom man oversetter direkte fra engelsk. PCM er et stoff som skifter sin fase fra solid, væske eller gass. PCM brukes til mange forskjellige formål. Det brukes forskjellige type stoffer som salt, alkohol, voks, vodka, vann også videre [3]. PCM faller inn i tre grupper som er fast-fast, fast-væske og væske-gass. Fast-væske PCM er det som er egnet for termisk varmelagring [15].



Figur 1-Klassifisering av PCM [15]

2.6 IDA-ICE

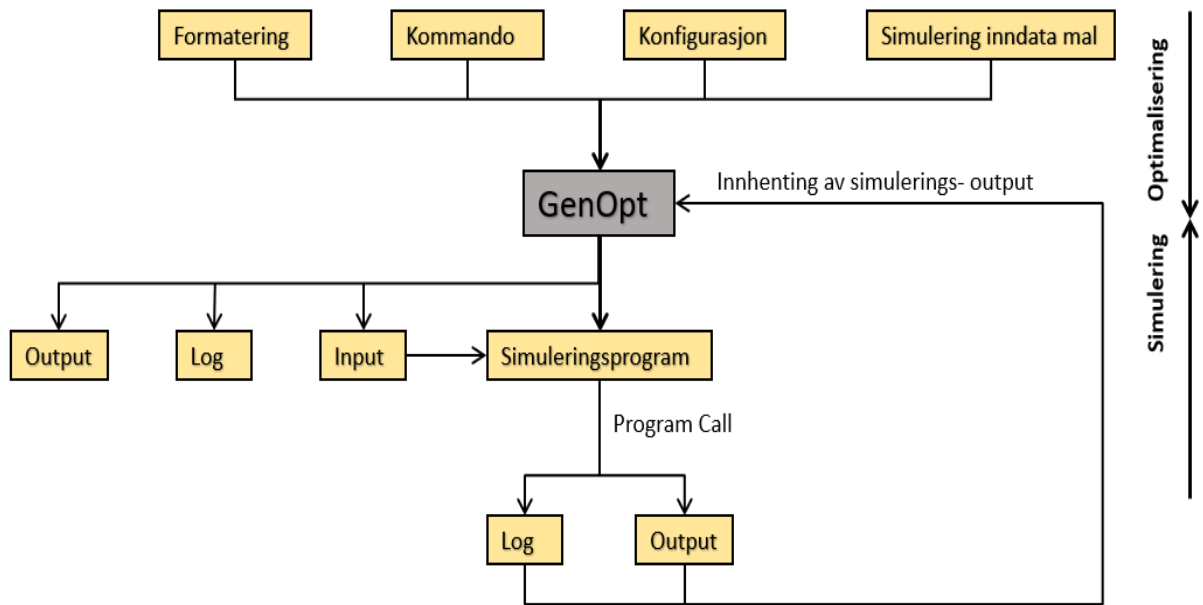
IDA-Indoor Climate and Energy er avansert simuleringsverktøy som brukes til bygninger for å se energibruken, inneklimate, dagslysberegning, grunnvarmesystemer og numerisk fluiddynamikk. [16].

2.7 GenOpt

Optimalisering vil si å gjøre et system så god som mulig til det får et optimum resultat under gitte betingelser. Det optimaliseres vanligvis ved at en lager matematisk modell av et system og undersøker med datamaskin ved å variere forskjellige parametere for å se hvordan systemet fungerer [17]. GenOpt (Generic Optimization) er optimaliseringsprogram som maksimerer/minimerer en funksjon [18]. GenOpt algoritmen som er brukt vises i vedlegg D.

2.7.1 Virkemåten til GenOpt

Figur 2 viser flytskjema på hvordan GenOpt samarbeider for simuleringsprogrammer generelt. Flytskjema er en inspirasjon og det er oversatt til norsk [18].



Figur 2-Virkemåten mellom GenOpt og simuleringsprogrammer [18]

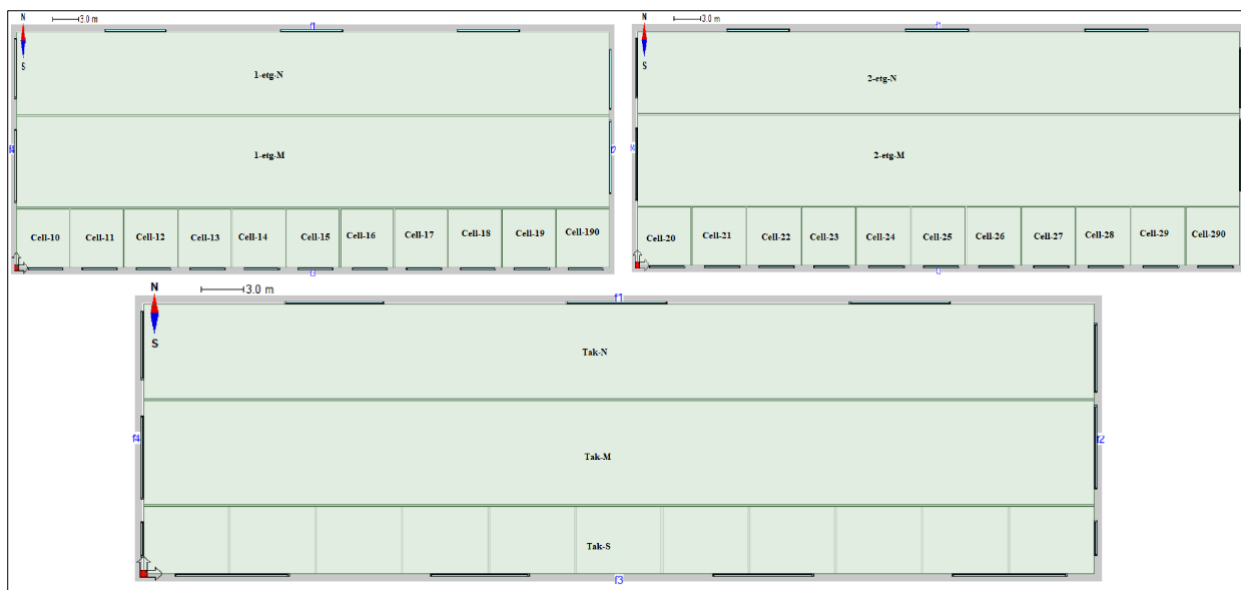
3.0 Metode

I dette kapittelet beskrives det hvordan oppgaven blir gjennomført steg for steg. Programvaren som er benyttet for å løse masteroppgaven er IDA-Indoor Climate and Energy. IDA-ICE brukes som simuleringsverktøy sammen med GenOpt (Generic Optimization) som er optimaliseringsverktøy. For å løse oppgaven er det tatt følgende steg:

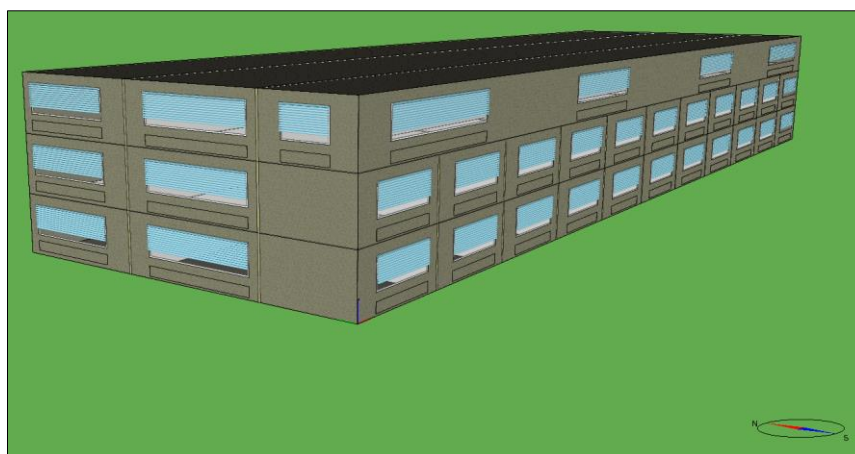
- **Steg 1 (referansebygget)**
 - Modulere bygget i IDA-ICE å sette inn alle nødvendige parametere slik at kontorbygget tilfredsstillter passivhuskravet i henhold til NS3701.
- **Steg 2 (referansebygget med PCM)**
 - Legge inn PCM i yttervegg, innervegg og himling for å få ned temperaturen og antall timer som overskrider 26 °C om sommeren i Oslo.
- **Steg 3 (referansebygget med PCM etter optimalisering)**
 - Optimaliserer tykkelse, smelte-/størkningspunkttemperaturen for faseendringsmaterialene i Oslo.
- **Steg 4 (C_p vs T)**
 - Det skal vises temperatur og den spesifikke varmekapasiteten for de forskjellige PCM-ene etter optimalisering.
- **Steg 5 (samme konsept i andre klima lokasjon)**
 - Det er foretatt samme konseptet som i Oslo globalt for å se om både temperatur og kjølebehov blir redusert. Det skal kun simuleres i dette steget og det skal sammenlignes faseendringsmaterialene i byene Oslo, Los Angeles, Cape Town og Singapore. Det blir plassert lokal kjøling i hver sone for å se om faseendringsmaterialet får ned kjølebehovet i de overnevnte byene.

3.1 Referanse kontorbygg

Det er et kontorbygg som befinner seg i Oslo. Bygget har tre etasjer med til sammen 29 soner og bruksarealet er 3973 m². Bygget skal tilfredsstillte passivhuskravet, NS3701. Per dags dato eksisterer ikke bygget i Oslo fysisk, men det er simulert og modulert i IDA-ICE med Oslo klima. Cellekontorene befinner seg på sørfasaden og er 30 m² både i første og andre etasje. Figuren under viser plantegningen av kontorbygget. Sonene er nummerert/navngitt etter hvilken etasje de befinner seg i. Se figur 3 og 4.



Figur 3-Plantegning for kontorbygget 1-3 etasje



Figur 4-3D av referansebygget i IDA-ICE

Tabell 2-Areal- og soneinndeling

Type kontor	Antall soner	Fasade	Gulvareal [m ²] per sone	Vindusareal [m ²] per sone
Celle	22	sør	30	6
Landskap (midtre)	3	-	519	18
Landskap	3	nord	474	47
Landskap	1	sør	336	53

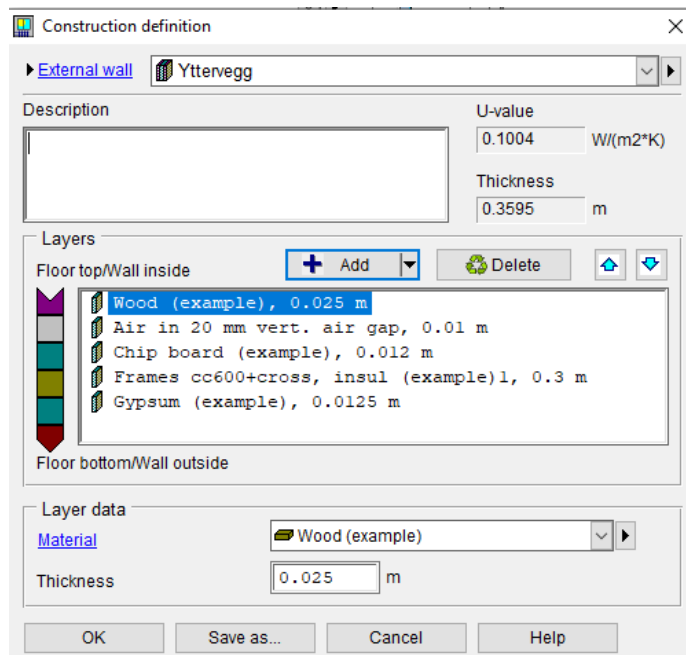
3.2 Klima

Klima stedet som er tatt hensyn til i IDA-ICE er eksisterende innebygd klimafil Oslo/Gardermoen . Det er også tiltenkt å endre klima stedet etterhvert. Byene er Cape Town (Sør Afrika), Singapore (Singapore) og Los Angeles (USA). Dette er gjort for å se om faseendringsmaterialer kan brukes globalt. For mer utfyllende informasjon se vedlegg E.1-E.4.

klimafil utklipp fra IDA-ICE for alle byene. Sommerperiodene for Oslo, Los Angeles og Singapore er like, derimot for Cape Town er sommerperioden fra desember til februar.

3.3 Krav

Ifølge NS 3701 stilles det krav til høyest beregnede netto spesifikt energibehov til oppvarming og kjøling. Nedenfor er det utklipp fra IDA-ICE som viser oppbygningen og U-verdien til ytterveggen som tilfredsstiller passivhuskravet. Resterende oppbygning av konstruksjoner (som gulv på grunn, tak og vindu) vises i vedlegg A.



Figur 5-Oppbygning av yttervegg i IDA-ICE

Tabell 3-Innsatte verdier i IDA-ICE [19,20,21]

Parameter	Verdi	Henvisning	
U-verdi yttervegg	0,10 W/m ² K	NS3701 :2012 tabell 9	
U-verdi gulv	0,08 W/m ² K		
U-verdi tak	0,08 W/m ² K		
U-verdi vindu og dør	0,80 W/m ² K		
Normalisert kuldebro	0,03 W/m ² K		
SFP	1,50 kW/(m ³ /s)		
n ₅₀	0,60 1/h		
Årsgjennomsnittlig temperatur virkningsgrad for varmegjenvinner	0,85	NS3701 :2012 tabell 8	
Belysning	Effektbehov (Gjennomsnitt) 4,0 W/m ²		
Persontetthet	15 m ² /person	Tek 17	
Luftmengde	Utenfor driftstid	0,6 (l/m ² s)	NS 3701:2012 tillegg A, tabell A.2
	I driftstid	1,67 (l/m ² s)	

Varmetilskudd	Utstyr	6,0 W/m ²	NS 3701:2012 tillegg A, tabell A.3
Driftstid		12/5/52 (3120 timer i året)	SN/TS 3031:2016 tillegg A, tabell A.8

3.3.1 Oppvarming

Med et bygg over 1000 m² er det følgende energibehov til oppvarming. Årsmiddeltemperatur (θ_{ym}) i Oslo er på 6,1 °C og netto spesifikt energibehov til oppvarming ($EP_{H,0}$) for kontorbygg 20 kWh/m²*år og klimakoeffisienter (k_1) er 3,6 kWh/(m²*år* °C) [21, 22]. Formelen under viser høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til oppvarming og blir da 20,72 kWh/m²*år.

Formel 8-Høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til oppvarming iht NS3701 [21]

$$E_{Oppvarming} = EP_{H,0} + k_1(6,3 - \theta_{ym})$$

3.3.2 Kjøling

For bygg med dimensjonerende utetemperatur ved sommerforhold i Oslo er 26,7 °C og kjølebehovskoeffisient for kontorbygg er 1,4 kWh/ (m²*år* °C) i Oslo. Høyest beregnede kjølebehovet til et bygg for passivhus-yrkesbygg beregnes etter formelen under som gir høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til kjøling og blir da 9,38 kWh/m²*år [21, 23].

Formel 9-Høyeste beregnede netto spesifikt energibehov til kjøling iht NS3701 [21]

$$E_{Kjøling} = \beta(DUT_s - 20)$$

3.4 Grafisk skript

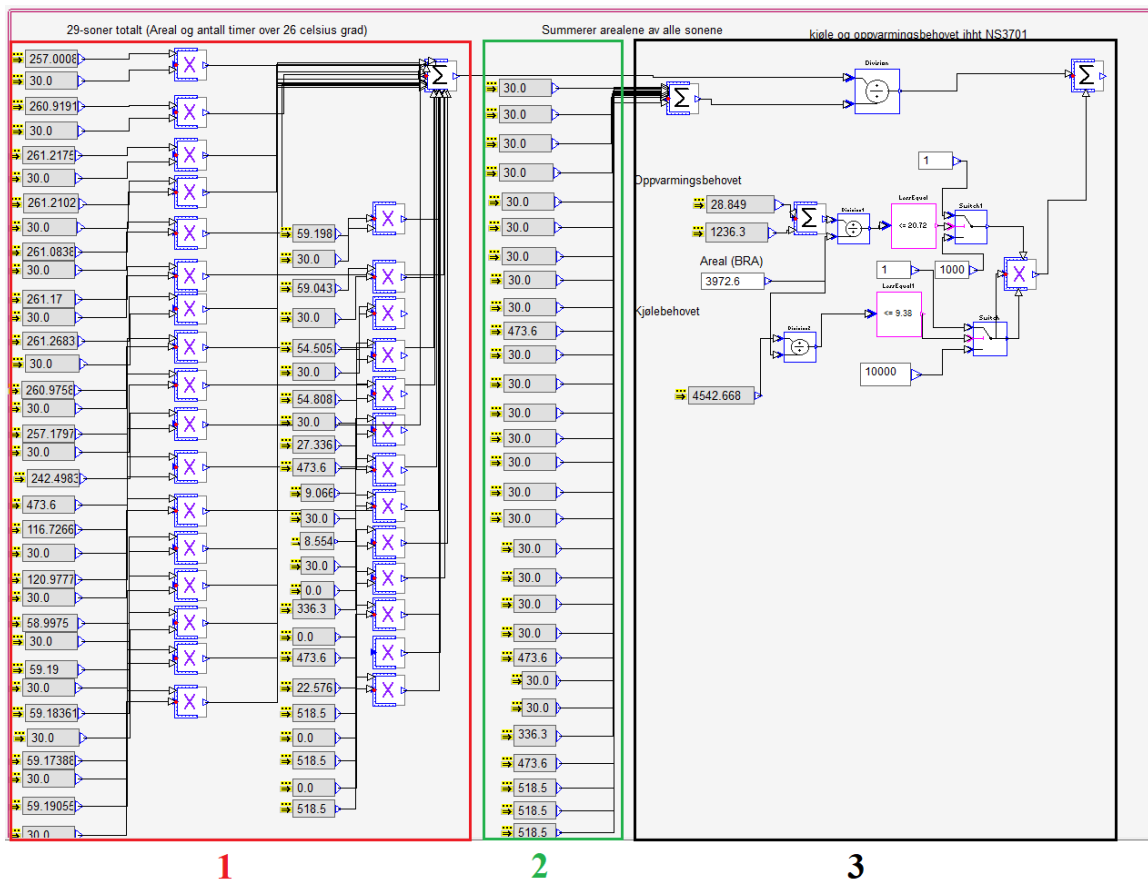
Grafisk skript er innebygd funksjon i IDA ICE som gjør det mulig å definere en funksjon etter sine ønsker. Det er definert alle soner i det grafisk skriptet. Funksjonen i grafisk skriptet sørger for at kravene for oppvarming og kjøling er tilfredsstilt etter NS 3701. Skriptet skal deretter kjøre simuleringer etter at den årlige simuleringen er ferdig for å holde seg innenfor kravene som er satt.

I grafisk skriptet den røde (første) seksjonen viser at det er multiplisert arealene med antall timer over 26 °C i hver sone og deretter har resultatene blitt summert. Den grønne (andre) seksjonen summerer arealene i alle soner. Den tredje seksjon viser at første seksjonen deles med den andre seksjonen (Se figur 6). Kravet skal opprettholdes når man optimaliserer for både

oppvarming og kjøling etter NS 3701. Når det skal simuleres og optimaliseres i IDA-ICE fra 01.mai til 30. september behøves det ikke å sette akkurat det årlige energikravet i skriptet, men i denne oppgaven ble det beholdt de årlige energikravene (se 3.3 kravet). Etter hver endt optimalisering kjøres det uansett en årlig simulering for å se om byggets energibehov er innenfor kravet. Resultatene på dette skal presenteres i neste kapittelet. Formelen under tar for seg det som skjer i første og andre seksjonen.

Formel 10-Arealvektet gjennomsnittlig timer som overskrider 26 °C

$$\bar{t} = \left(\sum_1^{29} A_n \cdot t_n \right) \cdot \left(\sum_1^{29} A_n \right)^{-1}$$



Figur 6-Grafisk skriptet til referansebygget

3.5 Simulering

Simuleringsperioden i Oslo er sommerperioden. I IDA-ICE skal simuleringsperioden være fra 01.mai til 30. september. Før man kjører simuleringen i sommerperiode skal det simuleres et år for å se om kontorbygget tilfredsstillt passivhuskravet for både kjøle- og oppvarmingsbehovet. Dette gjelder for referansebygg uten, med PCM og etter optimalisering.

I Oslo skal det sammenlignes tre forskjellige soner med forskjellige beliggenhet for å se hvordan faseendringsmaterialet fungerer i soner som ligger i nord og sør-fasaden. For Los Angeles, Cape Town og Singapore skal det simuleres for ett år for å se om faseendringsmaterialene fungerer året rundt. For sammenligningsskyld er det valgt å se faseendringsmaterialet kun i en og samme sone globalt (Oslo, Los Angeles, Cape Town og Singapore). Figurene som kommer til å vises i resultat kapittelet er simulert timer i x-aksen og temperatur i y-aksen. Tabell 4 gir en oversikt til hvor mange timer det er i enhver måned.

Tabell 4-Timer med tilhørende måneder

Måned	Timer
Januar	744
Februar	1416
Mars	2160
April	2880
Mai	3624
Juni	4344
Juli	5088
August	5832
September	6552
Oktober	7296
November	8016
Desember	8760

3.6 Phase Change Material

Det er valgt å fokusere på tre forskjellige typer PCM som skal integreres inn i innerveggene, ytterveggene og himlingen. For at de forskjellige PCM-ene fungerer optimalt er det viktig å ha en god ventilasjon og vindusåpningsstrategi slik at faseendringsmaterialene smelter på dagen for å kjøle og størkne på kvelden for å avgi varme.

For å få god termisk komfort med bruken av PCM er det viktig å tenke på smelte- og størkningstemperatur. For å få dette til er det viktig at alle sonene opprettholder temperaturvariasjon på 19 til 26 grader celsius slik at PCM-ene både smelter og størkner innenfor disse områdene slik at den termiske komforten i kontorbygget blir tilfredsstillt.

Faseendringsmaterialet som skal benyttes er Gyproc, Bio-Q25 og SP24E. I tabell 5 presenteres egenskapene til PCM-ene. Ytterligere informasjon for materialene vises i vedlegget C.1-C.3.

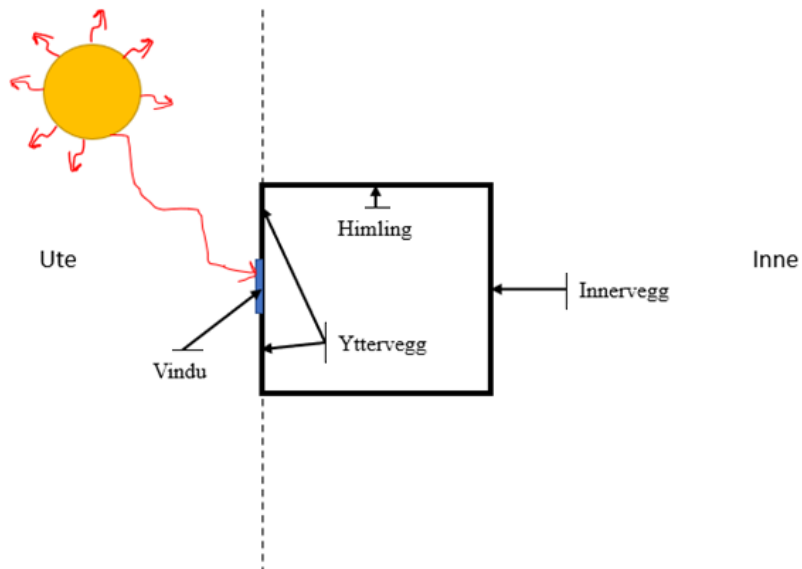
Tabell 5-Egenskapene til faseendringsmaterialene [24,25,26]

Produsent	PCM	Stoff type	Smeltepunkt [°C]	λ [W/mK]	Maks C_p [J/kgK]	ρ [kg/m ³]
Gyproc. SAINT-GOBIN	Gyproc	Parafin	24	0,1	14 300	970
PHASECHANGE : ENERGY SOLUTIONS	Bio-Q25	Plante basert biprodukter	25	0,15-2,5	88498	850-1400
Rubitherm	SP24E	Saltvannblandinger og tilsetningsstoffer	24	0,5	147000	1500/1400

3.6.1 Plassering

Figuren under viser vertikalsnitt av kontorbygget. PCM vil legges i kontorbygget slik det er illustrert på figuren i IDA-ICE i følgende rekkefølge. Faseendringsmaterialene plasseres slik det er vist i figur 7.

- Overalt (yttervegg, innervegg og himling)
- Vegg (yttervegg og innervegg)
- Himling



Figur 7-Vertikalsnitt av kontorbygget

3.7 Optimalisering

For å kunne kjøre optimalisering i IDA-ICE går du til tools helt øverst og velger deretter parametric run og legger til alle de nødvendige parameterne i input og output. Etter alt dette trykker du på parametric run og velger GenOpt. Det vil dukke opp en svart skjerm som viser oversikt over simulert data. Optimaliseringen vil bli ferdig når GenOpt appen forsvinner fra Windows skjermen. For å kunne optimalisere dette tar det cirka to til fire dager avhengig av kapasiteten til PC-en. Punktene nedenfor er like for alle tre PCM (Gyproc, Bio Q25 og SP24E) bortsett fra tykkelsen som vil endre seg etter optimalisering avhengig av hvor PCM skal legges (yttervegg, innervegger og himling).

Det skal optimaliseres kun smelte-/størknepunkttemperaturen som varierer fra 15 til 30 grader celsius og tykkelsene varierer fra 1-10 mm. For value skal valgt verdi ligge innenfor i OK range. OK range ser på hvor mye parameterne varierer i en gitt verdi fra min til maks. Distribution (uniform) sørger for at valgt parametere fordeler seg i et område, mens resolution er antall parameterverdi (kun for numerisk parametere) [27].

For output skal parameterne enten maksimeres eller minimeres. For dette tilfellet er det valgt å minimere timer over 26 grader celsius (outsignal). Outsignal har direkte link fra grafisk skriptet og disse verdiene fra outsignal optimaliseres direkte fra grafisk skriptet. Kjøling og oppvarming har også direkte link fra grafisk skriptet på samme måte. Når optimaliseringen er ferdig, skal det velges den aller minste verdien for outsignal (timer over 26 °C for alle soner). Se figur 8 og 9.

Name	Value	Unit	OK range	Distribution	Resolution	Target
■ yttervegg	0.001	m	[0.001 0.01]	UNIFORM	10	Yttervegg1.PCM layer.Thickness
■ innervegg	0.003	m	[0.001 0.01]	UNIFORM	10	Rendered l/w concrete wall ag...
■ himling	0.01	m	[0.001 0.01]	UNIFORM	10	Concrete floor 150mm (examp...
■ TH[1]	15.54	°C	[15 15.7]	UNIFORM	10	gyproc1.TH[1]
■ TH[2]	15.77	°C	[15.71 16]	UNIFORM	10	gyproc1.TH[2]
■ TH[3]	16.5	°C	[16.1 17]	UNIFORM	10	gyproc1.TH[3]
■ TH[4]	17.4	°C	[17.1 18]	UNIFORM	10	gyproc1.TH[4]
■ TH[5]	18.4	°C	[18.1 19]	UNIFORM	10	gyproc1.TH[5]
■ TH[6]	19.9	°C	[19.1 20]	UNIFORM	10	gyproc1.TH[6]
■ TH[7]	20.5	°C	[20.1 21]	UNIFORM	10	gyproc1.TH[7]
■ TH[8]	21.7	°C	[21.1 22]	UNIFORM	10	gyproc1.TH[8]
■ TH[9]	22.2	°C	[22.1 23]	UNIFORM	10	gyproc1.TH[9]
■ TH[10]	24.0	°C	[23.1 24]	UNIFORM	10	gyproc1.TH[10]
■ TH[11]	24.1	°C	[24.1 25]	UNIFORM	10	gyproc1.TH[11]
■ TH[12]	25.6	°C	[25.1 26]	UNIFORM	10	gyproc1.TH[12]
■ TH[13]	26.5	°C	[26.1 27]	UNIFORM	10	gyproc1.TH[13]
■ TH[14]	27.7	°C	[27.1 28]	UNIFORM	10	gyproc1.TH[14]
■ TH[15]	28.6	°C	[28.1 29]	UNIFORM	10	gyproc1.TH[15]
■ TH[16]	29.2	°C	[29.1 30]	UNIFORM	10	gyproc1.TH[16]

Figur 8-Input verdier parametric run på IDA-ICE

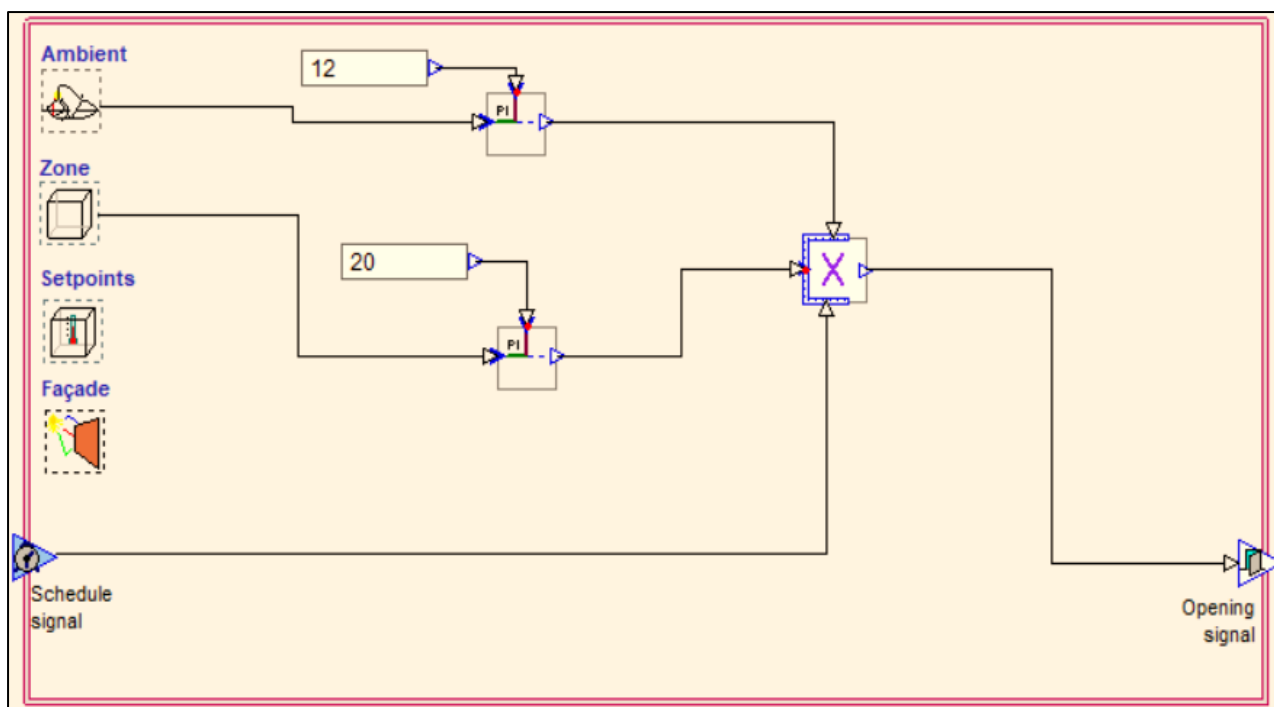
Name	Target	Function	Role
■ OUTSIGNAL1	Graphical script 1.ADDER3.O...		MIN
■ cooling	Graphical script 1.Division2.y_...		SHOW
■ heating	Graphical script 1.Division1.y_...		SHOW

Figur 9-Output verdier parametric run på IDA-ICE

3.8 Vindusåpning

Det er laget forenklet vinduskontroller i IDA-ICE slik at når utetemperaturen er over 12 °C og operativ temperaturen over 20 °C. Med vindusåpning ble det mulig for faseendringmaterialet å fungere optimalt. Vinduskontrolloren sørger for at vinduene åpner seg utenfor driftssiden slik at PCM-en blir kjølt ned om natta (størkner). Det er mulig å lage en kontrollere som sørger for at vinduene åpner seg utenfor driftssiden som er (23-02) slik at PCM-ene blir kjølt ned om natta (størkne) og varmet opp om dagen (smelte).

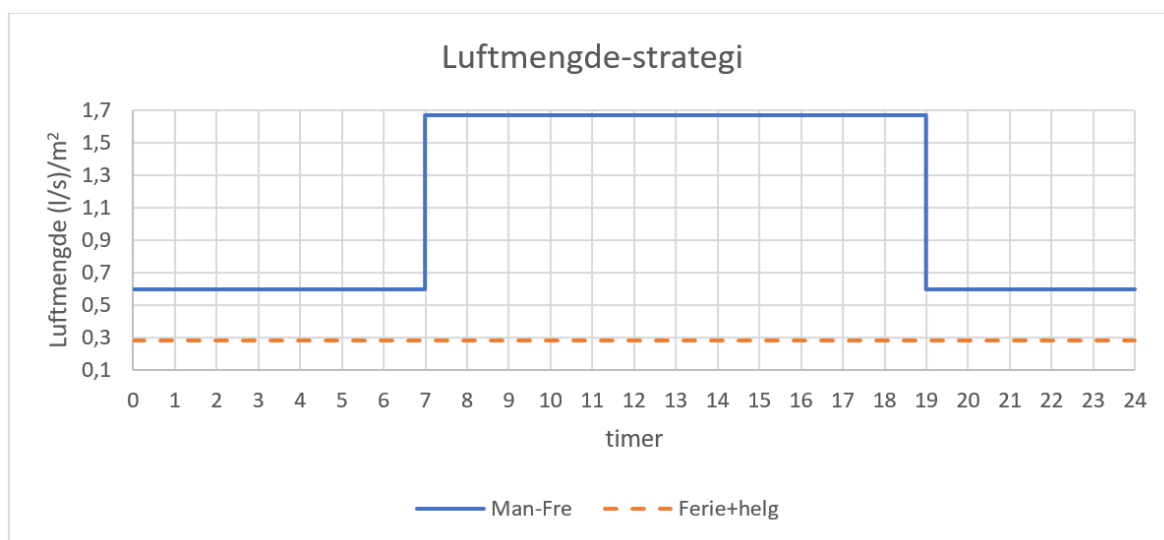
Etter mange simuleringer er det testet hvordan temperatursettpunktene varierer i temperatursvingningene fra 19 til 26 °C på romnivå. Etter de endeløse simuleringstestene har valget falt for 12 °C og 20°C som gjorde det mulig at temperatursvingningene er innenfor 19 til 26 °C. Det er en rekke andre tiltak som gjorde det mulig å få til dette blant annet tilluftstemperatur, luftmengde, vindusåpner også videre. Se figur 10.



Figur 10-Vinduskontroller laget i IDA-ICE

3.9 Luftmengde

Luftmengde strategien for kontorbygget tilfredsstiller passivhuskravet. Strategien som er brukt er styrt CAV. Det er brukt minimumskravet til NS3701 i driftstid 1.67 (l/s)/m^2 og 0.28 (l/s)/m^2 utenfor driftstid for helger og ferietid ellers $0,6 \text{ (l/s)/m}^2$ fra mandag til fredag (se tabell 3). Se figur 11.

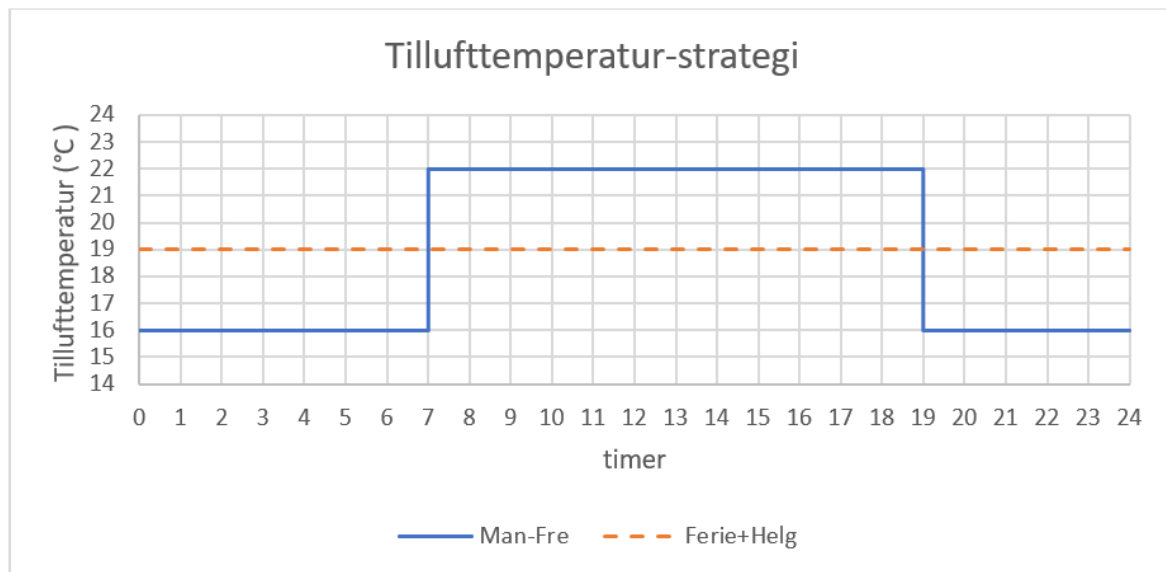


Figur 11-Luftmengde strategien til kontorbygget

3.9.1 Tilluftstemperatur

Strategien som er brukt, er overtemperert tilluftstemperatur. I driftstiden er tillufttemperaturen noe høyere enn utenfor driftstid. Det er gjort slikt for å øke utnyttelsesgraden til PCM for å

smelte på dagen og kjøle ned på kvelden for å få PCM til størkne. En rapport fra SINTEF-målinger gjort i miljøhuset GK viser at høy overtemperatur og lavt luftmengde påvirker ikke termisk komfort i et cellekontor [28]. Se figur 12.



Figur 12-Tillufttemperaturen som er brukt i kontorbygget med og utenfor driftstid

3.10 Excel

Etter hver endt simulering i IDA-ICE har man muligheten til å eksportere resultatene fra IDA-ICE til Excel. Dette har gjort jobben en del besparende i forhold til antall timer for å sortere dataene. Grafene som er presentert i resultat kapittelet er et utklipp fra Excel. Det er valgt å samle data til tre soner som befinner seg i sør, nord og midtre delen av bygget. De sonene som er valgt er valgt fordi det er de mest kritiske i forhold til sør, nord og midtre del av bygget. Dataene som ble eksportert fra IDA-ICE var operativ temperatur og simulerte timer.

4.0 Resultat & diskusjon

4.1 Referansebygget i Oslo

Kontorbygget tilfredsstillter passivhuskravet for yrkesbygg NS 3701 i IDA-ICE etter at bygget er simulert (se tabell 5). Se vedlegg B.

Tabell 6-Referansebygg oppfyller kravet

Simulering i IDA-ICE		NS3701	
Oppvarming [kWh/m ² år]	Kjøling [kWh/m ² år]	Oppvarming [kWh/m ² år]	Kjøling [kWh/m ² år]
19,64	1,14	20,72	9,38

4.2 Referansebygget med PCM i Oslo

Følgende resultat skal presenteres for dette delkapittelet for faseendringmaterialene Gyproc, Bio-Q25 og SP24E. Det er valgt tykkelse for Gyproc, Bio-Q25 og SP24E på 3,0 mm og etter optimalisering vil tykkelsen variere. Resultatet for Gyproc, Bio-Q25 og SP24E viser at det er ugunstig å legge Gyproc, Bio-Q25 og SP24E på himlingen. Det oppnås også bedre resultat av å legge faseendringmaterialene på cellekontor enn kontorlandskapet. Resultatene for Gyproc, Bio-Q25 og SP24E kommer til å bli vist i under kapitlene under. I kontorbygget er det sett på forskjellige soner for å kunne se resultatet av forskjellige fasader i bygget (nord, sør og midtre del). Kontorbygget med PCM og etter optimalisering tilfredsstillter passivhuskravet (se tabell 8). Tykkelsen for faseendringmaterialet før og etter optimalisering for Gyproc, Bio-Q25 og SP24E vises i tabell 7.

Tabell 7-Tykkelsene til faseendringmaterialene

Type PCM	Beliggenhet	Tykkelse [mm]	
		Før optimalisering	Etter optimalisering
Gyproc, Bio-Q25 og SP24E	Vegg og overalt	3	9
	Himling	3	8

Tabell 8-Kravet er oppfylt med PCM og etter optimalisering

Type PCM	Beliggenhet	Årlig energibehov etter NS3701			
		Før optimalisering		Etter optimalisering	
		Oppvarming g [kWh/m ² år]	Kjøling [kWh/m ² år]	Oppvarming g [kWh/m ² år]	Kjøling [kWh/m ² år]
Gyproc	Vegg og overalt	19,83	1,13	19,58	1,12
	Himling	19,67	1,14	19,67	1,14
Bio-Q25	Vegg og overalt	19,85	1,13	19,73	1,12
	Himling	19,64	1,14	19,64	1,14
SP24E	Vegg og overalt	19,86	1,13	19,75	1,11
	Himling	19,65	1,14	19,65	1,14

4.2.1 Gyproc

Gyproc hjelper til å få ned operativ temperaturen og timer over 26 °C til null i sommerperioden. Gyproc er lagt på forskjellige steder i bygningen som vegg (innervegg og yttervegg), himling og overalt (vegg og himling). Det er ingen forbedring med Gyproc på himling, men på vegg hjelper Gyproc betydelig, spesielt for cellekontor. Det oppnås samme resultatet med Gyproc for vegg og overalt (himling, innervegg og yttervegg). Dette er på grunn av at bidraget for Gyproc på himling er tilnærmet lik null se 4.2.1.2.

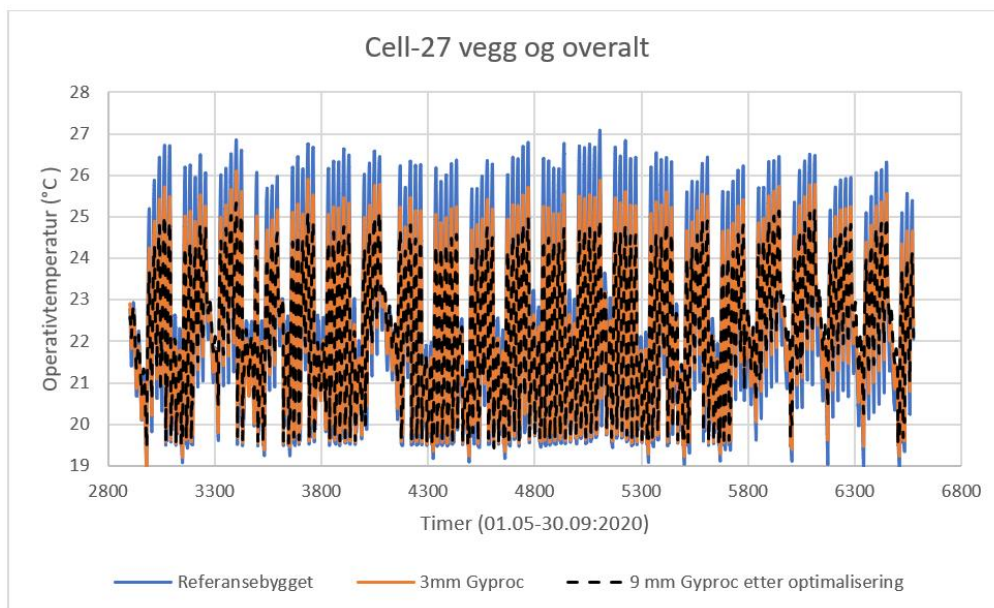
For kontorlandskapene viser det seg at Gyproc fungerer mindre effektivt sammenlignet med cellekontorene. Årsaken til dette kan være at areal størrelsene til kontorene, se kapittel 3.1. Det har noe å si hvilken fasade kontoret befinner seg i og med om det er sør eller nord. Tabell 9, viser gjennomsnittlig temperaturendring som er fått med Gyproc og etter optimalisering sammenlignet med referansebygget. Ytterligere informasjon til sonene 2-etg-N og 2-etg-M finnes i vedlegg F.1.

Tabell 9-Gjennomsnittlig temperaturforskjell med Gyproc og etter optimalisering

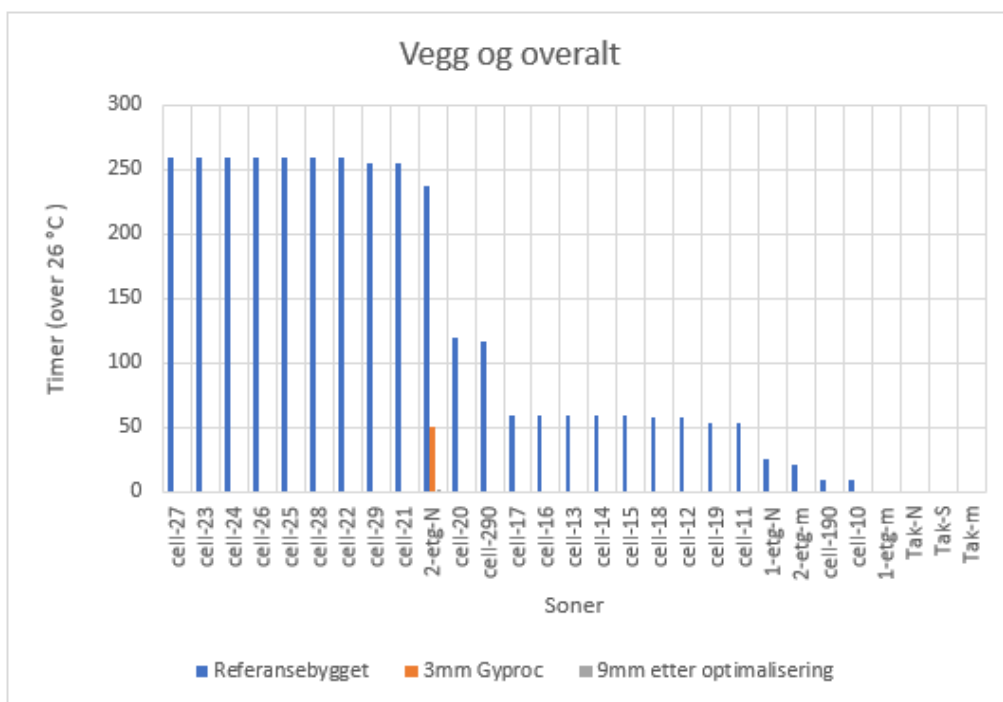
PCM-type	Beliggenhet	Sone	ΔT [°C]	
			Før optimalisering	Etter optimalisering
Gyproc	Vegg og overalt	Cell-27	1,23	2,19
		2-etg-N	0,47	0,95
		2-etg-M	0,4	0,85
	Himling	Cell-27	0	0
		2-etg-N	0	0
		2-etg-M	0	0

4.2.1.1 Vegg & overalt

Resultatet for Gyproc på veggene og overalt gir samme resultat, altså ytterveggene og innerveggene og himling. Figur 14 under viser at antall timer over 26 °C blir redusert. Resultatene ved endt optimalisering går ytterligere ned når det gjelder operativ temperatur og antall timer over 26 °C. Cell-27 gir mest temperaturforskjell med Gyproc på 1,23 °C og etter optimalisering på 2,19 °C (se figur 13). Det blir interessant å se hvordan resultatet blir for Bio-Q25 og SP24E. Se delkapitlene 4.2.2 og 4.2.3. For flest soner med Gyproc (3,0 mm yttervegger og innervegger) reduseres timer over 26 °C ned til null bortsett fra en sone i andre etasje 2-etg-N som befinner seg i nord-fasade. I denne sonen klarte Gyproc 3,0 mm vegg og overalt å få timene fra 237 til 51 og etter optimalisering fås timene til null se figur 14.



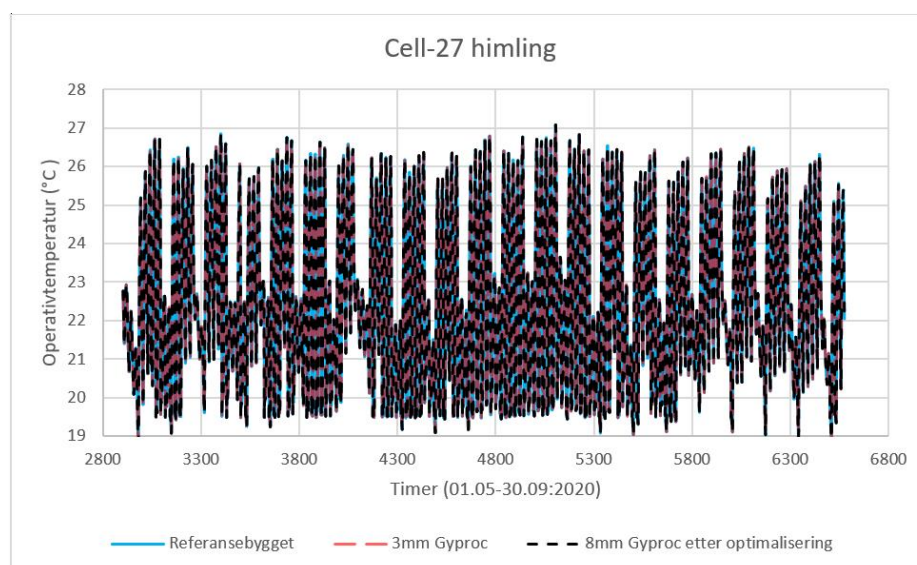
Figur 13-Temperaturendring i cell-27 Gyproc (vegg og overalt)



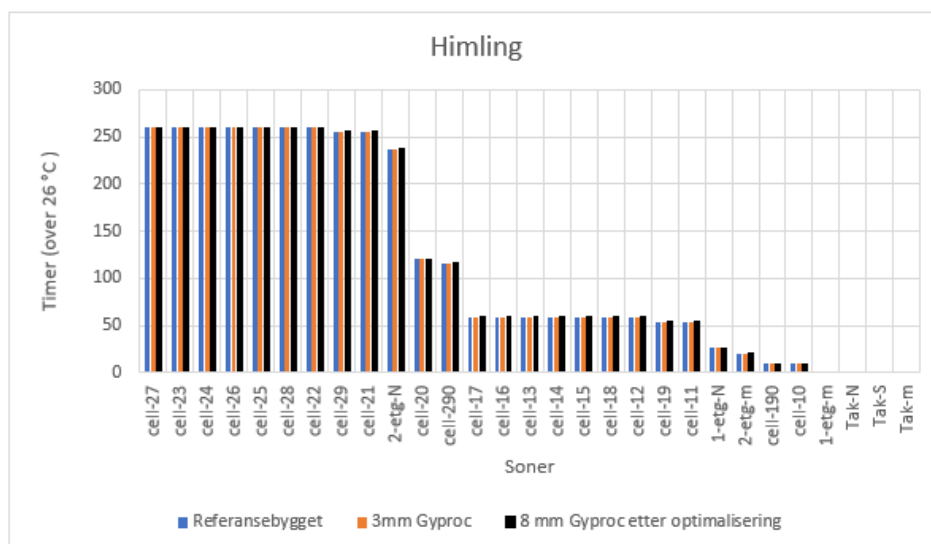
Figur 14-Soner som overskrider timer over 26 °C med Gyproc (vegg og overalt)

4.2.1.2 Himling

Resultatet viser at det er ingen forbedringer med Gyproc på himlingene og etter optimalisering. Operativ temperaturen og antall timer over 26 °C har ikke gått ned i det hele tatt. Det kan være forskjellige årsaker til at faseendingsmaterialet ikke fungerer på himlingen. Det kan være at arealstørrelsen til himlingen er liten i forhold til veggene med tanke på at det oppnås bedre resultat på veggene. Plasseringen av utstyrene som ventilasjon og belysning kan også påvirke resultatet. Se figurene 15 og 16.



Figur 15-Temperaturendring i cell-27 Gyproc (himling)



Figur 16-Soner som overskrider timer over 26 °C med Gyproc (himling)

4.2.2 Bio-Q25

I dette delkapittelet skal det forskes nærmere på hvordan Bio-Q25 hjelper til med å få ned operativ temperaturen og timer over 26 °C i sommerperioden. Bio-Q25 er lagt på forskjellige steder i bygningen som vegg (innervegg og yttervegg), himling og overalt (vegg og himling). Det er sett på forskjellige soner med forskjellig beliggenhet for å se resultatene på tvers av sonene. Bio-Q25 i cellekontoret gir bedre resultat enn for kontorlandskap som tidligere nevnt i 4.2.1. Verdiene i tabellen under viser gjennomsnittlig temperaturforskjell mellom referansebygget og med 3,0 mm Bio-Q25 og etter optimalisering. For øvrige informasjon til sonene 2-etg-N&M vises i vedlegg F.2.

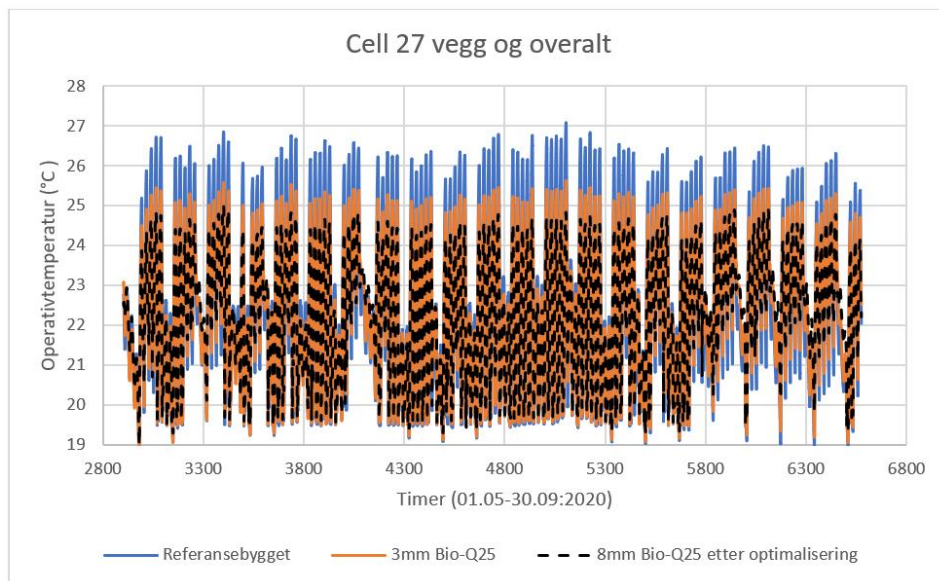
Tabell 10-Gjennomsnittlig temperaturforskjeller med Bio-Q25 og etter optimalisering

PCM-type	Beliggenhet	Sone	ΔT [°C]	
			Før optimalisering	Etter optimalisering
Bio-Q25	Vegg og overalt	Cell-27	1,52	2,3
		2-etg-N	0,7	1,1
		2-etg-M	0,6	1,0
	Himling	Cell-27	0	0
		2-etg-N	0	0
		2-etg-M	0	0

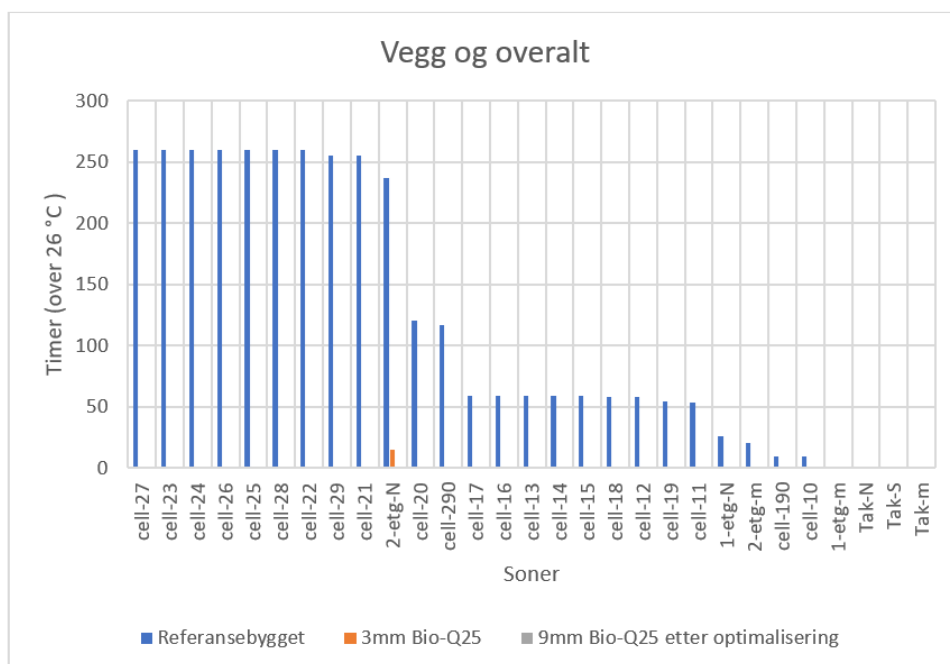
4.2.2.1 Vegg & overalt

Etter å ha lagt Bio-Q25 på vegg og overalt viser resultatene at operativ temperaturen og antall timer over 26 °C fås ned og etter optimalisering. Resultatet for Bio-Q25 på vegg og overalt gir

samme svar. Tidligere har resultatet med Gyproc vist betydelig forskjell mellom cell-27 og kontorlandskapet. Cell-27 viser en temperaturforskjell på 1,52 °C med 3,0 mm Bio-Q25 og etter optimalisering på 2,3 °C. Bio-Q25 klarte å få ned timene fra 260,1 over 26 grader celsius ned til null i de fleste soner med 3,0 mm Bio-Q25 og etter optimalisering. Generelt fås alle timene ned til null etter optimalisering. I sone (2-etg-N) skiller seg fra resten av sonene og 3,0 mm Bio-Q25 klarte å få ned timene fra 237 til 15,1. Det viser seg at Bio-Q25 er bedre enn Gyproc, når det gjelder å få ned operativ temperaturen og antall timer over 26 °C. Se figur 17 og 18.



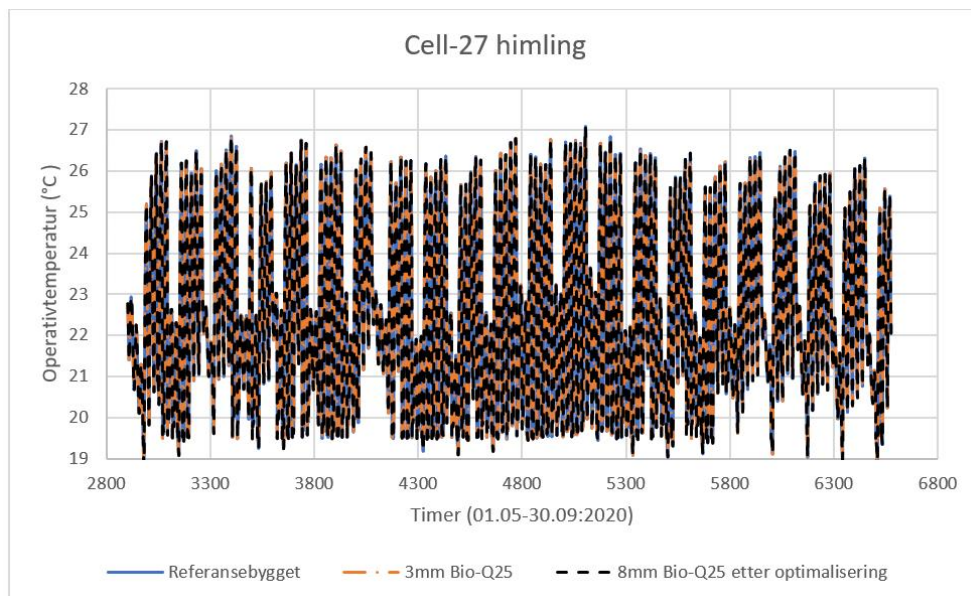
Figur 17-Temperaturrendring i cell-27 Bio-Q25 (vegg og overalt)



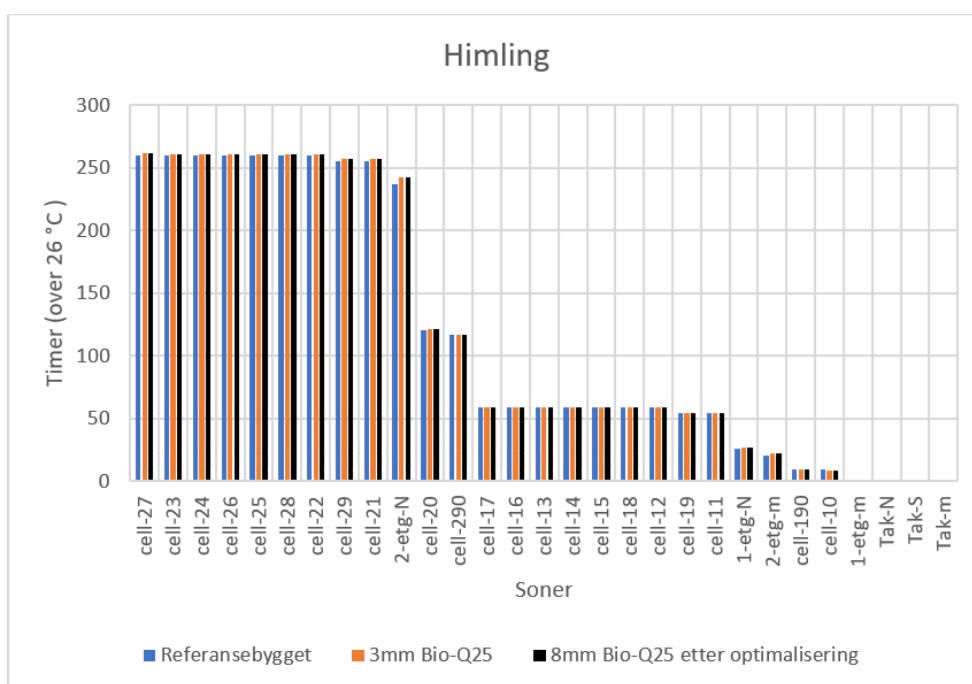
Figur 18-Soner som overskrider timer over 26°C med Bio-Q25 (vegg og overalt)

4.2.2.2 Himling

Resultatet viser at det ikke er forbedringer med Bio-Q25 på himlingene og etter optimalisering. Operativ temperaturen og antall timer over 26 °C har ikke gått ned i det hele tatt for Bio-Q25. Mulige årsak er nevnt i 4.2.1.2 (Gyproc himling). Se figurene 19 & 20.



Figur 19-Temperaturendring i cell-27 Bio-Q25 (himling)



Figur 20-Soner som overskrider timer over 26 °C med Bio-Q25 (himling)

4.2.3 SP24E

I dette delkapitlet skal det forskes på hvordan SP24E hjelper til med å få ned operativ temperaturen og timer over 26 °C i sommerperioden. SP24E er lagt på forskjellige steder i bygningen som vegg (innervegg og yttervegg), himling og overalt (vegg og himling).

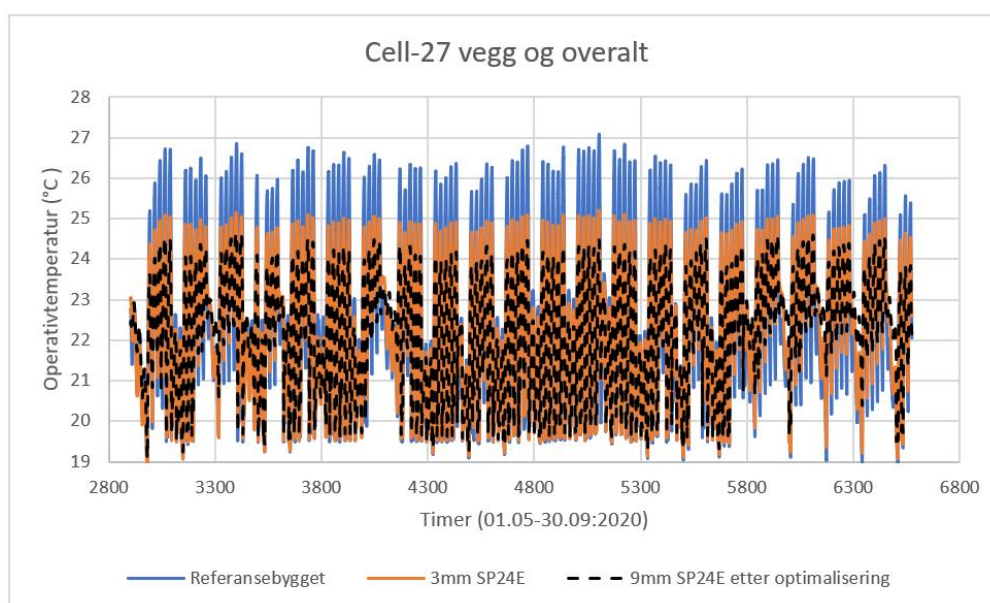
Resultatet viser at SP24E fungerer bedre i vegg på grunn av at SP24E ikke hjelper i himling og dette fører til resultatet for vegg og overalt blir det samme. Resultatet viser også at SP24E fungerer bedre i cellekontoret enn kontorlandskap. Tabellen under viser gjennomsnittlig temperaturskjell og etter at man har lagt SP24E i (vegger, overalt og himling) og etter optimalisering vises i tabell 11. For øvrige informasjon til sonene 2-etg-N&M vises i vedlegg F.3.

Tabell 11-Gjennomsnittlig temperaturskjell med SP24E og etter (optimalisering)

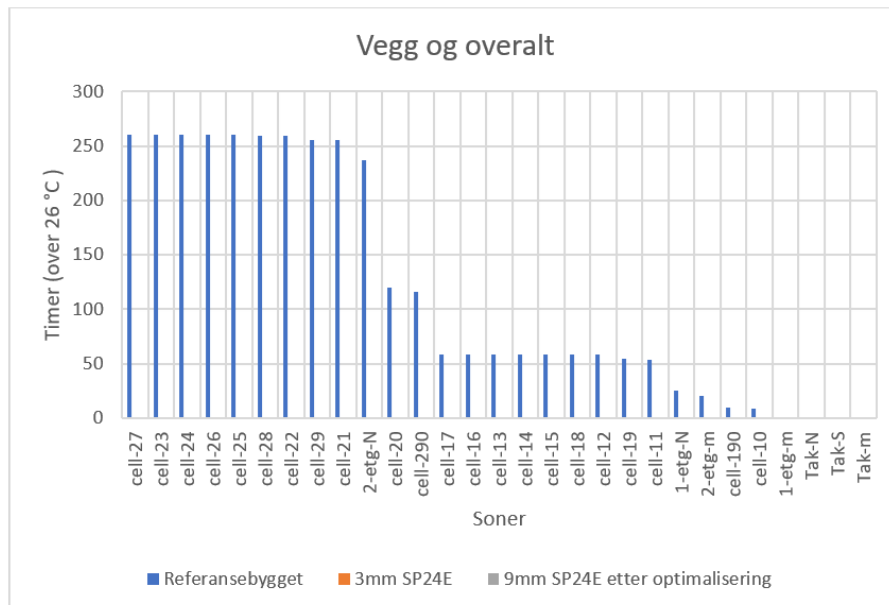
PCM-type	Beliggenhet	Sone	ΔT [°C]	
			Før optimalisering	Etter optimalisering
SP24E	Vegg og overalt	Cell-27	2,0	2,6
		2-etg-N	1,1	1,4
		2-etg-M	0,91	1,3
	Himling	Cell-27	0	0
		2-etg-N	0	0
		2-etg-M	0	0

4.2.3.1 Vegg & overalt

SP24E vegg og overalt operativ temperaturen fås ned fra 26 °C. Resultatet for SP24E på veggene og overalt gir samme resultatet som for Gyproc og Bio-Q25. Cellekontoret har den største gjennomsnittlig temperaturskjell på 2,0 °C med 3,0 mm SP24E og etter optimalisering på 2,6 °C. Se tabell 11, figur 21 og 22.



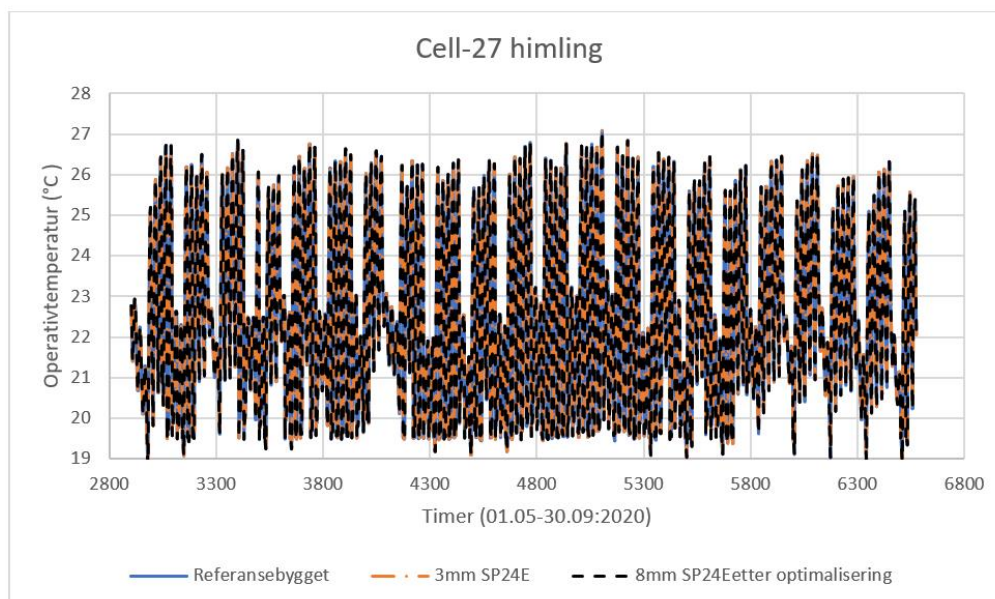
Figur 21-Temperaturendring i cell-27 SP24E (vegg og overalt)



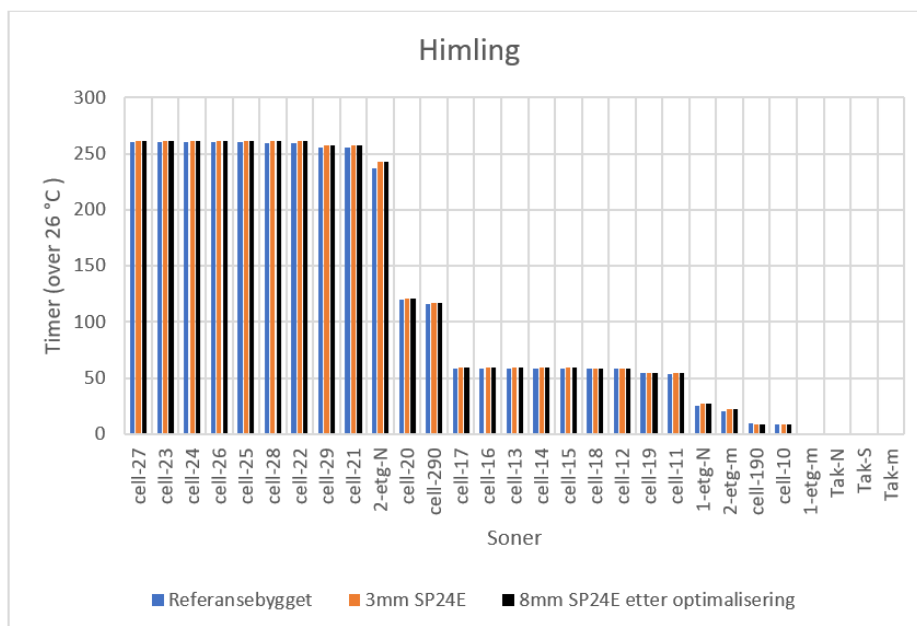
Figur 22-Soner som overskrider timer over 26 °C med SP24E (vegg og overalt)

4.2.3.2 Himling

Resultatet viser at det er ingen forbedringer med SP24E på himlingene og etter optimalisering. Operativ temperaturen og antall timer over 26 °C har ikke gått ned i det hele tatt. Se figur 23 og 24.



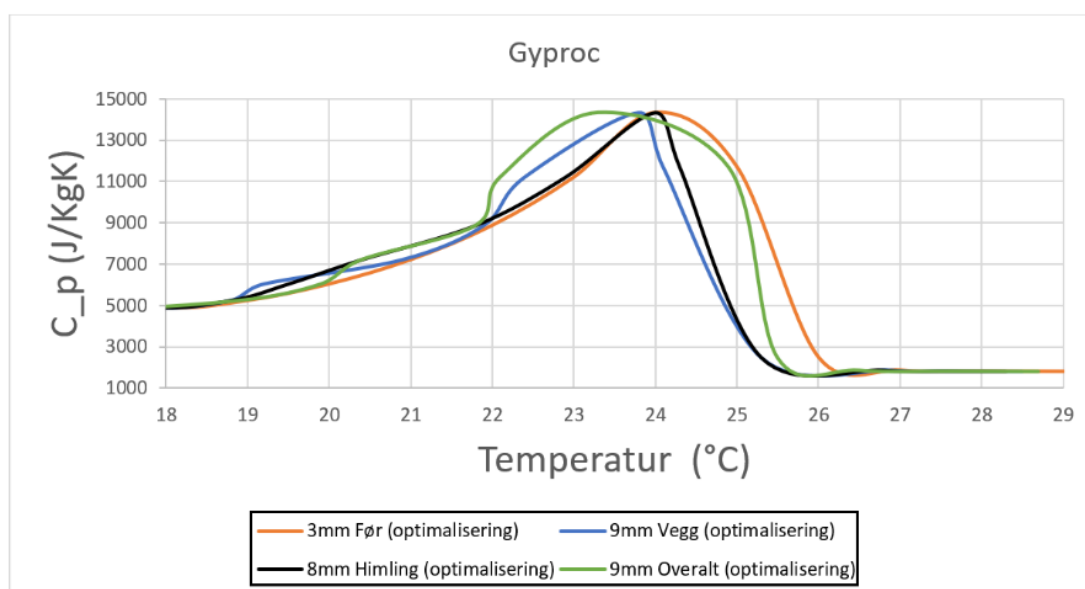
Figur 23-Temperaturendring i cell-27 SP24E (himling)



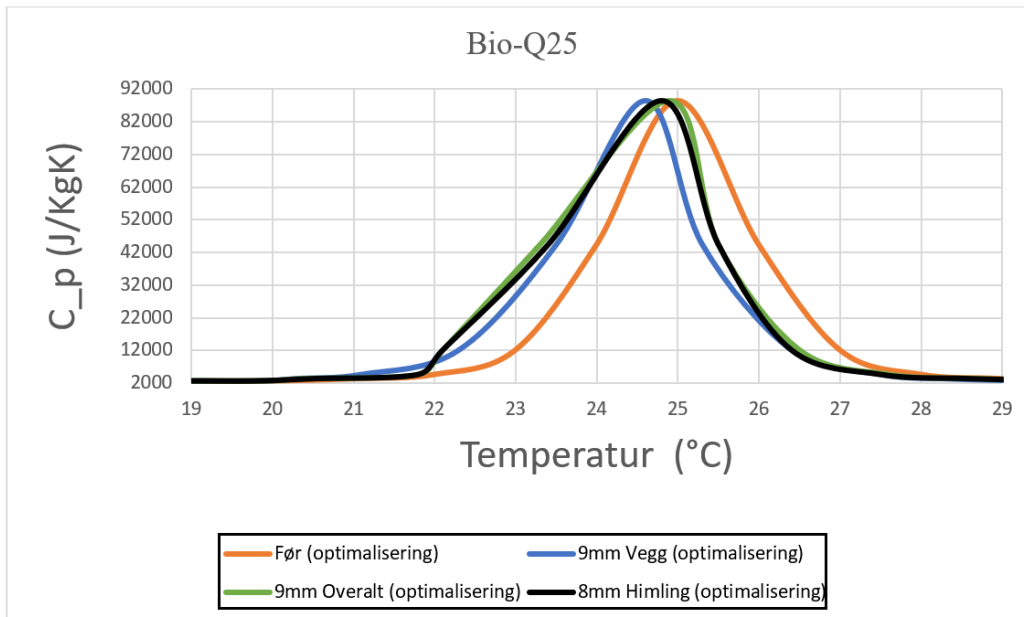
Figur 24-Soner som overskrider timer over 26 °C med SP24E (himling)

4.3 C_p vs T

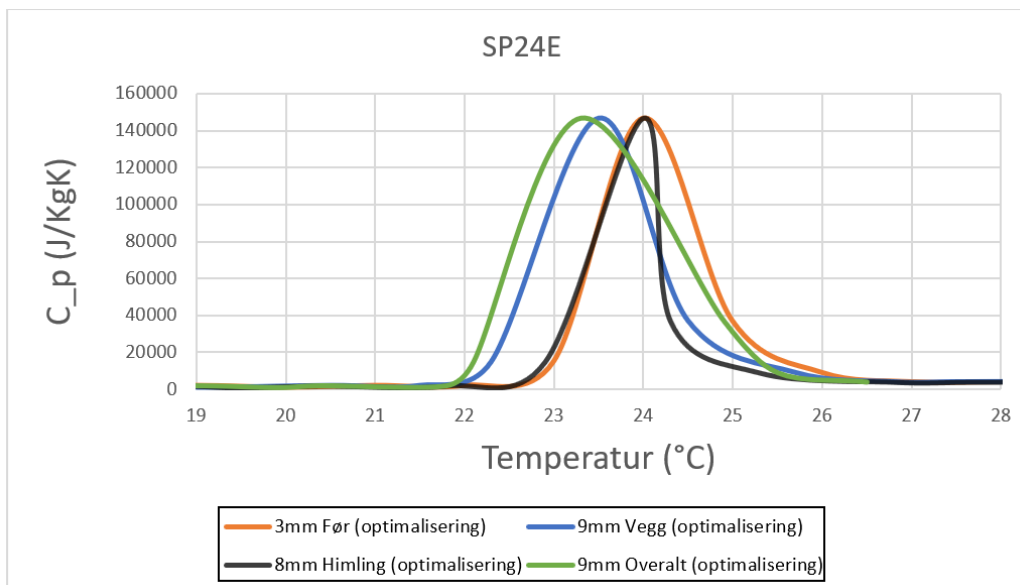
Etter endt optimalisering i Oslo for de forskjellige faseendringmaterialene ble det sett på variasjonen for smeltepunkttemperaturen for Gyproc, Bio-Q25 og SP24E. Da optimaliseringen er ferdigstilt ble det sammenlignet forskjellige steder hvor man har lagt PCM i (vegg, himling og overalt) for å analysere hva som skjer med smeltepunkttemperaturen. Figurene under viser at lavere smelte-/størkningspunkttemperaturene gir bedre resultat i Oslo som vist i delkapitlene 4.2.1-4.2.3. Grafene for resultatet vises i figur 25, 26 og 27.



Figur 25-Gyproc temperatur i x-akse C_p i y-akse



Figur 26-Bio-Q25 temperatur i x-akse Cp i y-akse



Figur 27-SP24E temperatur i x-akse Cp i y-akse

4.4 Globalt

I denne delen skal det ses nærmere på hvordan faseendringsmaterialet endrer seg til forskjellige steder i verden som Singapore, Cape Town og Los Angeles. Tidligere er det sett på hvordan PCM reduserer både temperatur og antall timer over 26 grader celsius i Oslo. I denne delen skal det undersøkes hvordan faseendringsmaterialene endrer seg etter endret klima, når forutsetningene er helt like som i Oslo. Cape Town, Singapore, Los Angeles og Oslo med faseendringsmaterialene (PCM) er byene som skal sammenliknes.

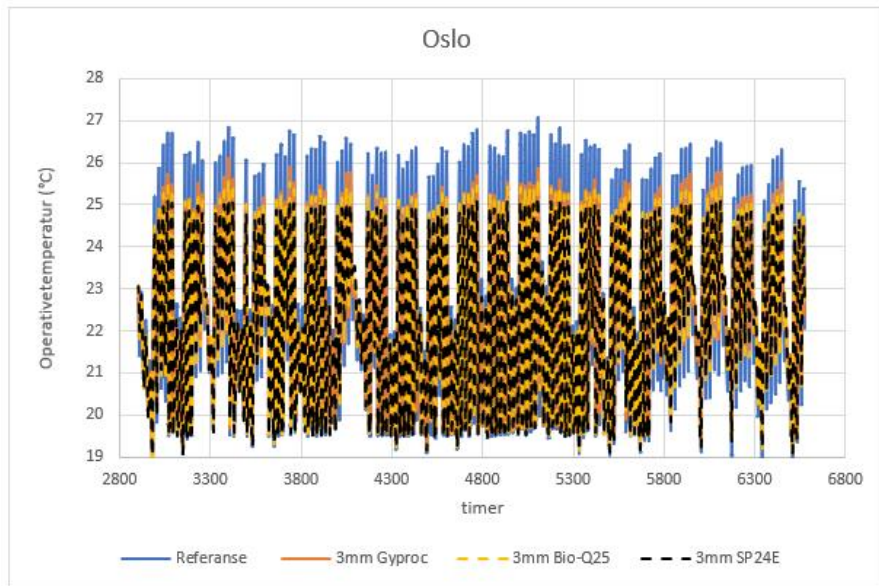
4.4.1 Sammenligning av PCM-ene

Det er sammenlignet Gyproc, Bio-Q25 og SP24E i sone (cell-27) for å se hvilke av dem som reduserer operativ temperatur mest i Oslo (Norge), Los Angeles (USA), Cape Town (Sør-Afrika) og Singapore (Singapore). Tykkelsen for Gyproc, SP24E og Bio-Q25 er 3,0 mm for alle stedene og de er lagt på veggene (yttervegg og innervegg). For Los Angeles og Cape Town reduseres operativ temperaturen stort sett hele året. I Oslo og Cape Town viser det seg at SP24E virker bedre enn Bio-Q25 og Gyproc selv om Gyproc og SP24E har samme smeltepunkt, se figur 28 og 30. Grunnen til at SP24E gir bedre temperaturreduksjon enn Gyproc er at den spesifikke varmekapasiteten til SP24E er høyere enn Gyproc sin spesifikke varmekapasitet.

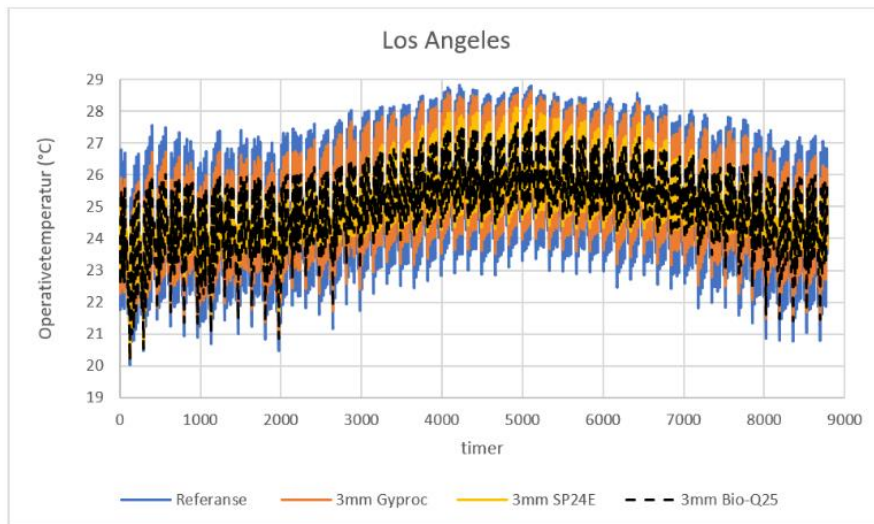
For Los Angeles reduserer Bio-Q25 betydelig mer operativ temperaturen enn SP24E og Gyproc. Grunnen til dette er at temperatursvingningene i disse byene er større enn Oslo. Bio-Q25 yter bedre enn Gyproc og SP24E på grunn av høyere smeltepunkttemperatur. Temperatursvingningene i intervallet 19 til 26 °C gjør at faseendringmaterialene som har smeltepunkt på 24 grader celsius gir bedre resultater enn smeltepunkt på 25 grader celsius. For Los Angeles i sommerperioden ser man tydelig at Bio-Q25 gir bedre resultat enn Gyproc og SP24E. Utenom sommerperiode i Los Angeles gir SP24E og Bio-Q25 omtrentlig samme reduksjon av operativ temperaturen vist i figur 29 og 30.

I Singapore er det neglisjerbar temperaturreduksjon for SP24E mens for Bio-Q25 reduseres temperaturen i noen perioder. I Singapore ligger problemet i at temperatursvingningene er fra 23 til over 30 grader celsius. Dette fører til at det ikke er noe temperaturendring i løpet av hele året for Gyproc. For Bio-Q25 i Singapore reduseres temperaturen i noen grad bedre enn SP24E sammenlignet med referansebygget, se figur 31. De undernevnte punktene er forskning som er gjort under avhandlingen. Mulige løsninger for utfordringen i Singapore kan være:

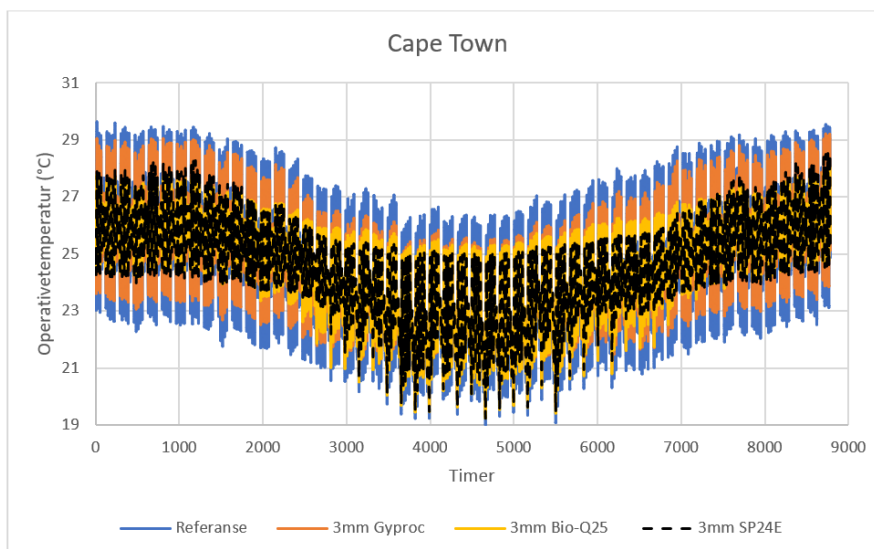
- Øke luftmengden for å redusere temperaturen i rommet.
- Redusere tillufttemperaturen utenfor driftstid for å kjøle ned faseendringsmaterialet.
- Endre vindusstrategien for å øke intervallet til temperatursvingningene (se 3.8 vindusåpning).



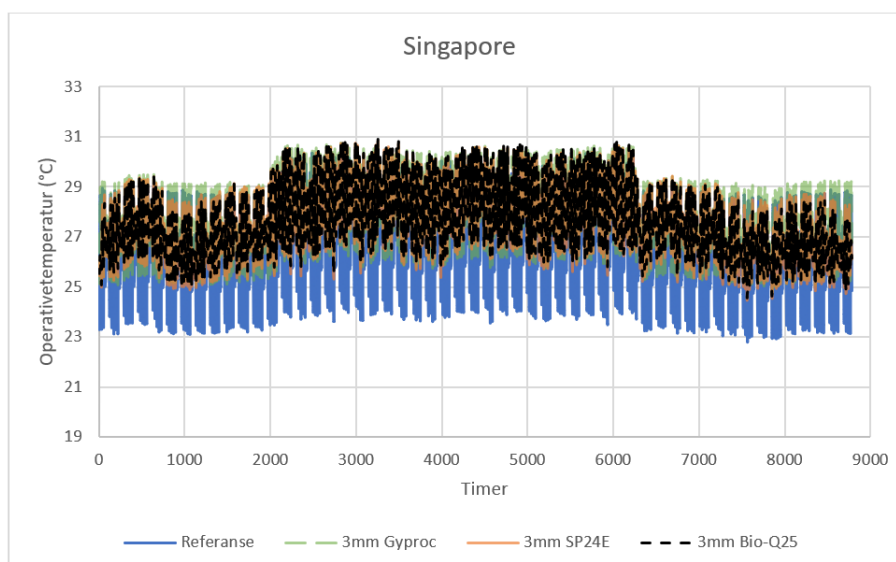
Figur 28-Sammenligning mellom forskjellige PCM i Oslo



Figur 29-Sammenligning mellom forskjellige PCM i Los Angeles



Figur 30-Sammenligning mellom forskjellige PCM i Cape Town



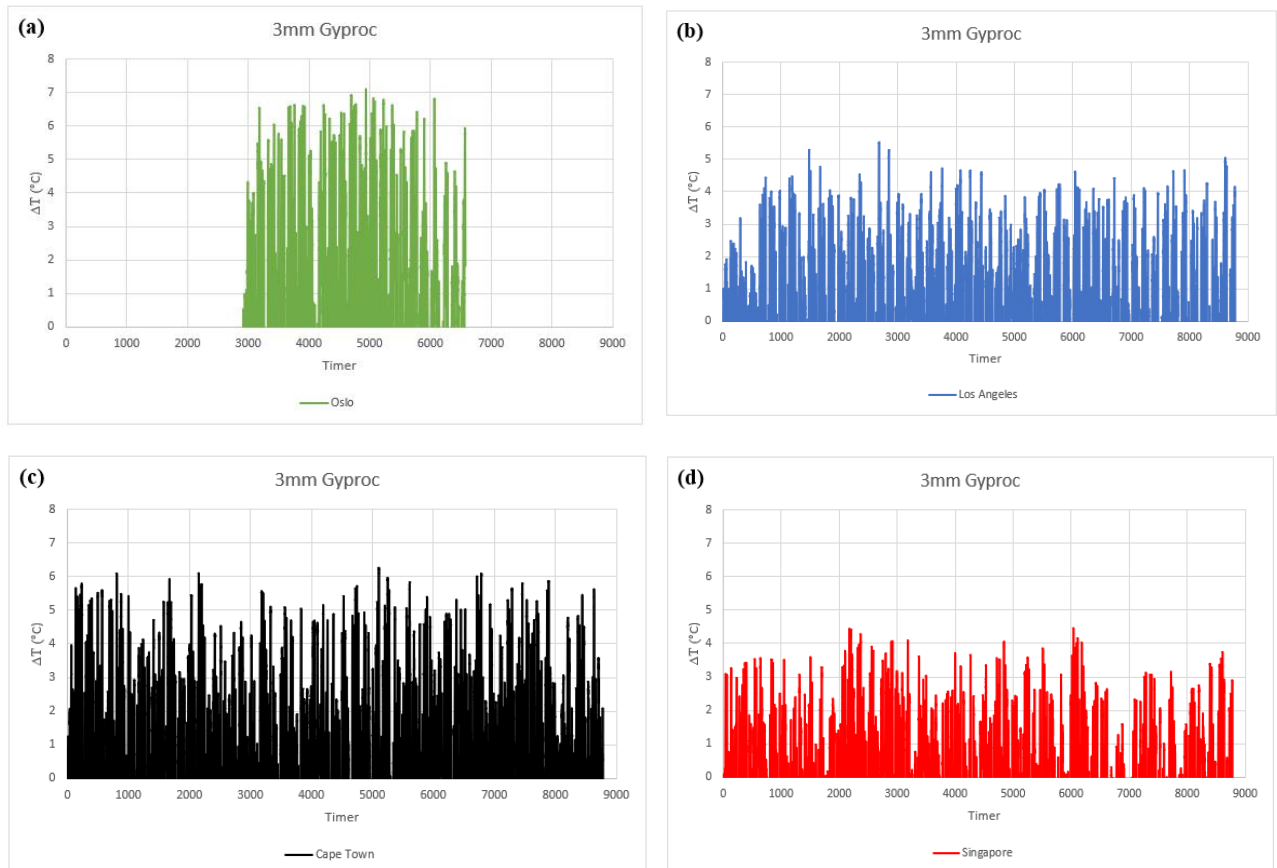
Figur 31-Sammenligning mellom forskjellige PCM i Singapore

4.4.2 Maksimum temperaturredifferanse

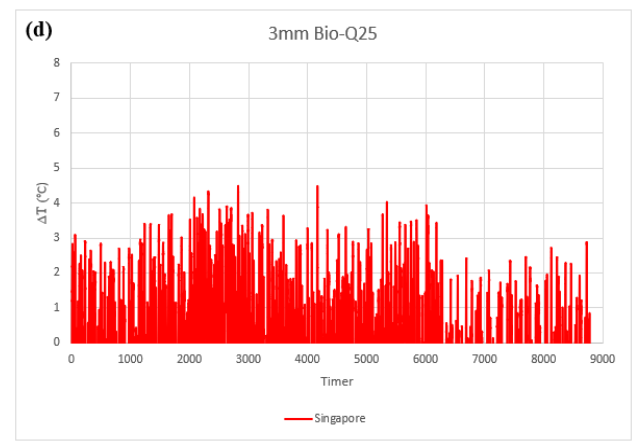
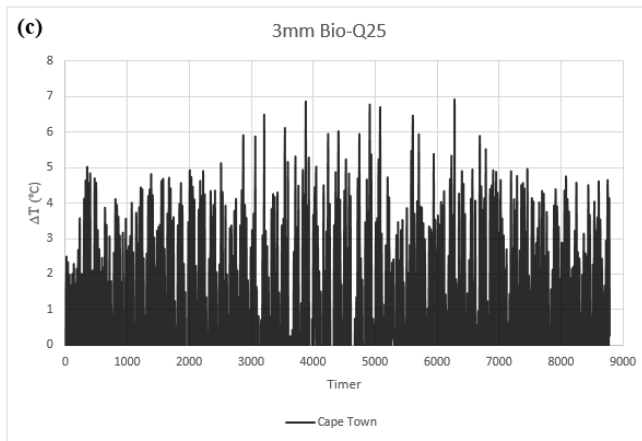
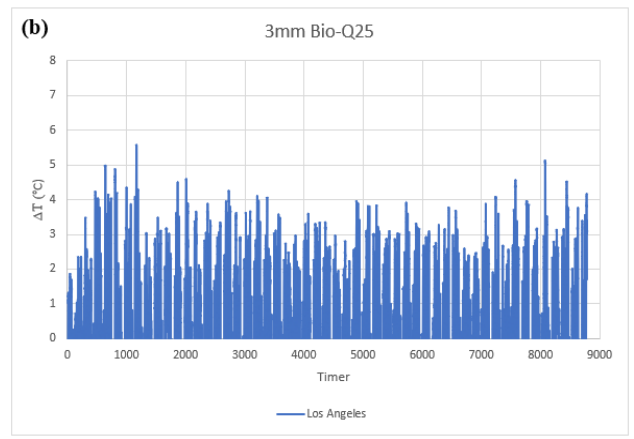
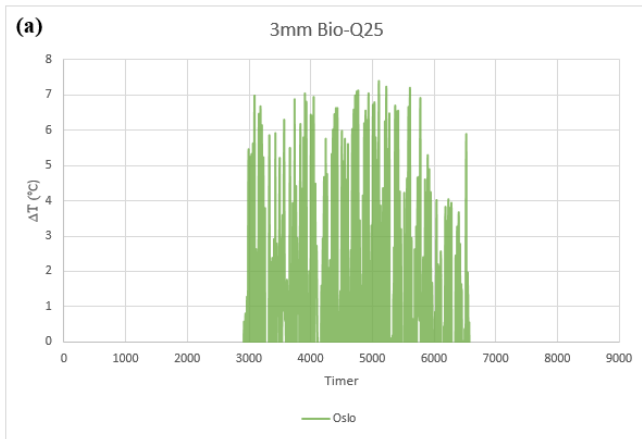
Det er sett på temperatur forskjellen mellom referansebygget og etter man har lagt inn faseendringsmaterialene (Gyproc, Bio-Q25 og SP24E) på veggene. I Oslo virker PCM-ene bedre enn de andre stedene når det gjelder operativ temperaturen. Det er fordi at referansebygget er tilpasset i forhold til Oslo-klima. Derimot i de resterende byene er det også tatt i utgangspunktet, forutsetningene som var i Oslo for å kunne sammenlikne med like premisser. Singapore gir noe mindre gode resultater og likevel vises det i figurene 32-34 (d) at faseendringsmaterialene fungerer i noen timer i løpet av hele året og dette gjelder for Gyproc og SP24E. Dersom man observerer nøye fungerer Bio-Q25 bedre enn Gyproc og SP24E for Singapore. Tabell 12 og figur 32-34 (a, b, c og d) viser den største temperaturredifferansen mellom referansebygget og med faseendringsmaterialene (Gyproc, Bio-Q25 og SP24E). Oslo gir den største temperaturredifferansen enn de andre byene. Det kan oppnås samme resultat som i Oslo for de andre byene hvis man tar i betraktning tiltakene som er nevnt i 4.3.1.

Tabell 12-Maks temperaturforskjell i forskjellige byer og PCM

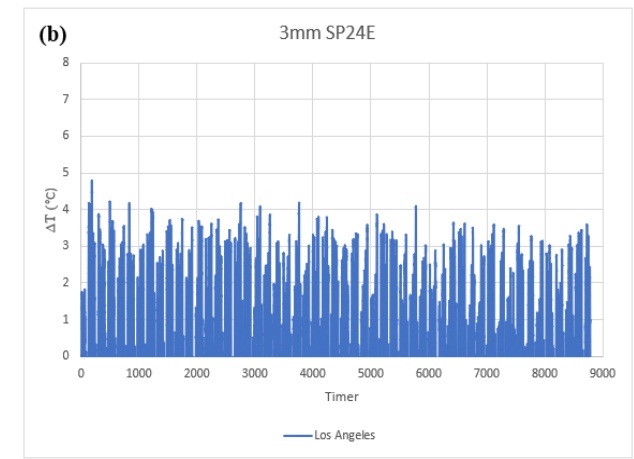
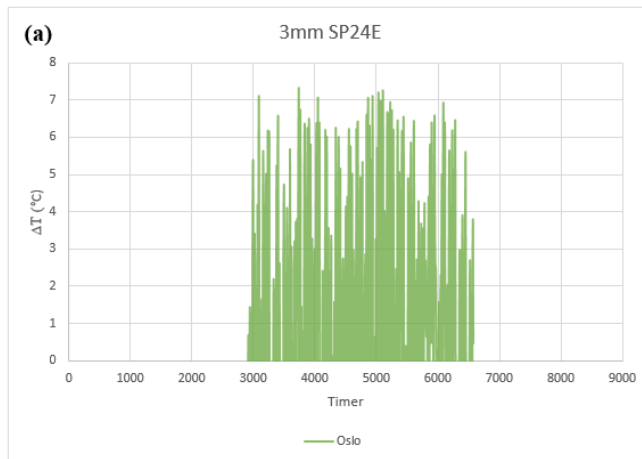
By	3,0 mm PCM	Maks ΔT (°C)
Oslo	Gyproc	7,10 (31.juli)
	Bio-Q25	7,39 (01.august)
	SP24E	7,32 (01.Juni)
Los Angeles	Gyproc	5,51 (01.april)
	Bio-Q25	5,58 (01.februar)
	SP24E	4,8 (01.januar)
Cape Town	Gyproc	6,26 (01.august)
	Bio-Q25	6,92 (15.september)
	SP24E	7,01 (31.juli)
Singapore	Gyproc	4,46 (15.september)
	Bio-Q25	4,49 (31.mai)
	SP24E	4,20 (30.april)

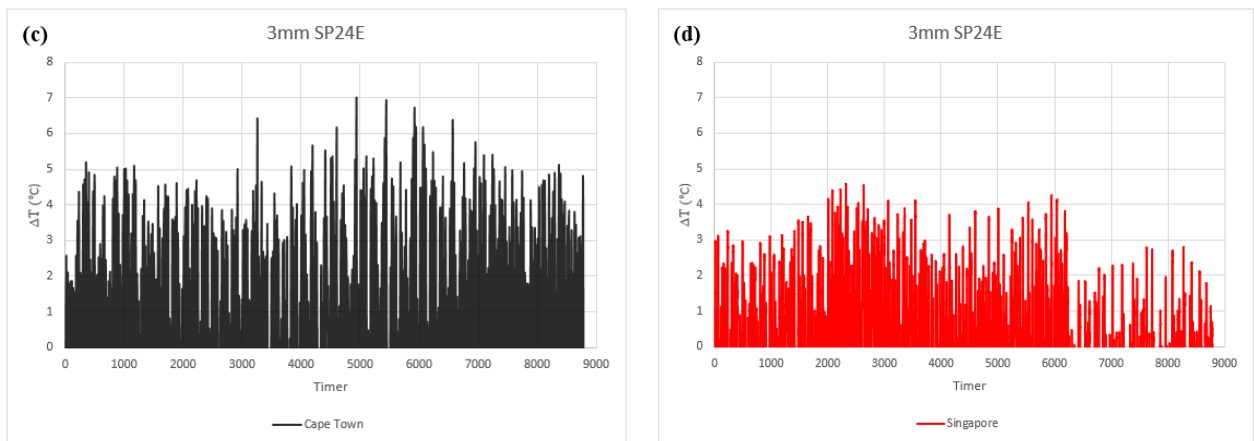


Figur 32-Temperaturforskjellen med Gyproc i Oslo (a), Los Angeles (b), Cape Town (c) og Singapore (d)



Figur 33-Temperaturforskjellen med Bio-Q25 i Oslo (a), Los Angeles (b), Cape Town (c) og Singapore (d)





Figur 34-Temperaturforskjellen med SP24E i Oslo (a), Los Angeles (b), Cape Town (c) og Singapore (d)

4.4.3 Kjølebehov

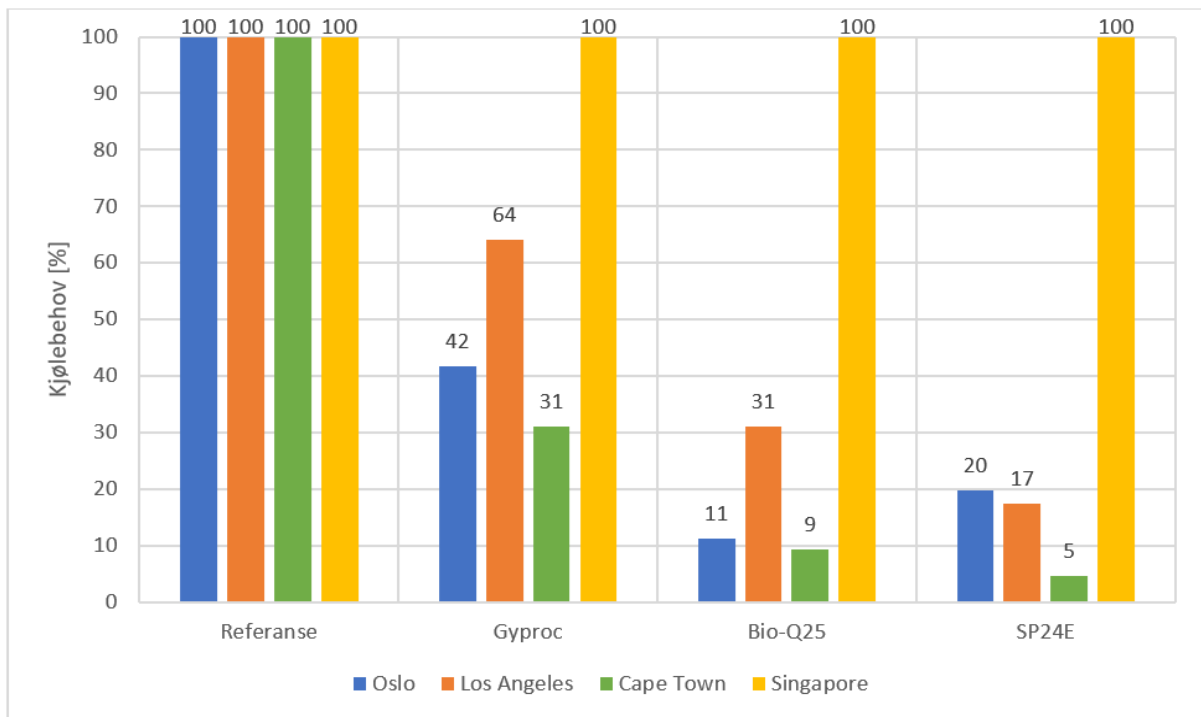
I dette delkapittelet skal det undersøkes og vises resultatene om PCM får ned kjølebehovet. For å undersøke dette ble det plassert lokal kjøling i hver sone for å se om kjølebehovet totalt blir redusert med Gyproc, Bio-Q25 og SP24E. Grunnen til at lokal romkjøling er valgt er fordi kjøling fra ventilasjonsenheten gir lite endring uten og med PCM. Derfor var det spennende å plassere kjøleenheten på romnivå for å observere den eventuelle endringen.

En studie som er gjort for forskjellige land viser at område som er dominert av kalde klima gir PCM med høyere smeltepunkttemperatur oppnår høyere energibesparelse. Varme-klima er det optimale smeltepunkttemperatur lavere for høy energibesparelse og et område som er dominert av både varme og kalde klima ligger smeltepunkttemperaturen et sted mellom 20 til 26 °C [29].

Bio-Q25 har høyere smeltepunkttemperatur enn Gyproc og SP24E som betyr at Bio-Q25 har den største reduksjon av kjølebehovet i Oslo. I varmere klima som Los Angeles og Cape Town gir SP24E mest reduksjon. For å si det kort er det sånn at reduksjon av kjølebehov har sammenheng med smeltepunkttemperatur og klima lokasjon. Dersom man vil ha mest mulig reduksjon av kjølebehov er det viktig å ha i baktanke smeltepunkttemperaturen til faseendringsmaterialet og klima lokasjonen til bygningen. Resultatet i figur 38 og tabell 13 viser at faseendringsmaterialene fungerer bedre i Cape Town enn for Los Angeles og Oslo når det gjelder å få ned kjølebehovet. For Singapore er det ingen reduksjon av kjølebehov.

Tabell 13-Reduksjon i kjølebehov i forskjellige byer og PCM-er

By	3,0 mm PCM	Reduksjon av kjølebehov i [%]
Oslo	Gyproc	58
	Bio-Q25	89
	SP24E	80
Los Angeles	Gyproc	36
	Bio-Q25	69
	SP24E	83
Cape Town	Gyproc	69
	Bio-Q25	91
	SP24E	95
Singapore	Gyproc	0
	Bio-Q25	0
	SP24E	0



Figur 35-Reduksjon av kjølebehov i prosent med Gyproc, Bio-Q25 og SP24E i forskjellige byer

5.0 Konklusjon

Konklusjonen for denne masteroppgaven er at PCM fungerer tilstrekkelig. Det er sett på forskjellige soner i kontorbygget. Tykkelsene som er brukt i denne masteroppgaven er konsekvent bruk av 3,0 mm på grunn av kostnad. For å svare på problemstillingen for denne oppgaven skal følgende punkter fra forskningsspørsmålene svares.

Temperaturreduksjon

PCM reduserer temperaturen i løpet av sommeren. I Oslo er det sett på tre ulike soner som har forskjellige orienteringer og temperaturen reduseres etter at man har lagt faseendringmaterialene i konstruksjonen.

Antall timer som overskrider 26 grader celsius i mer enn 50 timer

PCM kan redusere antall timer som overskrider 26 grader celsius i mer enn 50 timer. Faseendringmaterialene reduserte antall timer fra 260 ned til null i de fleste sonene for kontorbygget i Oslo.

Reduksjon av kjølebehov

PCM kan redusere kjølebehovet og dette gjelder for Gyproc, SP24E og Bio-Q25 etter å ha brukt dem i Oslo, Cape Town og Los Angeles.

Egnet beliggenhet

Etter analyse og observasjon gir Gyproc, SP24E og Bio-Q25 entydig svar om egnet beliggenhet. Det er gunstig å legge faseendringmaterialene på veggene (yttervegger og innervegger). Det er også analysert at PCM i cellekontorene gir bedre temperaturreduksjon enn kontorlandskapet avhengig av hvilken type PCM som benyttes.

PCM i ulike klimatiske forhold

PCM fungerer i forskjellige land med forskjellige klimatiske forhold. Temperatur og kjølebehovet er blitt redusert etter å ha lagt inn faseendringmaterialene. I Singapore var det utfordringer knyttet til å få PCM til å fungere og det er gitt forslag til hva som kan gjøres for å løse dette.

6.0 Videre arbeid

I dette kapitlet gis det forslag til videre arbeid av denne masteroppgaven. Forslaget er å vurdere lønnsomheten til bruken av faseendringmaterialet i virkelig kontorbygg, som befinner seg i Oslo og tilfredsstillende passivhuskravet. Det er også interessant å se hvordan faseendringmaterialet får ned operativ temperaturen, antall timer over 26 grader celsius og kjølebehovet om sommeren i Oslo i virkelig kontorbygg.

Det oppnådde resultatet i Los Angeles, Cape Town og Singapore burde man være kritisk til på grunn av forutsetningene som er gjort. Disse byene burde optimaliseres hver for seg for å se hva som er mest gunstig. Kravet for disse byene er annerledes enn NS3701 og det bør undersøkes som videre arbeid.

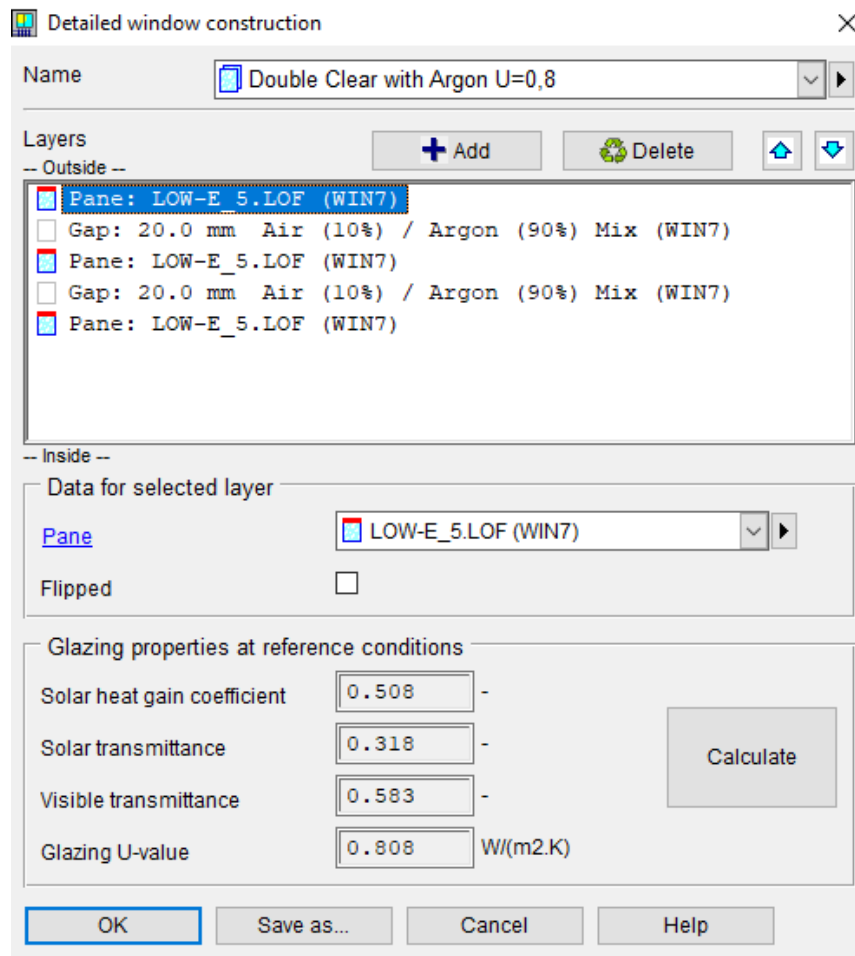
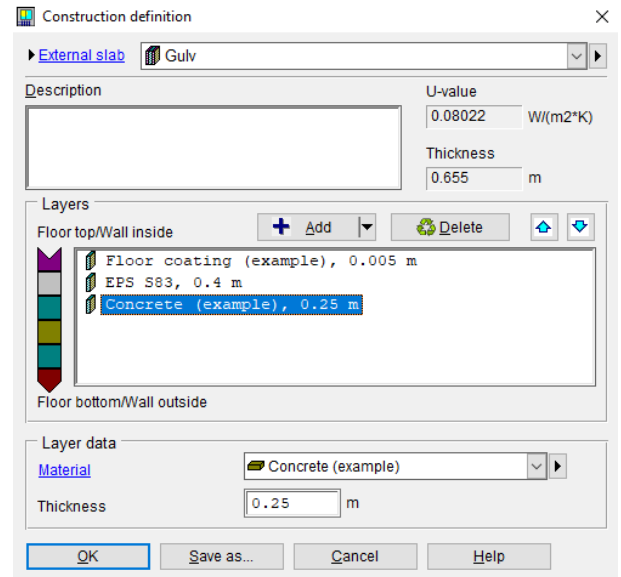
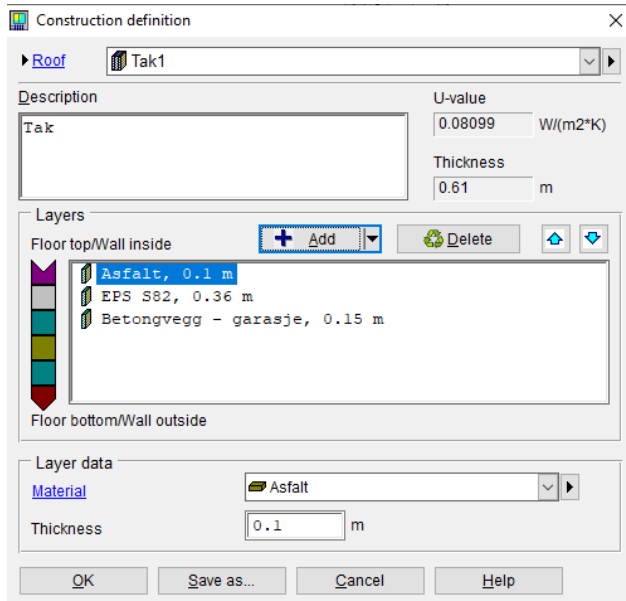
7.0 Referanseliste

- [1] Jana Mlakar, Janez Štrancar. (2011). Overheating in residential passive house: Solution strategies revealed and confirmed through data analysis and simulations. 43, 1443-1451. Hentet fra <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.02.008>
- [2] António Figueiredo, José Figueira, Romeu Vicente, Rui Maio. (2016). Thermal comfort and energy performance: Sensitivity analysis to apply the Passive House concept to the Portuguese climate. 103, 276-288. Hentet fra <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.031>
- [3] Alexis Sevault. (2018, 13.august). Hva er faseendringmateriale (PCM) og vil det slå an i Norge? I #SINTEFF blogg. Hentet 01. juni 2020 fra <https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/energieffektivisering-cat/pcm-faseendringmaterialer/>
- [4] A. Pasupathya, R. Velraja, R.V. Seenirajb (2008). Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. Sciencedirect, Volum (12), 39-64. Hentet fra <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.010>
- [5] SINTEF er et av Europas største uavhengige forskningsinstitutter. Vi utfører hvert år flere tusen oppdrag – for små og store kunder. SINTEF. Hentet 22.12.2019 fra <https://www.sintef.no/om-sintef/>
- [6] Johannes Persson. Mats Westermarck.(2012). Phase change material cool storage for a Swedish Passive House. 54, 490-495. Hentet fra <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.05.012>
- [7] J.S.Sage-Lauck, D.J. Sailor. (2014). Evaluation of phase change materials for improving thermal comfort in a super-insulated residential building. 79, 32-40. Hentet fra <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.028>
- [8] Ellen-Marie Forsberg. (2015, 27.juli). Metoder for etisk vurdering. I forskningsetisk komite. Hentet fra 20.12.2019 fra <https://www.etikkom.no/FBIB/Introduksjon/Systematiske-og-historiskeperspektiver/metoder-og-metodeutvikling-for-etisk-vurdering/>
- [9] Knut. W. Ruyter (2003). Forskningsetikk: Beskyttelse av enkeltpersoner og samfunn (1. utg.). Oslo: Gyldendal Akademisk
- [10] Myhre, Lars mfl. Veileder for prosjektering av passivhus – småhus. Prosjektrapport 105. Oslo: SINTEF Byggforsk, 2012.
- [11] Mads Mysen. (2017, oktober). Termisk inn klima. Betingelser, tilrettelegging og målinger. SINTEF Byggforsk. Hentet fra https://www.byggforsk.no/dokument/193/termisk_inneklima_betingelser_tilrettelegging_og_maalinger
- [12] Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar. (2015). Heat and Mass Transfer: Fundamentals&Applications (5.utg.). Singapore: McGraw-Hill Education
- [13] [Midthun, Christoffer. Teknologier for sesonglagring av termisk energi. ÅS: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, 2014.

- [14] [Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R. & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (2): 318-345. Hentet fra <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- [15] Zhou, D., Zhou, C. Y. & Tian, Y. (2012). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92: 593-605. Hentet fra <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.025>
- [16] IDA-Indoor Climate and Energy. Lastet ned 19.06.2020. Hentet fra <https://www.equa.se/en/ida-ice>
- [17] Grøn, Øyvind. (2018, 20. februar). optimalisere. I Store norske leksikon. Hentet 21. desember 2019 fra <https://snl.no/optimalisere>
- [18] Michael Wetter. (2001). A Generic Optimization Program. Hentet fra <https://simulationresearch.lbl.gov/sites/all/files/48371.pdf>
- [19] TEK17. (2017). Byggeteknisk forskrift.
- [20] SN/TS 3031. (2016). for beregning av energibehov og energiforsyning. (Standard Norge)
- [21] NS 3701. (2012). Kriterier for passivhus og lavenergibygninger – yrkesbygninger. (Standard Norge)
- [22] Tore Kvande, Kim Robert Lisø. (2018, november). Klimadata for termisk dimensjonering og frostsikring. Byggforskserien. Hentet fra https://www.byggforsk.no/dokument/204/klimadata_for_termisk_dimensjonering_og_frostsikring
- [23] TOR HELGE DOKKA. (2012). Faglig underlag for NS3701:2012. Kriterier for passivhus- og lavenergibygg- Yrkesbygninger. (prosjektrapport nr.99). Blindern Oslo: SINTEF akademisk forlag
- [24] Rubitherm. PCM SP-LINE.SP24E. Lastet ned 01.02.2020. Hentet fra <https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/anorganische-pcm-sp>
- [25] PHASECHANGE: ENERGY SOLUTIONS. Data Sheets. Lastet ned 01.02.2020. Lastet fra <https://phasechange.com/technology/data-sheets/>
- [26] Gyproc. SAINT-GOBIN. Lastet ned 16.06.2020. Hentet fra <https://www.gyproc.se/>
- [27] Indoor Climate and Energy. HTML Help guide. Brukt 01.06.2020.
- [28] Kari Thunshelle. (2016). Oppvarming via tilluft: VEILEDNING OG KRAV FOR NÆRINGSBYGG MED ENERGIAMBISJONER. (38). Blindern: SINTEF akademisk forlag.
- [29] M Saffari, A de Gracia, C Fernández, G Zsembinszki, L F Cabeza. (2017). Study on the optimum PCM melting temperature for energy savings in residential buildings worldwide. Hentet fra <https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012113>

Vedlegg

A U-verdier



B Referansebygget

Oppvarmingsbehovet er $(13922,2 + 64133,4) / 3972,6 = 19,64 \text{ kWh/m}^2\text{år}$

Kjølebehovet er $4542,7 / 3972,6 = 1,14 \text{ kWh/m}^2\text{år}$

without pcrn: C:\Users\z326283\ADA\Desktop\OneDrive_1_5-5-2020\without pcrn.prim

General Floor plan 3D Simulation Daylight Outline Summary Details

○ Heating ○ Energy ● Custom

Expand table

Zone	Group	Zone mult	Min temp, °C	Max temp, °C	Min op temp, °C	Max op temp, °C	Max heat supplied, W/m²	Room unit heat, W/m²	Max heat removed, W/m²	Room unit cool, W/m²	Dry vent cool, W/m²	Max sup airflow, L/s (m³)	Max gain, W/m²	Max solar gain, W/m²	Min rel hum, %	Max rel hum, %	pp
cell-22	direct...	1	18.14	26.94	18.63	27.08	10.94	11.58	97.63	0.0	10.37	1.653	1.678	18.36	3.236	89.07	63
cell-23	direct...	1	18.14	26.94	18.63	27.08	10.94	11.58	97.63	0.0	10.37	1.653	1.678	18.36	3.236	89.07	63
cell-24	direct...	1	18.14	26.94	18.63	27.08	10.94	11.58	97.67	0.0	10.37	1.653	1.678	18.36	3.236	89.07	63
cell-25	direct...	1	18.14	26.94	18.63	27.08	10.94	11.58	97.67	0.0	10.37	1.653	1.678	18.36	3.236	89.07	63
cell-26	direct...	1	18.14	26.94	18.63	27.08	10.94	11.58	97.67	0.0	10.37	1.653	1.678	18.36	3.236	89.07	63
cell-27	direct...	1	18.14	26.94	18.63	27.08	10.94	11.58	97.63	0.0	10.37	1.653	1.678	18.36	3.235	89.07	63
cell-28	direct...	1	18.11	26.94	18.62	27.08	10.98	11.57	97.63	0.0	10.37	1.653	1.678	18.36	3.239	89.07	63
cell-21	direct...	1	18.14	26.94	18.63	27.07	10.96	11.6	97.37	0.0	10.35	1.653	1.678	18.36	3.236	89.08	63
cell-29	direct...	1	18.11	26.94	18.62	27.07	10.99	11.59	97.33	0.0	10.35	1.653	1.678	18.36	3.239	89.07	63
cell-20	direct...	1	18.16	26.83	18.57	26.94	15.25	15.5	91.9	0.0	9.97	1.653	1.679	18.35	3.238	89.23	63
cell-200	direct...	1	18.16	26.81	18.57	26.93	15.25	15.49	91.47	0.0	9.957	1.653	1.679	18.35	3.238	89.2	63
2-4-g-N	direct...	1	18.02	26.56	18.52	26.74	7.302	7.544	45.45	0.0	9.607	1.653	1.676	18.35	3.204	89.26	51
cell-11	direct...	1	18.2	26.57	18.63	26.55	10.05	11.57	100.4	0.0	9.847	1.653	1.677	18.35	3.211	89.54	63
cell-12	direct...	1	18.2	26.57	18.64	26.55	10.03	11.55	100.8	0.0	9.867	1.653	1.677	18.35	3.211	89.54	63
cell-13	direct...	1	18.21	26.57	18.64	26.55	10.03	11.55	100.9	0.0	9.87	1.653	1.677	18.35	3.211	89.54	63
cell-14	direct...	1	18.21	26.57	18.64	26.55	10.03	11.55	100.9	0.0	9.87	1.653	1.677	18.35	3.211	89.54	63
cell-15	direct...	1	18.21	26.57	18.64	26.55	10.03	11.55	100.9	0.0	9.87	1.653	1.677	18.35	3.211	89.54	63
cell-16	direct...	1	18.21	26.57	18.64	26.55	10.03	11.55	100.9	0.0	9.87	1.653	1.677	18.35	3.211	89.54	63
cell-17	direct...	1	18.21	26.57	18.64	26.55	10.02	11.55	100.9	0.0	9.87	1.653	1.677	18.35	3.211	89.54	63
cell-18	direct...	1	18.18	26.57	18.63	26.55	10.04	11.53	100.8	0.0	9.867	1.653	1.677	18.35	3.213	89.54	63
cell-19	direct...	1	18.18	26.57	18.63	26.55	10.07	11.55	100.4	0.0	9.847	1.653	1.677	18.35	3.213	89.54	63

Air handling units

AHU	Heating, kWh	Cooling, kWh	AHU heat recovery, kWh	AHU cold recovery, kWh	Humidification, kWh	Fans, kWh
AHU	64043.8	4546.5	44499.0	272.9	0.0	76743.0
Total	64043.8	4546.5	44499.0	272.9	0.0	76743.0

Building Systems energy

System	kWh
Zone heating	13922.2
Zone cooling	0.0
AHU heating	64133.4
AHU cooling	4542.7
Dom. hot water	39172.0
Cooling	4542.7
Heating	11722.0

Energy balance (sensible only)

Envelope & Wall and Roof	Internal gains	Window solar	Mech. supply	Infiltration	Occupants	Equip. ment.	Lighting	Lo. heat
Tk, kWh	M, kWh	W, kWh	air, kWh	h, kWh	pers, kWh	ment, kWh	kWh	heat, kWh
-7769.0	-1408.0	1346.2	-7410.0	-1928.0	36406.2	72361.0	48234.6	139.0
-5241.2	4222.8	-8006.0	-3329.2	-2565.7	223.6	399.2	265.2	139.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rest of time	-7245.0	-5630.6	9362.2	-7077.0	-1672.0	36182.6	71951.8	47969.0
Total	-7769.0	-1408.0	1346.2	-7410.0	-1928.0	36406.2	48234.6	139.0

Delivered Energy

Meter	Total kWh	Per m² demand kWh/m²	Peak kW	Cost	CO2 Emission kg	Primary energy kWh
Lighting facility	48233.0	12.14	15.89			
Electric cooling	1534.2	0.3862	14.33			
Electric heating	15688.0	39.49	265.2			
Fan	76743.0	19.32	19.9			
Pump	287.8	0.07246	0.9189			
Equipment, te...	72361.0	18.22	23.84			
CHP electricity	0.0	0.0	0.0			
Total	35604.0	89.63	340.1	0.0	0.0	0.0

Details • Compare results • Multizone... • Report

C Phase Change Material

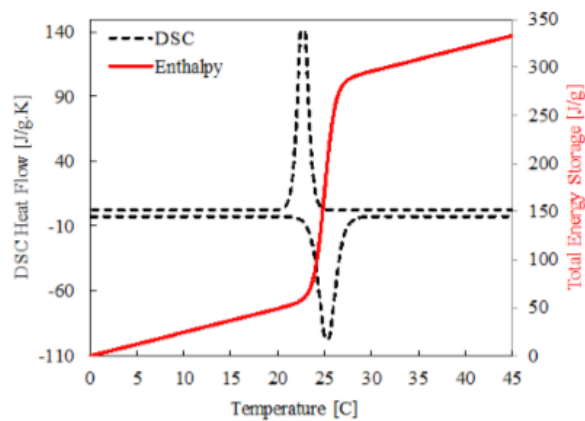
C.1 Bio Q25



- Environmentally-friendly, derived from naturally occurring, food grade substances
- Non-toxic and biodegradable
- Tunable energy storage capacity; more BTUs per pound of PCM
- Tunable density; more BTUs in the same volume
- Tunable thermal conductivity, for improved reaction with subtle changes in temperature
- Non-corrosive
- Chemically stable
- Long lifetime of performance, no degradation in melting temperature or thermal energy storage after thousands of freeze/melt cycles (100+ years)
- Small volume changes during phase transitions

BioPCM Q25 Tunable Physical and Chemical Properties

Property	Value (SI)	Value (Imperial)
Melting Point	25°C	77° F
Latent Heat	210 – 250 J/g	90 – 110 BTU/lb
Energy Storage Capacity	400 – 1250 kJ/m ²	35 – 110 BTU/sq ft
Specific Heat	2.2 – 4.5 J/gK	0.6 – 1.1 BTU/lb°F
Thermal Conductivity	0.15 – 2.5 W/mK	0.09 – 1.45 BTU/ft hr °F
Relative density	0.85 – 1.4 g/mL	53 – 87 lb/ft ³
Viscosity	Liquid, viscous gel, solid-solid gel	



NOTE: Tunable material, physical/chemical properties vary depending on the presence and the concentration of gelling agents

Phase Change Energy Solutions is a global leader in the development and deployment of next generation energy efficiency and thermal storage solutions that harness the power of BioPCM®, the company's proprietary phase change material. Phase Change Energy Solution's BioPCM® products are used to improve whole-building energy efficiency in retail, commercial, hospitality and industrial applications; enable safe transport of sensitive food and pharmaceutical products; and provide enhanced thermal storage capabilities for industrial processes. Fortune 100 banking, telecom, hospitality and technology companies, as well as the U.S. government, have installed millions of square feet of BioPCM® products to reduce operating expenses and environmental impact.

www.phasechange.com
 info@phasechange.com
 1.800.283.7887
 120 E. Pritchard Street, Asheboro, NC 27203



Data Sheet



SP24E



The creation of the latent heat blended material RUBITHERM[®] SP has led to a new and innovative class of low flammability PCM. RUBITHERM[®] SP consists of a unique composition of inorganic components.

RUBITHERM[®] SP is preferably used as macroencapsulated material. Densities of 1,0 kg/l and more can be achieved. This and all properties mentioned below make RUBITHERM[®] SP to the preferred PCM used in the construction industry. Both passive and active cooling can easily be realized e.g. in wall elements and air conditioners.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties:

- stable performance throughout the phase change cycles
- high thermal storage capacity per volume
- limited supercooling (2-3K dependig on volume and cooling rate),
- low flammability, non toxic
- different melting temperatures between -50°C und 70°C are available

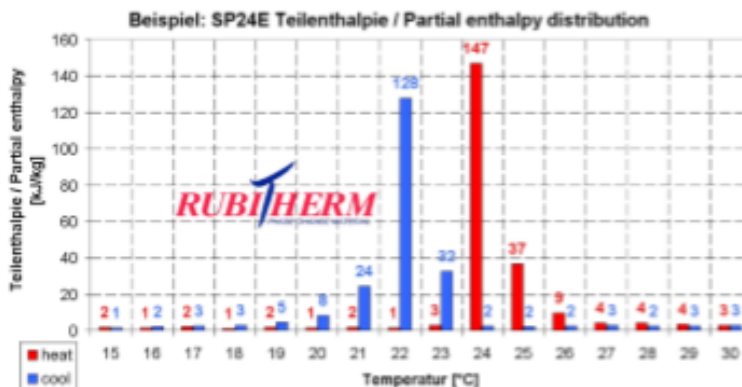
The most important data:

	Typical Values	
Melting area	24-25	[°C]
	main peak: 24	
Congealing area	23-21	[°C]
	main peak: 22	
Heat storage capacity ± 7,5% <small>Combination of sensible and latent heat in a temperatur range of 15°C to 30°C.</small>	180	[kJ/kg]
Specific heat capacity	50	[Wh/kg]*
	2	[kJ/kg·K]*
Density solid <small>at 15 °C</small>	1,5	[kg/l]
Density liquid <small>at 35 °C</small>	1,4	[kg/l]
Volume expansion	3-4	[%]
Heat conductivity	~0,5	[W/(m·K)]
Max. operation temperature	45	[°C]
Corrosion	corrosive effect on metals	



Note: The product must be initialized (melt, homogenize and cool to 0 °C) once before use to achieve the specified properties.

Many SP-product are hygroscopic and may absorb moisture if stored improperly. This can result in a change of the physical properties given.



*Measured with 3-layer-calorimeter.

Rubitherm Technologies GmbH
 Imhoffweg 6
 D-12307 Berlin
 Tel: +49 (30) 7109622-0
 Fax: +49 (30) 7109622-22
 E-Mail: info@rubitherm.com
 Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 18.01.2019

C.3 Gyproc

Pc-Material

Pc-Material gyproc1

Pc-Material
gyproc1

Parameters Description

Name	Value	Unit	Description
N	16	items	Number of temperature coordinates
NM1	15.0	items	Number of partial enthalpies (N-1)
RHOSOL	970.0	kg/m3	Layer density (solid)
CPSOL	14300.0	J/(kg K)	Layer specific heat (solid) (J/(kg K))
LAMBDA SOL	0.1	W/(m ...	Layer heat conductivity (solid) (W/(m K))
CPLIQ	14300.0	J/(kg K)	Layer specific heat (liquid) (J/(kg K))
LAMBDA LIQ	0.1	W/(m ...	Layer heat conductivity (liquid) W/(m K)
C0	300.0	J/(kg K)	Specific heat during reversing (c0 <= min(cpSol...
TH[1:16]	{15.0 16.0 17.0 ...	°C	Temperatures at which melting/solidifying enthal...
DHDTMELT[1:15]	{6195.0 8252.0 ...	J/(kg K)	Partial enthalpies between temperature coordin...
DHDSOLID[1:15]	{6195.0 8252.0 ...	J/(kg K)	Partial enthalpies between temperature coordin...

OK Cancel Save as... Help

DHDTMELT

Close

Parameter
DHDTMELT[1:15]

Description
Partial enthalpies between temperature coordinates divided by temperature interval melting

Values, J/(kg K)

[1] 6195	[6] 6034	[11] 11687
[2] 8252	[7] 7211	[12] 2480
[3] 6230	[8] 8871	[13] 1866
[4] 4930	[9] 11203	[14] 1822
[5] 5239	[10] 14325	[15] 1810

OK Range Real > 0.0 Copy Paste

OK Cancel Help

D GenOpt algoritme

```
Vary{  
#FOR par IN [@ input contents]  
  $(:call parmrn-parm-to-genopt par)  
#END FOR  
}
```

```
OptimizationSettings  
{  
  MaxIte = 1500;  
  MaxEqualResults = 10;  
  WriteStepNumber = true;  
  UnitsOfExecution = $(:call simulation-nproc);  
}
```

```
Algorithm{  
  Main = GPSPSOCCHJ;  
  NeighborhoodTopology = vonNeumann;  
  NeighborhoodSize = 5;  
  NumberOfParticle = 10;  
  NumberOfGeneration = 10;  
  Seed = 50;  
  CognitiveAcceleration = 2.8;  
  SocialAcceleration = 1.3;  
  MaxVelocityGainContinuous = 0.5;  
  MaxVelocityDiscrete = 4;  
  ConstrictionGain = 0.5;  
  MeshSizeDivider = 2;  
  InitialMeshSizeExponent = 0;  
  MeshSizeExponentIncrement = 1;  
  NumberOfStepReduction = 4;  
}
```

E Klimafil i IDA-ICE

E.1 Oslo

Location Oslo/Gardermoen_013840 (ASHRAE 2013)

Position

Country: Norway
 City: Oslo/Gardermoen
 Latitude: 60.2 N ° Elevation: 204 m
 Longitude: 11.08 E ° Time zone: 1.0 E h

Climate description © NOR_OSLO-GARDERMOEN_013840(IW2)

Design day data

Design data file: ASHRAE 2013\013840.tbl User-defined design days

	Winter	Summer	°C
Dry-bulb min	-20.1	13.3	
Dry-bulb max	-14.4	26.2	
Wet-bulb max	-14.6	16.8	
Wind direction	10	200	°
Wind speed	1.1	3.5	m/s
Clear-sky tau_b	0.348	0.336	
optical depth tau_d	2.435	2.43	

Object

Name: Oslo/Gardermoen_013840 (ASHRAE 2013)
 Description: Data from ASHRAE Fundamentals 2013

Filename View data

NOR_OSLO-GARDERMOEN_013840_IW2.PRN

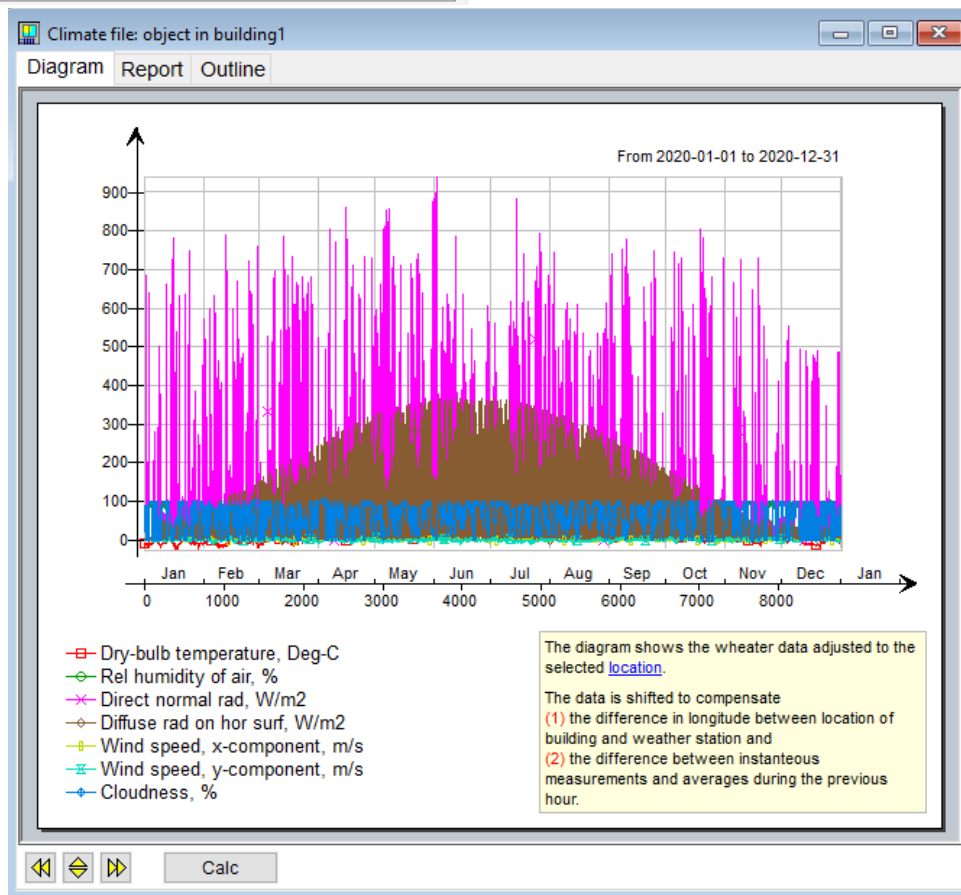
Wind measurement height: 10.0 [m]

Position

Station: OSLO-GARDERMOEN
 Country: Norway
 Latitude: 60.2 N [°] Elevation: 204.0 [m]
 Longitude: 11.083 E [°] Time zone: 1.0 E [h]

Object

Name: NOR_OSLO-GARDERMOEN_013840(IW2)
 Description: ASHRAE IWE2 Weather File for OSLO-GARDERMOEN. (c) 2011 American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, USA. DISCLAIMER OF WARRANTIES: The program developer, ASHRAE, and the distributors of this program and data do



E.2 Cape Town

Location 📍 Cape Town (Int. Airport)_688160 (ASHRAE 2013)

Position

Country:

City:

Latitude: ° Elevation: m

Longitude: ° Time zone: h

Climate description 📄 ZAF_CAPE-TOWN-INTL-AP_688160(IW2)

Design day data

Design data file: User-defined design days

	Winter	Summer	°C
Dry-bulb min	3.8	17.2	
Dry-bulb max	13.4	30.5	
Wet-bulb max	11.5	20.2	
Wind direction	50	180	°
Wind speed	1.1	5.5	m/s
Clear-sky tau_b	0.298	0.351	
optical depth tau_d	2.519	2.622	

Object

Name:

Description:

Filename 📄 View data

Wind measurement height: [m]

Position

Station:

Country:

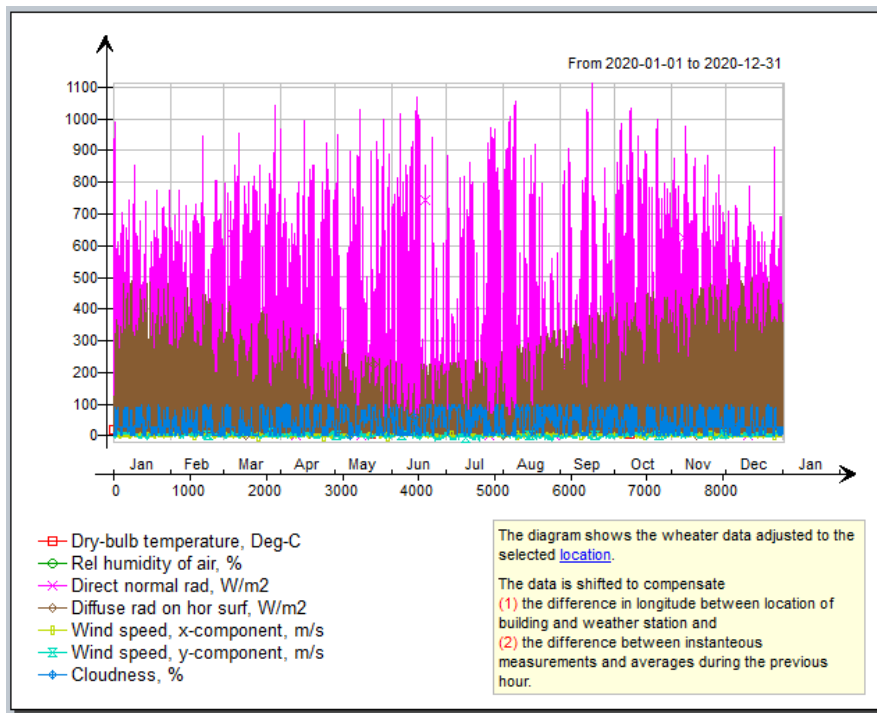
Latitude: [°] Elevation: [m]

Longitude: [°] Time zone: [h]

Object

Name:

Description:



E.3 Singapore

Position

Country:

City:

Latitude: ° Elevation: m

Longitude: ° Time zone: h

Climate description © SGP_SINGAPORE-CHANGI-AP_486980(IW2)

Design day data

Design data file:

	Winter	Summer	
Dry-bulb min	<input type="text" value="23.1"/>	<input type="text" value="26.8"/>	°C
Dry-bulb max	<input type="text" value="28.5"/>	<input type="text" value="33.0"/>	°C
Wet-bulb max	<input type="text" value="25.3"/>	<input type="text" value="26.9"/>	°C
Wind direction	<input type="text" value="290"/>	<input type="text" value="30"/>	°
Wind speed	<input type="text" value="1.9"/>	<input type="text" value="3.9"/>	m/s
Clear-sky tau_b	<input type="text" value="0.472"/>	<input type="text" value="0.434"/>	
optical depth tau_d	<input type="text" value="2.421"/>	<input type="text" value="2.323"/>	

Object

Name: [Singapore/Changi Airport_486980 \(ASHRAE 2013\)](#)

Description:

Filename:

Wind measurement height: [m]

Position

Station:

Country:

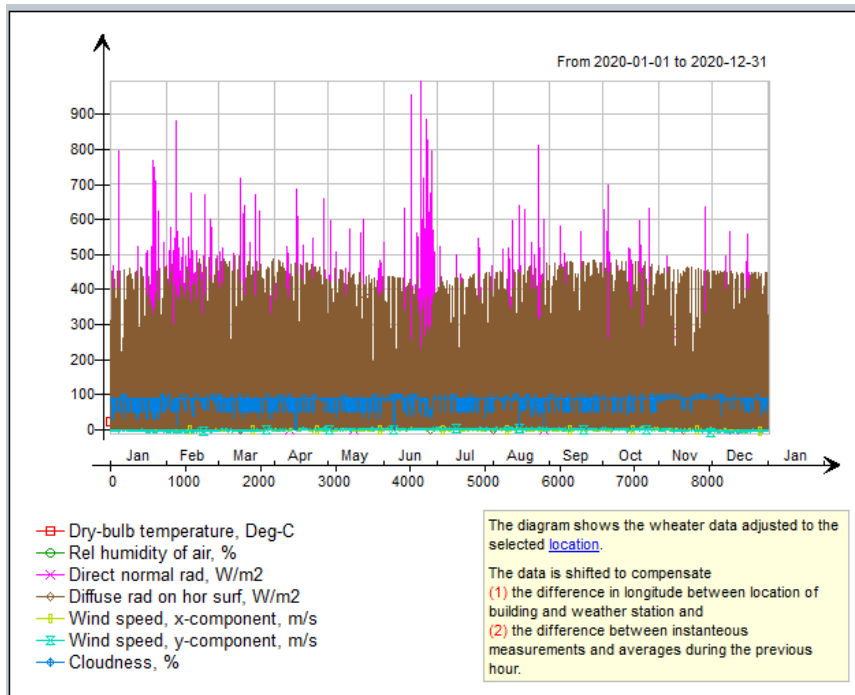
Latitude: [°] Elevation: [m]

Longitude: [°] Time zone: [h]

Object

Name: [SGP_SINGAPORE-CHANGI-AP_486980\(IW2\)](#)

Description:



E.4 Los Angeles

Position

Country: USA
 City: Los Angeles (Int. Airport)
 Latitude: 33.94 N ° Elevation: 99 m
 Longitude: 118.41 W ° Time zone: 8.0 W h

Climate description © USA_CA_Los_Angeles.Intl.AP.722950_TMY3

Design day data

Design data file: ASHRAE 2013\722950.tbl User-defined design days

	Winter	Summer	Unit
Dry-bulb min	7.0	19.3	°C
Dry-bulb max	15.6	26.6	°C
Wet-bulb max	11.5	20.3	°C
Wind direction	80	250	°
Wind speed	2.2	4.0	m/s
Clear-sky tau_b	0.33	0.359	
optical depth tau_d	2.621	2.444	

Object

Name: Los Angeles (Int. Airport)_722950 (ASHRAE 2013)
 Description: Data from ASHRAE Fundamentals 2013

Filename: [View data](#)
 USA_CA_Los_Angeles.Intl.AP.722950_TMY3_EPW.PRN

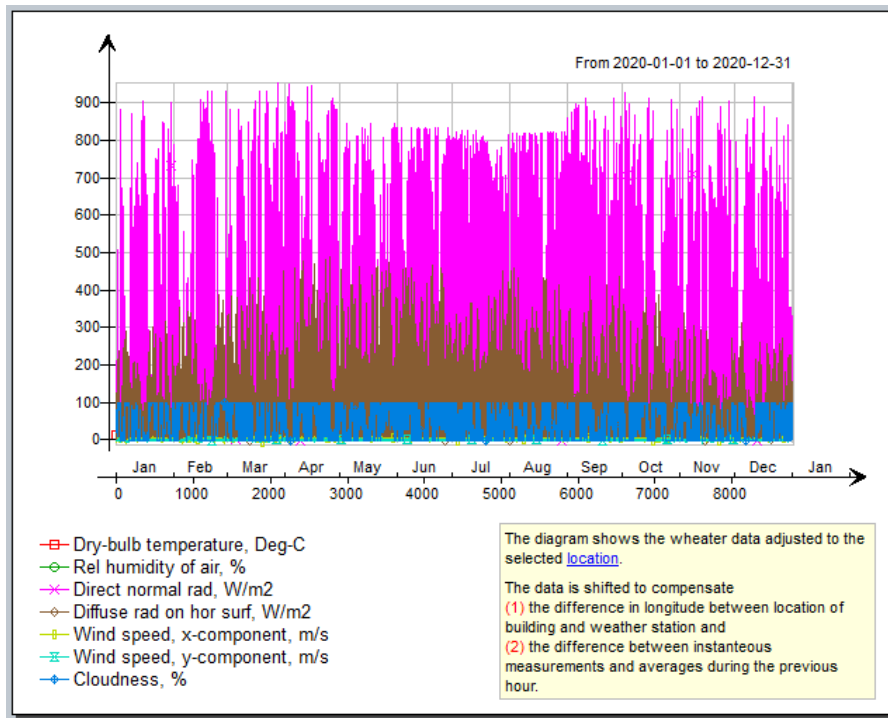
Wind measurement height: 10.0 [m]

Position

Station: Los Angeles Intl Arpt
 Country: United States
 Latitude: 33.93 N [°] Elevation: 30.0 [m]
 Longitude: 118.4 W [°] Time zone: 8.0 W [h]

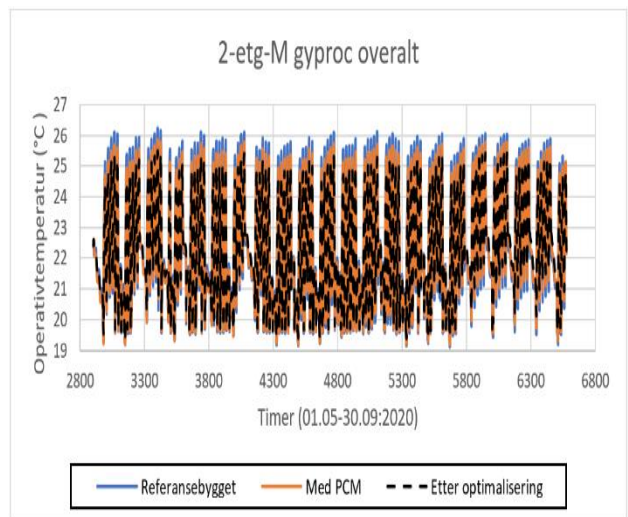
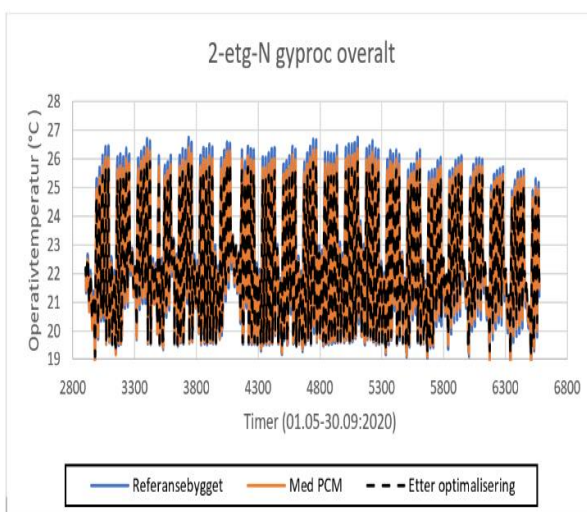
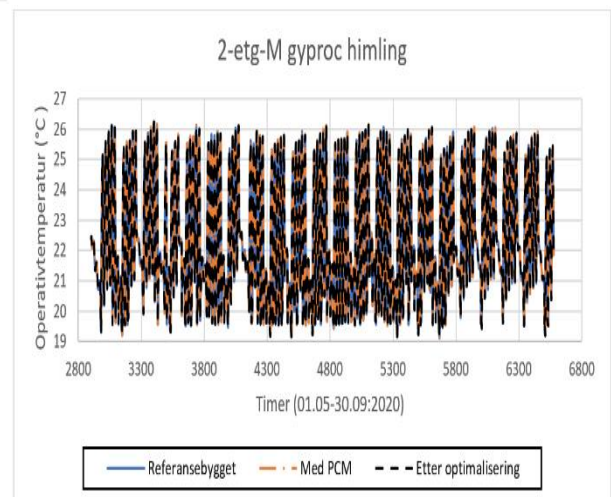
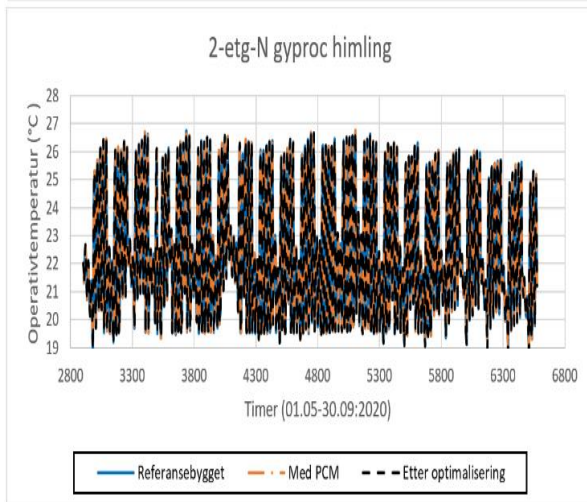
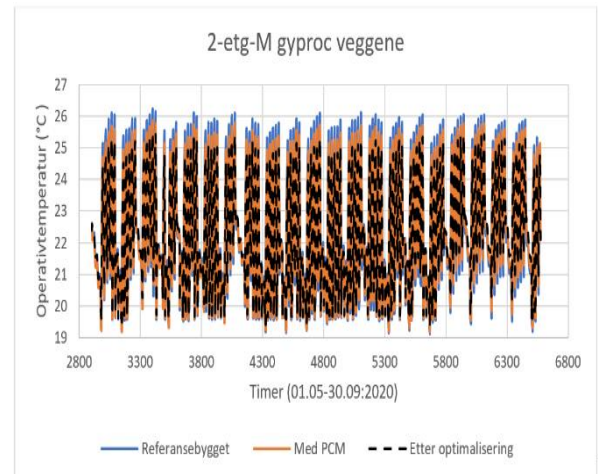
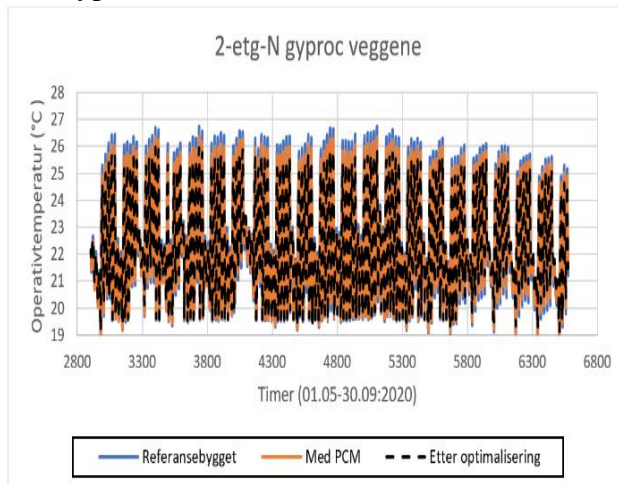
Object

Name: USA_CA_Los_Angeles.Intl.AP.722950_TMY3
 Description:

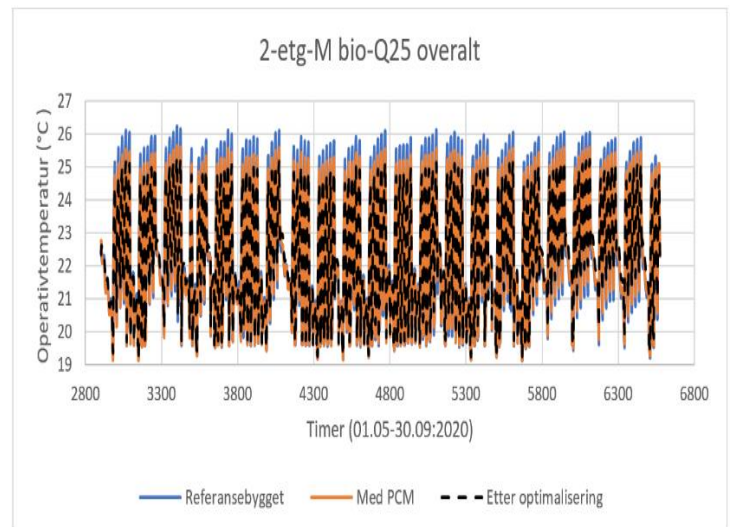
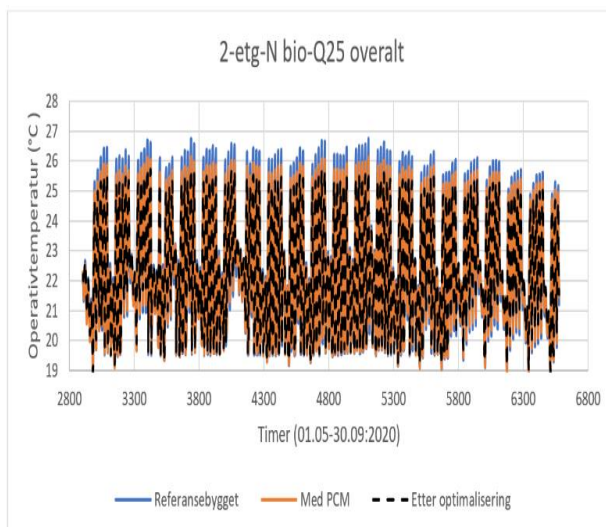
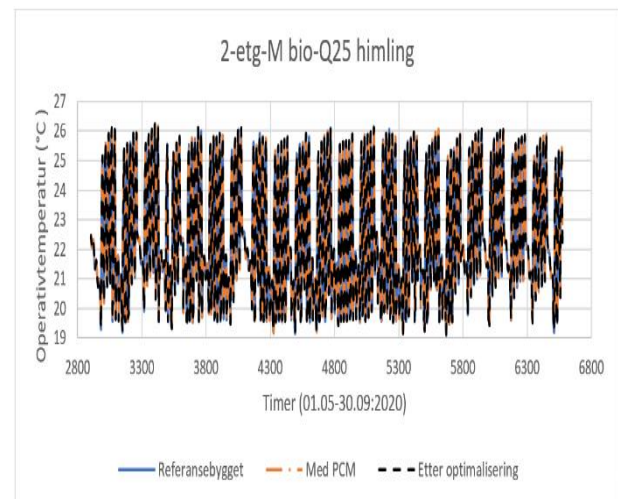
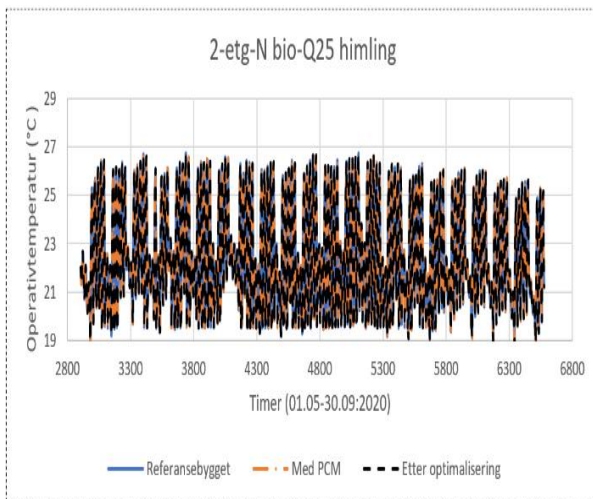
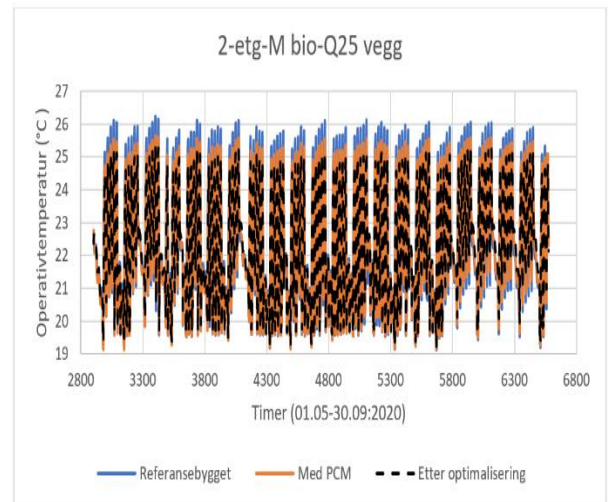
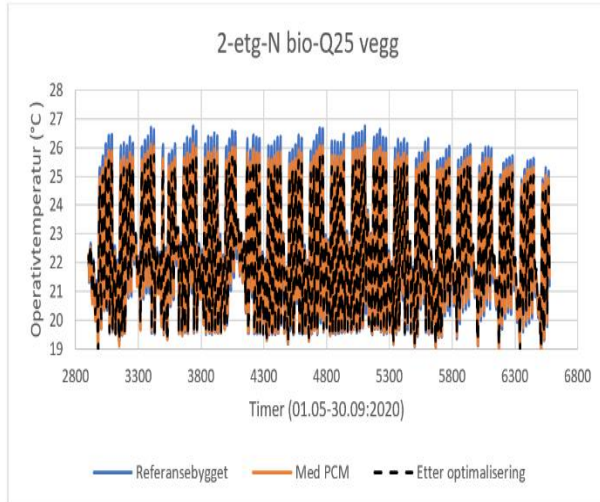


F Simuleringsresultater

F.1 Gyproc



F.2 Bio-Q25



F.3 SP24E

