

*Undersøk den termiske egenskapen til sementmørtel
med PCM ved laboratorietest*

Gatkuoth Bakoak Gatluak

Marwan Ahmed Hassan

Yilham Abduxugur

Bahlbi Sbhat Gaim

Studentoppgave i Bachelor byggingeniør

Veileder: Guomin Ji, Iman Asadi

Mai 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Institutt for konstruksjonsteknikk



NTNU

Kunnskap for en bedre verden

<p>Opgavens tittel:</p> <p>Undersøk den termiske egenskapen til sementmørtel med PCM ved laboratorietest</p>	<p>Dato: 20:05:2022</p> <p>Antall sider: 97</p>	
	<p>Bacheloroppgave</p>	<p>X</p>
<p>Navn:</p> <p>Gatkuoth Bakoak Gatluak, Marwan Ahmed Hassan, Yilham Abduxugur, Bahlbi Sbhat Gaim</p>		
<p>Veileder:</p> <p>Guomin Ji, Iman Asadi</p>		
<p>Sammendrag:</p> <p>Mørtel i konstruksjon er i hovedsak viktige materialer på grunn av sin plastisitet, binding og styrke til konstruksjonene. Formålet er å undersøke mekaniske og termiske egenskaper til mørtel uten og med Phase Change Material (PCM). Med utgangspunkt i bacheloroppgaven, er å undersøke og se endringer i mørteladferd med 0%, 10% og 20% PCM når utsettes for bøye- og trykkbelastninger dersom kravet oppfylles.</p> <p>Termiske egenskaper er relatert til de fysiske egenskapene til materialer. Materialets termiske egenskaper bestemmer hvordan materialer reagerer når utsettes for høy og lav varme. Oppgaven er å finne ut forskjellen som oppstår når PCM tilsettes mørtlene. Måle er å se sammenhengen mellom termisk ledningsevne, spesifikk varme og termisk diffusivitet.</p> <p>Fysiske og termiske egenskaper kan påvirkes av disse tre faktorene, derfor tester utføres i laboratoriet for vannabsorpsjon, tørr tetthet og porøsitet. Bøyestyrke, trykkfasthet, vannopptak og tørrdensitet utføres ved Mustad lab i henhold til NS-EN standard. Termiske egenskaper og porøsitet gjøres i NTNU-laboratorier og bruker TPS- og CT-skanning. Etter at alle testene er fullført, samles parameterne og dataene på alle prøvene inn og sammenlignes.</p> <p>Denne forskningen er utført for å vurdere de termiske egenskapene til sement mørtler med forskjellige sement-til-sand-forhold (C/S) uten PCM og med 10 % og 20 % PCM innhold. Termisk ledningsevne, varmekapasitet og termisk diffusivitet er viktige faktorer når man vurderer den absorberte eller overførte varmeenergien. I henhold til C 270-03b standarden er trykkfasthetskravet at prøvene må overstige 17,2 MPa, dette er utgangspunktet for å avgjøre hvilke mørtler som gir best resultat og er mer effektive. Og å se oppførselen og endringene av de termiske og mekaniske egenskapene til PCM-mørtel, når den er i fast og flytende form.</p>		

Stikkord:

Sementmørtel
Faseendringsmaterialer (PCM)
Termisk ledningsevne
Varmekapasitet
Termisk diffusivitet

Gatkuoth Bakoak

Marwan Heri

Yilham Abdugur

Bahlbi Sbat

Førord

Denne bacheloroppgaven er så lærerik at vi gikk gjennom teoridelen og praksisdelen, og lærte å jobbe med ulike LAB-teknikker og studenter. Der utførte vi mange tester for bøyefasthet, trykkfasthet, vannabsorpsjon, tetthet, porøsitet og termiske egenskaper. Det betyr at vi har lært mye om de fysiske, kjemiske og termiske egenskapene til sement, sand, PCM og mørtel.

Gjennom denne bacheloroppgaven har vi lært at det å være tålmodig, samarbeidsvillig, forståelsesfull og god kommunikasjon er nøkkelen til suksess som et team.

Som studenter ved NTNU har universitetet gitt oss alle muligheter og tilgang til laboratorier. Med nærhet og positivt samarbeid med Mustad står alle dører åpne for oss, vi TAKK for dette. BYGGLAB på Mustad og NTNUs laboratorier S og B tilgjengelig når vi trenger å bruke dem.

Vi setter oppriktig pris på din veiledning og hjelp gjennom denne tiden, og igjen vi er fornøyde av Guomin Ji og Iman Asadi. Ikke minst takker vi Pål Erik Endrerud og Tor Kristoffer Klethagen, Deres støtte og hjelp har vært avgjørende for at vi har nådd våre faglige mål, og det er vi takknemlige for.

Abstract (Engelsh)

Mortar in construction is mainly important materials due to its plasticity, binding and strength to the constructions. The purpose is to investigate the mechanical and thermal properties of mortar without and with PCM. Based on the bachelor thesis, is to examine and see changes in mortar behavior with 0%, 10% and 20% PCM when exposed to bending and pressure loads if the requirement is met.

Thermal properties are related to the physical properties of materials. The thermal properties of the material determine how materials react when exposed to high and low heat. The task is to find out the difference that occurs when PCM is added to the mortars. Measurement is to see the relationship between thermal conductivity, specific heat and thermal diffusivity.

Physical and thermal properties can be affected by these three factors, therefore tests are performed in the laboratory for water absorption, dry density and porosity. Bending strength, compressive strength, water absorption and dry density are performed at Mustad lab in accordance with NS-EN standard. Thermal properties and porosity are done in NTNU laboratories and use TPS and CT scanning. After all the tests have been completed, the parameters and data on all the samples are collected and compared.

This research was conducted to evaluate the thermal properties of cement mortars with different cement-to-sand ratios (C / S) without PCM and with 10% and 20% PCM content. Thermal conductivity, heat capacity and thermal diffusivity are important factors when considering the absorbed or transferred heat energy. According to the C 270-03b standard, the compressive strength requirement is that the samples must exceed 17.2 MPa, this is the starting point for deciding which mortars give the best results and are more efficient. And to see the behavior and changes of the thermal and mechanical properties of PCM mortar, when in solid and liquid form.

Innholdsfortegnelse

Forord.....	i
Abstract (Engelsh)	ii
Figurliste	vi
Tabbeliste	viii
Forkortelser	ix
Enheter	x
Kjemiske formler	xi
Symboler:	xii
1 Innledning	1
1.1 Hensikt.....	1
1.2 Avgrensning.....	3
1.3 Problemstilling.....	3
1.4 Miljøperspektiv.....	4
1.5 Valg av metoder	6
2 Teori	8
2.1 Bakgrunn	8
2.2 Fase change material (PCM)	8
2.3 Egenskaper av faseendringmaterialer (PCM)	10
2.4 Klassifisering av PCM	11
2.4.1 Organisk PCM.....	11
2.4.2 Paraffiner	11
2.4.3 Ikke Paraffiner.....	12
2.4.4 Uorganiske PCM	12
2.5 Sementmørtel.....	12
2.6 V/C-tall.....	13
2.7 Fasthet.....	13
2.7.1 Fasthetsklasse	13
3 Materialer	15
3.1 Sement	15
3.2 Sand.....	17
3.4 Vann.....	17
3.5 PCM	18
3.6 Anskaffelse av materialer til litteraturstudie	18
3.7 Testoversikt	19
4 Proporsjoner sementmørtel	20

5 Tester	23
5.1 Flow table test	23
5.2 Bøyefasthet	26
5.3 Trykktest	28
5.4 Termisk ledningsevne, termisk diffusivitet og spesifikk varmekapasitet	31
5.5 Vannabsorpsjon	36
5.6 Densitet	37
5.7 Porøsitet (CT-skanning)	39
6 Resultater	42
6.1 Flow table test resultater	42
6.2 Bøyefasthet resultater	42
6.3 Trykkfasthet resultater	43
6.4 Termisk konduktivitet, spesifikk varmekapasitet og diffusivitet resultater	43
6.5 Vannabsorpsjon resultater	44
6.6 Densitet resultater	45
6.7 Porøsitet resultater	45
7 Diskusjon og drøft	47
7.1 Flow table test analyse	47
7.2 Bøyefasthet test analyse	47
7.3 Trykkfasthet test analyse	48
7.4 Termisk konduktivitet, spesifikk varmekapasitet og diffusivitet analyser	49
7.5 Vannabsorpsjon test analyse	50
7.6 Tørr densitet test analyse	51
7.7 Porøsitet test analyse	52
7.8 Sammenheng mellom termiske og fysiske/ mekaniske egenskaper til mørtlene	53
7.8.1 Bøyefasthet og trykkfasthet	53
7.8.2 Densitet	54
7.8.3 Vannabsorpsjon og Porøsitet	54
7.8.4 Forholdet mellom tetthet og porøsitet	55
7.8.5 Forholdet vannabsorpsjon og porøsitet	56
7.8.6 Forholdet mellom Trykkfasthet og porøsitet	57
7.8.7 Forholdet mellom porøsitet og termisk konduktivitet	57
7.8.8 Forholdet porøsitet, Trykkfasthet og termisk konduktivitet	58
8 Konklusjon	59
9 Litteraturliste	61
10 Vedlegg	63

Vedlegg 1-Tabeller for Proporsjoner fersk mørtel	63
Vedlegg 2 -Resultater av bøyefasthet og trykkefasthet i MPa.....	64
Vedlegg 3-Tallene viser resultater av termiske konduktivitet, spesifikt heat kapasitet og diffusivitet.	67
Vedlegg 4-Vannabsorpsjon, Densitet og porøsitet -CT-skanning.....	70
Vedlegg 5 -Teknisk datablad.....	78

Figurliste

Figur 1-Bruk av PCM i bygning (Sustainability: A comprehensive Foundation).....	10
Figur 2- Klassifisering av PCM (Jan Kosny,2015)	11
Figur 3-Mekaniske og fysiske krav gitt som karakteristiske verdier (Maage,2015 b)	14
Figur 4-Viser Trykkfasthetaklasse for normalbetong og tungbetong (Normann, 2003).	14
Figur 5-Sement brukt i mørtelblanding. Foto: Marwan Heri	15
Figur 6-De fire hovedmineralene i portlandsement (Maage,2015 b).	16
Figur 7-Kjemisk sammensetning (Maage,2015 b).	17
Figur 8-Sand brukt i mørtelblanding. Foto: Bahlbi Sbhat.	17
Figur 9-PCM-pulver brukt i mørtelblanding. Foto: Marwan Heri	18
Figur 10-Hastigheter på mikserblad (NS-EN 196-1:2016).	21
Figur 11-viser blandemaskin for mørtel. Foto: Yilham Abduxugu.....	22
Figur 12-Flow table test. Foto: Marwan Heri.....	24
Figur 13- Ferske mørtelprøver. Foto: Yilham Abduxugur.	24
Figur 14-Oven og badebasseng. Foto: Marwan Heri.	25
Figur 15-Stykker tatt ut av oven før testing-Foto: Gatkuoth.....	25
Figur 16- bøyestrekfasthet test (NS-EN 196-1:2016).	27
Figur 17- bøyestrekfasthet test-Foto: Marwan Heri.	27
Figur 18- Bøyefasthet test observasjon- Foto: Marwan Heri.	28
Figur 19-Trykkfasthet test-Foto: Yilham Abduxugur.	30
Figur 20- Trykkfasthet test observasjon- Foto: Yilham Abduxugur.	30
Figur 21-Viser bruddformer i sementmørtel- Marwan Heri.....	31
Figur 22- Hot Disk maskinen test-Foto: Bahlbi Sbhat.	32
Figur 23-Viser oven- Foto: Bahlbi Sbhat.	33
Figur 24-Viser (TPS) metode-Foto: Bahlbi Sbhat.....	34
Figur 25-Densitet test-Foto: Yilham.	39
Figur 26-Motode CT-skanner for å lage et 3D-bilde-Foto:.....	40
Figur 27-CT-skanning-Foto: Yilham	41
Figur 28-CT-skanning resultat etter 27 dager.	46
Figur 29-Flow table test analyse.	47
Figur 30-Bøyefasthet test resultater.....	48
Figur 31-Trykktest resultater for mørtel.....	48
Figur 32- Resultater av vannabsorpsjon	51
Figur 33- Resultater av densitet.....	52
Figur 34-Porøsitet test analyse	52
Figur 36-Forholdet mellom tetthet og porøsitet	56
Figur 37-Forholdet mellom vannabsorpsjon og porøsitet.	56
Figur 38-Termiske egenskaper resultater 0%PCM med 21 °C.....	67
Figur 39-Termiske egenskaper resultater 10%PCM med 21 °C.	68
Figur 40-Termiske egenskaper resultater 20%PCM med 21 °C.	68
Figur 41-Termiske egenskaper resultater 10%PCM med 27 °C.	69
Figur 42-Termiske egenskaper resultater 20%PCM med 27 °C.	69

Figur 43-Produktdatablad for sement-Norcem.....	78
Figur 44-produktdatablad for PCM-microtek.	79
Figur 45-produktdatablad for PCM-microtek.	80
Figur 46-produktdatablad for PCM-microtek.	81
Figur 47-produktdatablad for PCM-microtek, Micronal 24D.....	82

Tabbeliste

Tabell 1-Fordeler og ulemper av organiske og uorganiske PCM.....	12
Tabell 2-Oversikt over materialer i resepten.	18
Tabell 3- Mengde av tilsatt delmaterialer med PCM.	21
Tabell 4-Hot Disk TPS 2500 S-modellen ble brukt til eksperimentet.....	32
Tabell 5-Under viser at proporsjonene for alle blandinger sammenlignes med C/S, PCM og V/C- forhold.	42
Tabell 6-Viser resultater av bøyefasthet i MPa (Gjennomsnitt).....	43
Tabell 7-Viser resultater av trykkfastheten i MPa (Gjennomsnitt).	43
Tabell 8- Viser resultater av termisk konduktivitet (W/mK) (Gjennomsnitt).....	44
Tabell 9-Viser resultater av varmekapasiteten i (kJ/kg. K) (Gjennomsnitt).....	44
Tabell 10-Viser resultater av termisk diffusivitet i (mm ² /s) (Gjennomsnitt).....	44
Tabell 11-Viser Resultater av Vannabsorpsjon i prosent (%) (Gjennomsnitt).....	45
Tabell 12-Viser Tørrtetthet Resultater (Gjennomsnitt)	45
Tabell 13-Viser om porøsiteten av prøvene.	46
Tabell 14-Resultater av termisk konduktivitet (W/mK) (Gjennomsnitt).	49
Tabell 15-Resultater av varmekapasiteten i (kJ/kg. K) (Gjennomsnitt).....	50
Tabell 16-Resultater av termisk diffusivitet i (m ² /s) (Gjennomsnitt)	50
Tabell 17-Bøyefasthet og trykkfasthet resultater sammenhengen med termiske egenskaper.	53
Tabell 18-Tetthet resultater sammenhengen med de termiske egenskapene.....	54
Tabell 19-Vannabsorpsjon og porøsitet resultater sammenhengen med de termiske egenskapene.	55
Tabell 20--Forhold mellom trykkfasthet og porøsitet	57
Tabell 21-Forholdet mellom porøsitet og termisk konduktivitet.....	58
Tabell 22-Forholdet porøsitet, Trykkfasthet og termisk konduktivitet	58
Tabell 23-Mengde av tilsatt delmaterialer-0%PCM.....	63
Tabell 24-Mengde av tilsatt delmaterialer-10%PCM.....	63
Tabell 25-Mengde av tilsatt delmaterialer-20%PCM.....	64
Tabell 26-Bøyefasthet resultater sementmørtel 0% PCM.	64
Tabell 27-Bøyefasthet resultater sementmørtel 10% PCM.	65
Tabell 28-Bøyefasthet resultater sementmørtel 20% PCM.	65
Tabell 29-Trykkfasthet resultater sementmørtel 0% PCM.....	66
Tabell 30-het resultater sementmørtel 10% PCM.	66
Tabell 31-Trykkfasthet resultater sementmørtel 20% PCM.....	67
Tabell 32-Resultater av termisk diffusivitet.	70
Tabell 33- Vannabsorpsjon resultater sementmørtel 0% PCM.	70
Tabell 34-Vannabsorpsjon resultater sementmørtel 10% PCM.	71
Tabell 35-Vannabsorpsjon resultater sementmørtel 20% PCM.	71
Tabell 36-Densitets resultater med 0% PCM.	72
Tabell 37-Densitets resultater med 10% PCM.	72
Tabell 38- Densitets resultater med 20%PCM.	73
Tabell 39-Densitets resultater med 0%PCM.	73
Tabell 40-Densitets resultater med 10%PCM	73
Tabell 41-Tabell 36: Densitet resultater sementmørtel 20% PCM.....	73
Tabell 42-Visualisering av lufthullfordelingen basert på volum i forskjellige prøver	74

Forkortelser

PCM	Phase change materials
TPS	Transient plane Source
SHC	Specific heat capacity
SEM	Scanning electron microscope
V	Vann
CEM/C	Cement
NS-EN	Norsk -og Europeisk standard

Enheter

Areal	mm^2
Lengde	mm
Bredde	mm
Volum	m^3
Masse	kg
Densitet	kg/m^3
Trykk	Mpa
Termisk konduktivitet	W/mk
Varmekapasitet	J/K
Termisk diffusivitet	mm^2/s
Fasthet	kN
Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
Tiden	s

Kjemiske formler

CO_2	Karbondioksid
C_2S	Dikalsiumsilikat
C_3S	Trikalsiumsilikat
C_3A	Trikalsiumaluminat
C_4AF	Tetrakalsiumaluminatferritt
SiO_2	Silisiumoksid
Al_2O_3	Aluminiumsoksid
Fe_2O_3	Jernoksid
CaO	Kalsiumoksid
MgO	Magnesiukoksid
SO_3	Svoveloksid
$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	Kalium- og natriumoksid

Symboler:

α	er den termiske diffusiviteten (mm²/s)
K	er den termiske ledningsevnen i (W/mk)
C_p	er den spesifikke varme (MJ/m³k)
SHC	er den spesifikke varmekapasitet (kJ/kg. K)
$m_{s, sat}$	er massen av det mettede prøvelegemet av herdnet mørtel, i kilogram (kg)
$m_{s,i}$	er den tilsynelatende massen av det mettede prøvelegemet av mørtel neddykket i vann, kilogram (kg)
$m_{s, dry}$	er den ovnstørkede massen av prøvelegemet av herdnet mørtel, i kilogram (kg)
	er vanntettheten i kilogram per kubikkmeter (kg/m³)
V_s	er volumet til prøvelegemet herdnet mørtel, i kubikkmeter (m³)
ρ	er densitet i kilogram per kubikkmeter (kg/m³)
R_c	er trykkfasthet i (MPa)
F_c	er maksimal belastning ved brudd i (N)
F_f	er belastningen som påføres midten av prismet ved brudd i (N)
R_f	er bøyestrekfastheten i (MPa)
b	er siden av den kvadratiske delen av prismet i (mm)
l	er avstanden mellom støttene i (mm)
D	diameter i (mm)
F_{ck}	karakteristiskterningsfasthet
F_{cck}	karakteristisksylinderfasthet
M_1	tørrvekt (g)
M_2	våtvekt (g)
R^2	Forhold koeffisient

1 Innledning

1.1 Hensikt

Den økende etterspørselen etter bærekraftig energi fra forbrukere og industri er i konstant endring. Den høyeste etterspørselen etter energiforbruk i løpet av en enkelt dag gir et kontinuerlig og uløst problem: hvordan opprettholde en konsistent ønsket temperatur på en bærekraftig måte. Perioder med ekstremt kaldt eller varmt vær er de utløsende faktorene for å øke behovet for oppvarming eller kjøling. Arbeidstid, industriprosesser, bygningskonstruksjon, driftspolicyer og type og volum av energi-produksjonsanlegg er noen av hovedårsakene til etterspørselskriser. Bedre kraftproduksjonsstyring og betydelig økonomisk fordel kan oppnås hvis noe av topplasten kan flyttes til lavbelastningsperioden. Dette kan oppnås ved termisk lagring for rom-oppvarming og kjøling.

Termisk energi kan lagres som en endring i den indre energien til visse materialer som sensibel varme, latent varme eller begge deler. Den mest brukte metoden for lagring av termisk energi er den fornuftige varmemetoden, selv om faseendringsmaterialer (PCM), som effektivt lagrer og frigjør latent varmeenergi, har blitt studert i mer enn 30 år. Latent varmelagring kan være mer effektivt enn fornuftig varmelagring fordi det krever en mindre temperaturforskjell mellom lagrings- og frigjøringsfunksjonene. Faseendringsmaterialer er et viktig og lite brukt alternativ for å utvikle nye energilagringssystemer, som er like viktige som å utvikle nye kilder til fornybar energi. Bruken av faseendringsmateriale i utvikling og konstruksjon av bærekraftige energisystemer er avgjørende for effektiviteten til disse systemene på grunn av PCMs evne til å utnytte varme- og kjøleenergi på en effektiv og bærekraftig måte.

Foreløpig er vendepunktet nådd, hvor vi kan prøve å søke andre løsninger og bruke vår innovasjon til å lage nye metoder for å hjelpe med å redusere energiforbruket i hjemmene. Plikten er å tilbake stille tankene våre til å bruke ren og miljøvennlig energi i de kommende årene for å oppfylle FN's krav. Målet om å rette seg mot byggebransjen vil være det første skrittet mot bærekraft og å finne opp nye materialer som bruker mindre energi i konstruksjonen er avgjørende.

Værforholdene her i Skandinavia kan være tøffe, selv om folk er vant til å håndtere det, er behovet for energi til å varme opp hjemmene deres en prioritet. Som vi erkjenner at mesteparten av energien går til å holde interiøret i hjemmene varmt mesteparten av tiden. Den

siste tiden i Norge og det meste av Europa har prisen på strøm per kilowatt økt kraftig og ekstremt, selv politikere sliter med å finne en passende løsning som kan være rettferdig overfor folk å varme opp boligene sine rimelig. Hvis vi kunne komme opp med det perfekte byggematerialet som kunne ha den rette balansen for å observere, spare og frigjøre varme ved behov, kan det være løsningen for mange mennesker både økonomisk og redusere CO₂-utslippene til atmosfæren vår også.

I dette tilfellet blir forskere i byggebransjen nå utfordret til å utvikle et bærekraftig materiale med lav varmeledningsevne som tåler kompresjon og påkjenninger under ekstreme værforhold

Hensikten med denne oppgaven bidrar til en vitenskapelig innsikt til egenskaper av sementmørtel laget av faseendringsmateriale (PCM) i samarbeid med NTNU.

Varmelagring har vært brukt, ikke tiltenkt, siden mennesker begynte å lage hus av stein og tre. I dagens samfunn brukes gjerne betong som termisk masse tiltenkt for å utnytte varmelagringsevner til betong. Når det gjelder varmelagring finnes det mange alternativer både aktive og passive løsninger. En av flere passive løsninger er PCM, disse materialene vil i faseendring utnytte latent varme for en bedre utjevning av temperatur.

Når det gjelder betong har dette materialet en god evne til å holde på varme, og vil til en viss grad oppføre seg som et batteri som akkumulerer varme for så å gi det tilbake til omgivelser når temperaturen blir lav nok. Vil nytten til PCM være like framtreddende med høy nok termisk masse, vil PCM gi en tilleggende effekt som fører til en mer samspillende virkning mellom materialene og hvilke material posisjon gir best ønsket virkning over en dag. Dette er noen av spørsmålene som er relevant og framhevet i henhold til denne oppgaven.

I denne oppgaven blir det nøyere inspisert hvilke fordeler rom utformet med betong har, med og uten forskjellige PCM utforminger. Ved siden av eksperimenter skal det også utføres simuleringer i tråd med eksperimentene.

1.2 Avgrensning

I denne bachelor oppgaven undersøkes, prøvemørtelens mekaniske og termiske egenskaper som tilfredsstillende de kravene iht. NS EN-196-1 og NS EN-1015-10. følgende avgrensinger er gjort for å kunne løse denne oppgaven.

- Det er valgt å avgrense bachelor oppgaven ved å velge tre forskjellige resepter ved proporsjonering som er uten PCM, 10% PCM og 20% PCM.
- Ved proporsjonering blir brukt fire forskjellige blandingsmåter for sement sand forhold som er 1:2, 1:3, 1:4, 1:5
- Ved densitet test blir det avgrenset med en mørtel for hver blanding, total er det 12 stykker.

1.3 Problemstilling

Denne oppgaven inkluderer eksperimentell forskning på de termiske egenskapene til sementmørtel som består av faseendringsmaterialet (PCM), vi prøver å finne en god mørteloppskrift. Hensikten med oppskriften er å finne både de termiske egenskaper, bøyefasthet, trykkfasthet, vannabsorpsjon, densitet og porøsitet til sementmørtelen. Så problemstillingen kan formuleres som følger:

«Undersøk den termiske egenskapen til sementmørtel med PCM ved laboratorietest» hvordan kan vi oppnå den mest effektive energilagringen/besparelsen ved å bruke PCM-materialer vi blander med sementmørtel, dette er vårt sentrale problem.

1.4 Miljøperspektiv

Økningen i energiavhengighet med utviklingen av teknologi har ført med seg den økende miljødeleggelsen og faren for utarming av naturressurser. For å bekjempe disse problemene er det startet et internasjonalt rammeverk, spesielt siden Kyoto-protokollen fra 1997. I denne retningen har virksomheter blitt pålagt sosialt og miljømessig ansvar. Siden det forårsaker høyt energiforbruk i verden, er bedrifter i byggesektoren blant foretakene som påtar seg dette ansvaret.

Økende forbruk av ikke-fornybare ressurser, gjør det vanskelig for å overføre ressursene til neste generasjoner, dette fører til at i byggesektoren er det nødvendig med nye strategier for å legge nye planer. Disse nye strategier under paraplyen bærekraftig bygg sektoren, begynte å finne sted for seg selv ved prosjektering. Et prosjekt, for å være 100% bærekraftig når det gjelder planlegging, bygging og riving, trenger det rimelig budsjett, tilgjengelig og miljøbevisst sammenvevd og forenlig med økonomiske, sosiale og miljømessig (Kibert,1994) (Wyatt,1994). Bærekraftig som et resultat av forskning på konstruksjon, klassisk design og mens hovedproblemstillingene som produksjonen er basert på er kostnader, tid og kvalitet. Bærekraftig design og konstruksjon også inkludert samt ressurs uttømming og miljøforringelse, spørsmålene om å skape et miljø blant målene (Kibert, 1994).

Til tross for alle miljøproblemene bygg bransjen forårsaker, miljømessig, økonomiske og sosiale livet, ble sektoren uunnværlig og for å sikre utvikling av sektoren i harmoni med naturen, ført til fremveksten av nye ideer. Samlede ideer som er under paraplyen av konseptet bærekraftig konstruksjon, blir i utgangspunktet, tatt i betraktning av kostnadsøkningen, bruk av fornybar og materialer som trenger mindre energibruk, kan nås minkende ressursbruk og mindre avfall ved bygging.

Ettersom etterspørselen vokser i utviklingsland, bruker vi ressursene våre på etterspørsel. Miljøet, samfunnet og sted vi lever i er svært viktig ved bruk av ressursene. Mennesker trenger bosted, oppvarming og forbruk i miljøet de lever i og reduserer det ved å bruke eksisterende ressurser, og som et resultat skaper det avfall. Det er utfordrende for oss å skape bærekraftig og levelige områder ved å bevare de eksisterende og overlate sunne levekår til fremtidige generasjoner. I tillegg er det nødvendig med et system for å regenerere de resulterende restene. Så lenge verden eksisterer og livet forsetter, må vi beskytte uuttømmelige ressurser, prøve å skape gjenbrukbart. Dette trenger vi for å gjøre miljøet vi lever i permanent og levelig, og for å overlate et bærekraftig liv til fremtidige generasjoner.

Grunnloven § 112 – et fyrtårn for «det grønne skiftet»; Tydeligere innhold, moderne språkdrakt: Grunnlovens bestemmelse om beskyttelse av miljøet kan bli et effektivt virkemiddel i miljøkampen. Grunnloven § 110 b, vedtatt av Stortinget i 1992, er en forpliktende rettsregel som beskytter miljøet, er på nytt bekreftet av Stortinget i vedtagelsen av en ny § 112 nå i mai dette år. Stortinget bygger her på forslagene fra Stortingets menneskerettighetsutvalg som forberedte arbeidet med modernisering av Grunnloven. I sin rapport Dokument 16 (2011-2012) gjennomgikk utvalget forarbeidene til Grunnlovens § 110 b og slo fast at Stortinget i 1992 – da bestemmelsen ble vedtatt – også betraktet beskyttelsen av miljøet som en menneskerettighet. Utvalget sammenfatter utviklingen slik (s. 243):

«Det må trolig legges til grunn at Stortinget under sin behandling av Grunnloven § 110 b anså beskyttelse av miljøet som en menneskerettighet. Det fremgår blant annet av henvisningen til Stockholmserklæringen og forslaget fra Verdenskommisjonen for miljø og utvikling at bestemmelsen har menneskerettslig karakter. Verdenskommisjonen brukte begrepet «menneskerett» om sine forslag. Under «Grunnleggende menneskerettigheter» i punkt 1 heter det: «Alle mennesker har en grunnleggende rett til et miljø som er tilstrekkelig for helse og trivsel», mens det under punkt 2 samme sted heter: «Statene skal bevare og bruke miljøet og naturressursene til beste for nålevende og fremtidige generasjoner.»

Det er stor interesse for å spare energi og for bruk av fornybar energi. PCM gir et underbrukt alternativ for å utvikle nye energilagringseenheter for å minimere drivhus-effekter. Den opererer ved konstant temperatur; ettersom varme tilføres materialet, forblir temperaturen stabil, men varmen driver endringen til en høyere energifase. En PCM lagrer varme i form av latent fusjonsvarme som er omtrent 100 ganger mer enn den fornuftige varmen. Fordi PCM er et materiale som absorberer eller frigjør energi på en miljøvennlig måte, men produksjonsprosessene av sement og dens bidrar enormt til klimagassutslippene av CO₂. I 2016 var den totale sementproduksjonen på cirka 4,2 millioner tonn (Norcem, 2020). Effektive miljømessige løsninger er etablert som tiltak for å redusere mengde av CO₂ utslipp produsert. Ett av de tiltakene er at Norge har inngått en avtale i den internasjonale Paris-avtalen. Formålet med avtalen er å forplikte seg til å redusere utslippene av klimagasser med cirka 50 prosent i løpe av i 2030 (Miljødirektoratet, 2020). Dette speiler klimamål 13 i FNs bærekraftsmål som omhandler det å stoppe klimaendringene (FN-SAMBANDET, 2020).

1.5 Valg av metoder

I denne oppgaven begynner med å blande mørtler i henhold til norske standarden NS-EN 1996-1, 2016, der v/s-forholdet er avhengig av sement-sand-forholdet, det sement-sand-forhold som er brukt i oppgaven er fra M1:2, til M1:5. I henhold til norske standarden NS-EN 1015-3:1999+A1 blir det evaluert ferske mørtelprøver. Den avkuttete kjeglen blir fylt med fersk mørtel i tre lag, deretter blir formen løftet bort og 25 ganger slag blir påført bordet i løpet av 15 sekunder. Til slutt er endringene i mørteldiameter målt i tre retninger.

Så videre i henhold til norske standarden NS-EN 1996-1, brukes det 40mmx40mmx160mm formen til å lage mørtlene, på hver forskalling kan det lages tre mørtler, så totalt er det laget 108 mørtler for hele prosjektet.

Etter at alle prøvene er laget, legg mørtlene i 24 timer for å holde prismeformet fast. Dag etter blir prøvene neddykket i vannbasseng for 28 dager ved en temperatur på 20 ± 1 °C. Etter 28 dager setter mørtlene i oven for 24 timer ved 105°C for å fjerne fuktighet. Mørtlene blir deretter brukt til å undersøke bøyestyrke, trykkfasthet, varmeledningsevne, CT-skanner (porøsitet), vannabsorpsjon og tetthet. Bøyestyrke og trykkfasthet - følger norsk standard «NS-EN 196-1: 2016. sementtesting -Del 1: fastsettelse av styrke». Bøye til mørtelen utføres på bøyestyrkemaskinen som har en belastningskapasitet på 10 kN med en nøyaktighet på $\pm 1,0$ % og en belastningshastighet på (50 ± 10) N/s, slik at alle data blir registrert. Beregningsformel for bøyestrekfasthet følger NS-EN 196-1: 2016 avsnitt (9.1).

Testmaskin for å bestemme trykkfasthet brukes til å måle trykkfastheten til mørtlene. I henhold til NS-EN ISO 7500-1 har maskinen en nøyaktighet på $\pm 1,0$ % og en last økning på (2.400 ± 200) N/s. Videre til NS-EN 196-1: 2016 avsnitt (9.1) beregner trykkfasthet.

Videre utføres vannabsorpsjonstesten av mørtlene, prøvene plasseres i ovnen i 24 timer ved 105 °C. Mørtlene avkjøles til romtemperatur, veies og registreres som tørrvekt (M_1), deretter senkes mørtlene i vann i 24 timer igjen, veies og registreres som våtvekt (M_2). Til slutt, ved hjelp av formelen, blir vannabsorpsjonen til mørtlene beregnet.

I henhold til «NS-EN 1015-10 Prøvemethoder for mørtel til murverk Del 10: Bestemmelse av tørrdensitet for herdet mørtel». Mørtelprøvene tørkes i ovnen ved en temperatur på 70 °C ± 5 °C i 24 timer, mørtlene fjernes, veies og registreres som m_s, dry . Så videre senke prøvene i vann i 15 minutter ved en temperatur på 20 °C ± 2 , brukes en fuktig klut for å fjerne overflødig vann,

veis og registreres. Videre fortsetter det samme forsøket inntil det oppnår vektforskjell på mellom 0,1 % -0,2 % og registreres som $m_{s, sat}$.

Den siste delen er å vekte prøvene ved å plassere prismet i en bølge som ligger i vann og henger på en digital vekt, for å finne $m_{s,i}$. I henhold til NS-EN 1015-10 er mørtlenes tørre tettheter funnet.

Termisk ledningsevne, termisk diffusivitet og spesifikk varmekapasitet- en metode som heter Transient Plane Source (TPS) ble brukt som kan teste rask og nøyaktig av termisk ledningsevne, spesifikk varmekapasitet og termisk diffusjon av sementmørtlene. Så hjelp av «hot disk maskin», ble alle dataene registrert. Ved måling av dataene ble det brukt både temperatur som 21 °C og 27 °C til mørtlene og dataene ble registrert. Til slutt ble det brukt en del formler for på finne ut termiske konduktivitet, spesifikk varmen og Termisk diffusivitet.

2 Teori

2.1 Bakgrunn

Bakgrunnen for å starte prosjektet var et oppdrag fra «PhD og Postdoc forskere» forskning gruppen på NTNU ved instituttet for konstruksjonsteknikk om å undersøke på de termiske egenskapene til sementmørtelsom inneholder faseendringsmateriale (PCM).

PCM har potensial til å øke termisk energilagring i bygninger, da den kan lagre en betydelig andel varme under faseendringen. I løpet av dagen absorberer PCM overflødig varme ved å smelte. Varmen frigjøres igjen når temperaturen synker om natten og PCM til å stivne. Ved hjelp av dette egenskapet, skal vi undersøke mørtel som vi lager med og uten PCM materialer, og deres egenskaper, så skal vi sammaligne dem og oppnå potensielle energi lagring og sparing. Oppgaven skal gjennomføres mest på laboratorier som ligger både på skolen (S-bygget, B-bygget) og Mustad (Bygg-lab), for å løse våre problemstillingen.

2.2 Fase change material (PCM)

Det er flere tilnærminger til hvordan man kan utnytte energilagringsevnen i bygningene til energisparing. PCM i bygninger kan brukes i vegger, gulv og tak, eller i andre bygningskomponenter som skodder, vinduer samt i varme- og kuldelager. For det er viktig at passiv solenergi brukes til oppvarming i den kalde delen av året. En rekke studier tar for seg integrering av bygningsenergilagring, som bruk av PCM i bygninger eller fjernvarme [3].

Stoffer som endrer fase i et visst temperaturområde og kan lagre latent varme under denne faseendringshendelsen derfor kalles det (PCM). PCM-er gjennomgår en faseendring (fast-væske) avhengig av temperaturen. Fordi det absorberes varmeenergi fra omgivelsene, så klassifiser det som endotermt materiale. PCM absorberer termisk energi og lagrer den når temperaturen stiger mens den frigjør den lagrede varmeenergien når temperaturen faller i en vis grad. PCM-er kan være temperaturregulering i bygninger fordi den på dagtid absorberer varme og gir den tilbake om natten for eksempel.

PCM er et kompositt materiale som er sammensatt av flere forskjellige materialer, vanligvis for å forsterke en egenskap ved et materiale eller for å kombinere egenskaper til forskjellige materialer. Den produseres som et komposittmateriale for å forbedre minst en av PCM-egenskapene eller for å forbedre varmelagringsevnen til et annet materiale. Det er

forskjellige måter å danne en kompositt ved å sette inn PCM i en matrise av et annet materiale, eller ved å sette inn et annet materiale i PCM [10].

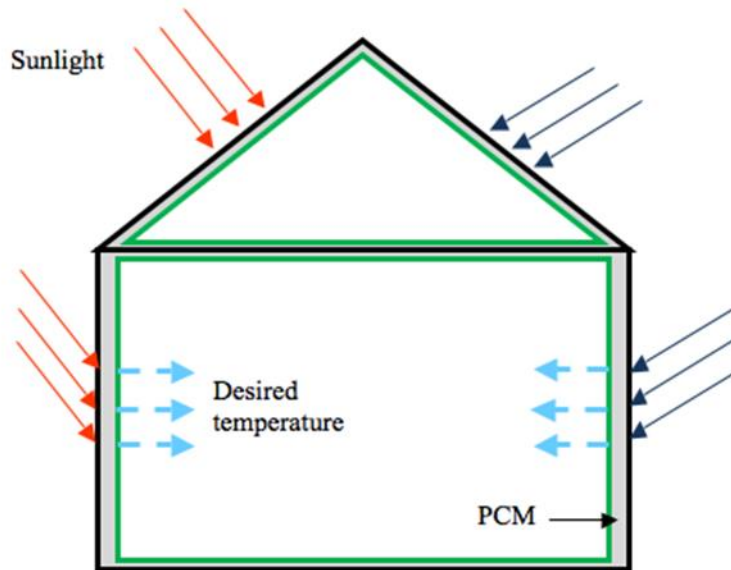
Bruken av PCM som termiske lagringssystemer for bygninger har vært av interesse gjennom andre halvdel av det tjuende århundre. Oftest latent varmelagring materialer brukes til å stabilisere innvendige bygningstemperaturer. I bygge konvolutt applikasjoner lagrer PCM latent varme når omgivelsestemperaturen stiger til smelten punkt, de fleste PCM-er endres fra fast til flytende tilstand. Når temperaturen avkjøles ned, går PCM tilbake til en fast fase og den latente varmen frigjøres. Denne absorpsjon og frigjøring av varme skjer ved konstant temperatur, noe som er ideelt for å jevne ut ytre temperatursvingninger [3].

Latent varme er energien som absorberes eller frigjøres av et stoff under en endring i dets fysiske tilstand (fase) som skjer uten å endre temperaturen. Ved oppvarming av et stoff øker temperaturen ettersom energien til partiklene øker. Når stoffet endrer tilstand, fra fast til smeltende, slutter temperaturen å stige og holder seg konstant.

Siden PCM gjentatte ganger endrer fase fra fast til flytende under varmelagringsprosessen, må de lagres i noen form for beholdere eller matriser. Måtene PCM-ene er inneholdt på avhenger av termisk lagringsapplikasjon. Når det gjelder å bygge integrert latent varmelagring, kan PCM noen ganger være inneholde i en porøs matrise som stein, tre, betong eller annet byggemateriale. Den største ulempen med denne metoden for inneslutning er at det er vanskelig å holde en PCM i matrisen når PCM er i flytende tilstand. Noen PCM-er, spesielt organiske, kan fordampe eller frigjøre noen av forbindelsene deres. Saltvannshydrater er spesielt uegnet for denne måten å holde på grunn av vanninnholdet.

Mikroinnkapslede faseendringsmaterialer (MPCM) har et bredt spekter av bruksområder innen bygningsintegreert termisk energi Oppbevaring. I motsetning til noen andre latente varmelagringsteknikker som fortsatt er i utviklingsstadiet eller laboratorietesting, har MPCM vært tilgjengelig som kommersielle produkter i over et tiår. Selv forskning og utvikling på dette området fortsetter. Nye innkapslingsteknikker er utviklet og nye matriser som inngår i MPCM blir testet. Optimaliseringsmetoder brukes for å forberede MPCM-komposittene i rekkefølge for å oppnå de ønskede termiske og mekaniske egenskapene til sluttproduktet [3].

Fordelen med denne lagringsmetoden er at de PCM-fylte mikrokapslene kan blandes med andre materialer f.eks. mørtel eller gips. PCM-er må være innkapslet med et hardt og mer elastisk skall når det brukes med byggematerialer.



Figur 1-Bruk av PCM i bygning (Sustainability: A comprehensive Foundation).

Typisk bruk av PCM i bygninger er illustrert i denne figuren som en type bruk av PCM i bygninger. Varmelagring og levering skjer over et ganske smalt område, det grå. Den latente varmekapasiteten til PCM brukes til å fange opp solenergi eller menneskeskapt varme i bygninger.

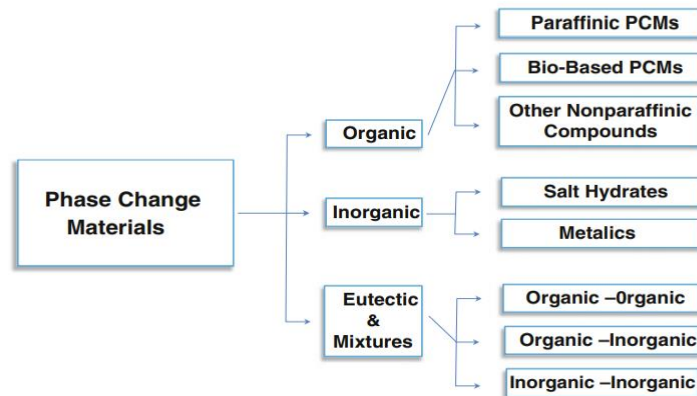
2.3 Egenskaper av faseendringsmaterialer (PCM)

Et faseendringsmaterialer (PCM) er et stoff med høy varme av fusjon som smelter eller størkner ved en viss temperatur og det er også i stand til å lagre og frigjøre store mengder energi. Når materialet endres fra fast stoff til flyttende stoff eller omvendt, det viser at varmen absorberes eller frigjøres, derfor PCM klassifiseres som latent varmelagring (LHS).

Latent varme: Det er energien som absorberes eller frigjøres av et stoff under en endring i dets fysiske tilstand (fase) som skjer uten å endre temperaturen. Ved oppvarming av et stoff øker temperaturen ettersom energien til partiklene øker. Når stoffet endrer tilstand, fra fast til smeltende, slutter temperaturen å stige og holder seg konstant.

2.4 Klassifisering av PCM

Faseendringsmaterialene (PCM) består av tre ulike kategorier, organiske, uorganiske og eutektiske materialer. Prosjektet tar utgangspunkt i denne Organiske PCM fordi organiske stoffer fungerer som viktig varmelager på grunn av flere fordeler fra deres naturlige egenskaper som evnen til å smelte kongruent, selvkjernende, giftfri og miljøvennlig ((Jan Kosny,2015)).



Figur 2- Klassifisering av PCM (Jan Kosny,2015)

2.4.1 Organisk PCM

Organiske PCM-er har en del egenskaper som gjør dem nyttige for latent varmelagring i bygningselementer fordi de er mer kjemisk stabile. I øyeblikket er prisen for Organisk PCM er mye høyere, men i det lange løp kan det lønne seg i bidrag til global oppvarming dersom produksjonsprosessen er bærekraftig

2.4.2 Paraffiner

Paraffin er et av de mest studerte faseendringsmaterialene i termisk energilagringsapplikasjon på grunn av deres tilgjengelighet, relativt billige, trygt, forutsigbart og ikke-korrosive natur. Paraffin består normalt av rette lange kjede n- alkaner $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)-\text{CH}_3$. Varmeutløsnings- og smeltepunktet til denne paraffinen avhenger av kjedelengden. Selv om den har få fordeler, men flaskehalsene, det vil si lav termisk ledningsevne og moderat brennbarhet, gjorde den bare gjeldende for liten skala og bare for påføring av små temperaturer.

Det finnes også en del av anvendelser av PCM som for eksempel lagring av energi, passiv lagring i bioklimatisk bygning/arkitektur (HDPE, parafin).

2.4.3 Ikke Paraffiner

Blant de ikke-paraffiner noen av fettsyrene, alkohol og glykol er egnet for termisk energilagring, men alle ikke paraffin har en stor ulempe, det er deres brennbarhet og de håndteres nøye under omgivelser med høy temperatur.

2.4.4 Uorganiske PCM

Uorganiske PCM -er har sine fordeler og ulemper. Fordelene med uorganiske PCM er at materialer er: ikke brannfarlige, høy latent varmeverdier, høy termisk konduktivitet, billige og lett tilgjengelige. Mens ulempene for uorganiske PCM har ført til å finne noe av organiske PCM-er. Det er en del av ulempene for uorganiske PCM er: ustabilitet, korrosivitet, underkjøling osv. Uorganiske materialer er videre fordelt seg som salhydrat og metallisk. Disse materialene er ikke egnet for bruk i bygninger da den har svært høy faseendringstemperatur

Tabell 1-Fordeler og ulemper av organiske og uorganiske PCM.

PCM	Fordeler	Ulemper
Organiske	-Lavt damptrykk -Kjemisk og termisk stabilitet -Ingen korrosjon	-Lav termiske konduktivitet -Eksplisjonsfare -Høy kostnader
Uorganiske	- Høy smelteentalpi -Relativ høy termisk konduktivitet -Lavere kostnader -Billige og lett tilgjengelige	-Lav termisk stabilitet -Korrosjon -Underkjøling -faseseparasjon

2.5 Sementmørtel

Sementmørtel er en bygningsmasse som lages ved å blande vann, sement og sand. Mørtelen kan brukes i murarbeid av stein, blokk og overflate. Mørtel har blitt brukt i århundrer som et middel til å lime murstein eller betongblokker sammen. Sementmørtel brukes fortsatt i mange forskjellige konstruksjonsformer. Den ferske mørtelens brukstid er avhengig av type bindemiddel, temperatur og spesielle funksjonskrav, og kal angis av produsenten. NS EN 998-

2 stiller krav til mørtelens fasthet ved 28 døgn. Bestemmelse av fasthetsegenskaper skal foretas i henhold til NS EN 1015-11” Prøvingsmetoder for mørtel til murverk”. Del 11 : ”Bestemmelse av bøyestrekfasthet og trykkfasthet til herdet mørtel”[16].

2.6 V/C-tall

Det er forholdstallet mellom vann og sement i en sementmørtelblanding. Vann sement forholdet (v/c-tall) påvirker i stor grad mørtelens bestandighet og styrke. Det vil si at v/c-tallet har innvirkning på trykkfastheten, bøyefastheten, svinn og porøsitet. Et lavere v/c-forhold fører til en økning i mørtel styrke med lavere permeabilitet, og dermed forbedrer mørtel styrken og holdbarhet. Høyt v/c-tall fører til en mindre tett mørtel, og dermed reduseres bestandighet og styrke.

I denne studien brukes v/c-forhold på 1:2 til 1:5. Ved hvert v/c-tall varierte vann sement forholdet fra 0,42 til 0,79 ved en ustabil økning. For alle mørtelblandingene ble trykkfastheten og bøyefastheten til mørtel bestemt ved 28 dager (Maage,2015b).

2.7 Fasthet

Fasthet menes generelt den høyeste spenning materialet tåler før sammenbrudd. «Begrepet trykkfasthet kan defineres som middelveiden av maksimal last omregnet til nominell spenning for en serie standardiserte prøvestykker belastet til brudd i en gitt belastningssituasjon. Definisjonen er ikke generell, men gjelder for prøvestykker produsert eller tildannet spesielt for å måle fasthet» (Maage ,2015 b). Av de mange testene som brukes på betongen er trykkfasthet den viktigste, da den gir en ide om betongens egenskaper. Fasthet for betong bestemmes som regel på utstøpte prøvestykker ved en alder på 28 døgn etter lagring i vann ved ca. 20°C.

Betongens strekkfasthet er så liten i forhold til trykkfastheten. En vanlig betong har en strekkfasthet 8-10% av trykkfastheten, men høyfast betong har 4-6% av trykkfastheten. Ved prosjektering av betongkonstruksjoner antar vi vanligvis at alle strekkrefter må tas av armeringen (Maage,2015 b).

2.7.1 Fasthetskklasse

Fasthetsklassene er definerte i samsvar med et prøveopplegg gitt i NS-EN 196-1/9/, der en standardisert mørtel med masseforholdet. Prøvealder er 28 døgn. Fasthetsklassene vist i figur (5) (Maage,2015b).

Fasthets- klasse	Trykkfasthet MPa				Begynnende størkning min	Volum- bestandighet mm
	Tidligfasthet		Standardfasthet			
	2 døgn	7 døgn	28 døgn			
32,5 L ^a	–	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 N	–	≥ 16,0				
32,5 R	≥ 10,0	–				
42,5 L ^a	–	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 N	≥ 10,0	–				
42,5 R	≥ 20,0	–				
52,5 L ^a	≥ 10,0	–	≥ 52,5	–	≥ 45	
52,5 N	≥ 20,0	–				
52,5 R	≥ 30,0	–				

a Fasthetsklasse definert bare for CEM III sementer

Figur 3-Mekaniske og fysiske krav gitt som karakteristiske verdier (Maage,2015 b)

Trykkfastheteklasse for normalbetong og tungbetong angis med prefikset B og et påfølgende tall som angir trykkfasthet. De benyttede fasthetsklassene i henhold til NS-EN 206 er vist i figur (6) (Normann, 2003).

Fasthetsklasse i NS	B10	B20	B25	B30	B35	B45	B55	B65	B75	B85	B95
CEN-betegnelse		C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C45/55	C55/67				
Karakteristisk sylindrefasthet, f_{cck}	10	20	25	30	35	45	55	65	75	85	95
Karakteristisk terningfasthet, $f_{ck}^{1)}$	12	25	30	37	45	55	67	80	90	100	110

¹⁾ For fasthetsklasse B55 og høyere kan andre verdier benyttes hvis forholdet mellom disse og referansefastheten for sylindrer er etablert med tilstrekkelig nøyaktighet og dokumentert for den aktuelle betongsammensetningen.

Figur 4-Viser Trykkfastheteklasse for normalbetong og tungbetong (Normann, 2003).

3 Materialer

3.1 Sement

Norcem produserer en av rene Portland-sementer i Norge med et totalt karbonavtrykk på 800 kg CO₂-ekvivalenter per tonn sement. Fleste land har et karbonavtrykk på ca. 1000 kg CO₂-fotavtrykk, noe som gjør Norcem til en av lederne i kampen mot avkarbonisering. Omtrent 5 prosent av totalt menneskeskapt CO₂ er i sementproduksjon. (Maage,2015a)

Industrisement CEM I52,5 R er sementtypen benyttet i oppgaven og er produsert av Norcem AS. Norcem Industrisement er en spesialsement med rask fasthetsutvikling og er velegnet for bruk ved produksjon av mørtelelementer og mørtelvarer. I tillegg er den velegnet til støpearbeider vinterstid i Norge. Norcem Industrisement tilfredsstiller kravene i NS-EN 197-1:2011 til Portlandsement CEM I 52,5 R.



Figur 5-Sement brukt i mørtelblanding. Foto: Marwan Heri

Sement er den viktigste bindemiddel i mørtel fordi den formbar. De meste av sementen som brukes i Norge er portlandsement. Portlandsement består av fire hovedmineraler. De fire hovedmineralene utgjør 90-95% av portlandsementen i rene sementtyper. Hovedmineralene har blitt sammensatt av oksider dannet med grunnstoffene kalsium, silisium, jern og aluminium. Figur (3) under viser de kjemiske reaksjonene (Maage,2015b).

Navn	Kjemisk formel	Symbol
Trikalsiumsilikat	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Dikalsiumsilikat	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Trikalsiumaluminat	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Tetrakalsiumaluminatferritt	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Figur 6-De fire hovedmineralene i portlandsement (Maage,2015 b).

Når disse mineralene endrer seg på mengdeforholdene, kan en styre sementens egenskaper både når det gjelder varmeutvikling, fasthetsutvikling, fasthetspotensial og bestandighetsegenskaper. De fire hovedmineralene i sement reagerer med vann(hydratiserer), det blir utviklet varme. **Hydratasjon:** er en prosess som oppstår når et stoff som sement kommer i kontakt med vann og produserer en kjemisk reaksjon. Under denne reaksjonen frigis energi og det merkes som varme, dette er en eksoterm reaksjon. Ved å blande sement med vann oppstår det en rekke reaksjoner, retardsjon er en av de tidligste og det skjer fordi sement inneholder en liten mengde gips (kalsiumsulfat). Reaksjonen er viktig i sementmørtelblandingen fordi den forsinkede hydreringsreaksjonen til gipsen blir fullstendig brøyt ned. Dette bedrar til at sementlimet får den flytende konsistens som trengs og god tid til å støpe i forskallinger. Hydratasjon kjemisk reaksjon er mellom kalsiumsilikathydrat og kalk.

Avbindingsfase: etter en stund begynner den andre fasen å finne sted når sementmørtlene mister sine støpe egenskaper og får en ny struktur som overgang til faste stoffer gradvis.

Herdefase: transformasjon til herdefasen er vanskelig å vite når den starter, men i denne perioden har hydratasjon, varmeutvikling og styrkeutvikling begynt å gå opp. herdefasen er perioden fra avbindnings fasen til standard styrke som normalt tar 28 dager ved en temperatur på 20 grader når mørtlene er i vannbad. For portlandsement er varmeutviklingen 250–425 kJ/kg etter 28 døgn.

Kjemisk sammensetning

Portlandsement har kjemisk sammensetning som viser i figur under (4). Det meste av de rene portlandsementene består av oksider.

Navn	Kjemisk formel	Variasjonsområde
Silisiumoksid	SiO ₂	17–24 %
Aluminiumsoksid	Al ₂ O ₃	4–7 %
Jernoksid	Fe ₂ O ₃	1,5–5 %
Kalsiumoksid	CaO	60–67 %
Magnesiumoksid	MgO	1–5 %
Svoveloksid	SO ₃	1,5–3 %
Kalium- og natriumoksid	K ₂ O + Na ₂ O	0,2–1,5 %

Figur 7-Kjemisk sammensetning (Maage,2015 b).

3.2 Sand

Sand brukt i mørtel defineres som tilslag. Tilslaget er vanligvis den sterkeste og stiveste delen av mørtelen. Det meste av volumet i mørtel består av sand, og det er viktig at sanden har en riktig kornstørrelse. Tilslag kan være naturlige, kunstig eller av resirkulert byggemateriale. Fint tilslag har en kornstørrelse mindre enn 4mm. Grovt tilslag har en kornstørrelse større enn 4mm. Maksimal kornstørrelse til naturlig gradert tilslag skal være 0-8mm som er brukt i prosjektet. Sand blir som brukt i vår oppgaven Årdal 0-8mm fra NorStone AS, Årdal.



Figur 8-Sand brukt i mørtelblanding. Foto: Bahlbi Sbhat.

3.4 Vann

Vann er den viktigste ingrediensen i mørtel. Hvis vannet ikke brukes riktig, fører det til dårlig kvalitet på sementmørtelen. Vann til framstilling av mørtel skal være rent. Det må aldri inneholde stoffer som påvirker de kjemiske prosessene under mørtelens herdning, eller som gir

misfarging i herdnet mørtel. Ferskt drikkevann må brukes til å tilberede mørtelen. Vannsementforholdet som brukes i mørtelblanding er mellom 0,42 til 0,80.

3.5 PCM

Mikroinnkapsling har blitt mye brukt som en effektiv metode for å inkorporere PCM i byggematerialer. dette produktet er stabilt under normale forhold ved håndtering, oppbevaring og for bruk i laboratoriet anbefales vernehansker og vernebriller.



Figur 9-PCM-pulver brukt i mørtelblanding. Foto: Marwan Heri

Tabell 2-Oversikt over materialer i resepten.

Material	Produsent	Produkt	Densitet (kg/m ³)
Sement	Norcem	Portlandsement	2750-3200
Sand	Norstone Årdal	Tilslag	2680
MPCM	Microtek laboratories	Micronal 24D	300-500

3.6 Anskaffelse av materialer til litteraturstudie

Det ble bruket mange databaserte akademiske kilder som:

- Standart.no
- Google og Google Scholar
- Betong regelverk, teknologi og utførelse (Magne Maage, 2018)
- Materialkunnskap (Bjørn Normann Sandaker, Malvin Sandvik, Bjørn Vik, 2003)
- Sceincedirect

- Oria

Søkeord som ble benyttet ved søking:

- PCM
- Mortar eller mørtel
- Mørtels mekaniske egenskaper
- Vannabsorpsjon
- Termiske varme konduktivitet

Sciencedirect ble brukt som utgangspunkt i litteraturstudien. Der har vi brukt noen åpen vitenskapelig publikasjoner som ble skrevet av vår veileder Iman Asadi og hans venner om “Thermal properties of cement mortar with different mix proportions”, “Concrete as a thermal mass material for building applications - A review”, “Thermal conductivity of concrete – A review” og andre fornuftige kilder.

Standard.no der har vi funnet norske standarder som vi brukte til å lage våre prøvemørtler, samtidig har vi brukte andre norske standarder som er for mørtels bøyefasthet, trykkfasthet, varme konduktivitet, densitet, vannabsorpsjon og porøsitet. De mest norske standarder som vi brukte var NS-EN 196-1, NS-EN 1015-10.

3.7 Testoversikt

Ifølge NS-EN 196-1 har vi laget total 108 mørtler, som har vi brukt til å undersøke mørtelens bøyefasthet, trykkfasthet, termisk konduktivitet, spesifikk varmekapasitet, vannabsorpsjon, densitet (NS-EN 1015-10) og porøsitet. Alle disse forsøkene som har sammenheng hverandre fordi, når vi lager mørtlene med PCM materialer, som kan påvirke hele mørtlenes mekanisk og fysisk egenskaper, derfor var det viktig at lage mørtler som er uten og med PCM, deretter undersøker deres alle egenskaper og samlinger dem, for å finne ut beste resept som man kan lage beste mørtel med beste egenskaper.

4 Proporsjoner sementmørt

Proporsjonering mørtel med PCM og uten PCM

Antall mørtelprismer som er støpt og testet er trettiseks (36) i form av 40x40x160mm³. Prismene er delt inn i tre grupper A, B og C, hver gruppe består av 12 stykker. Del A for termiske tester, del B for bøy- og trykk tester, del C for vannabsorpsjon og tetthet. For gruppe B kjøres først bøyefasthetstesten der deler legemene i to deler og deretter halvparten av prøven fortsetter til trykkfasthetstester.

Liste over Utstyr:

- Digital vekt
- Murerskje
- Forskalingsformer av metall
- forskalingsolje
- Vibrasjonsbord
- Blandemaskin for mørtel
- Stoppeklokke
- Skål
- Hansker
- Tommestokk
- vernesko
- Flow table test
- vannbasseng

Blandingsprosedyre for mørtel Uten PCM og med PCM

Vei sement og vann ved hjelp av vekten. Når vann tilsettes i volum, skal det være dispenseres med en nøyaktighet på ± 1 ml. Bland hvert parti mørtel mekanisk ved hjelp av mikseren. De tidspunktet for de ulike blandetrinnene refererer til tidspunktene når mikserstrømmen slås på/av og skal opprettholdes innen ± 2 s.

Blandingsprosedyren skal være som følger:

- Plasser vannet og sementen i bollen, pass på å unngå tap av vann eller sement; addisjon skal fullføres innen 10 s;
- Umiddelbart vannet og sementen bringes i kontakt, start mikseren på lav hastighet (se Figur (10) mens du starter timingen av blandetrinnene. I tillegg registrerer du tiden til

nærmeste minutt, som "nulltid". Etter 30 s med blanding, tilsett sanden jevnt i løpet av de neste 30 s.

- Stopp mikseren i 90 s. I løpet av de første 30 sekundene, fjern ved hjelp av en gummi- eller plastskrape mørtelen som fester seg til veggen og bunnen av bollen og plasser i midten av bollen;
- Fortsett blandingen ved høy hastighet i 60 s.

PCM Tilsetning

- Tilsett PCM i løpet av 30 s med lav hastighet.
- Tilsett Vann i løpet av 20 s med lav hastighet hver gang tilsett vann.
- Normalt utføres disse blandeoperasjonene manuell kontroll av disse operasjonene og tidspunktene kan brukes.
- Bruk av Vibrasjonsbord for å fjerne luftbobler som setter seg i mørtelen, og for å få mørtelen pent fordelt og fylt i formen.

Normalt utføres disse blandeoperasjonene manuell kontroll av disse operasjonene og tidspunktene kan brukes. Blanderen skal fungere med hastighetene gitt i figur (10) ved blanding av mørtelen.

	Rotation min ⁻¹	Planetary movement min ⁻¹
Low speed	140 ± 5	62 ± 5
High speed	285 ± 10	125 ± 10

Figur 10-Hastigheter på mikserblad (NS-EN 196-1:2016).

Tabell 3- Mengde av tilsatt delmaterialer med PCM.

Blanding ID	PCM (%)	V/C	Cement (g)	Sand (g)	Vann(g)	PCM(g)
M1:2	0	0.42	639.50	1290.00	270.30	0
	10	0.50	639.50	1290.00	270.30	63.95
	20	0.57	639.50	1290.00	270.30	127.90
M1:3	0	0.50	488.80	1466.60	244.40	0
	10	0.55	488.80	1490.00	244.40	48.88
	20	0.61	488.80	1466.60	244.40	97.76
M1:4	0	0.64	389.80	1559.40	250.60	0
	10	0.66	389.80	1559.40	250.60	38.98
	20	0.68	389.80	1559.40	250.60	77.96
M1:5	0	0.75	326.40	1626.60	246.90	0
	10	0.76	326.40	1626.60	246.90	32.64
	20	0.80	326.40	1626.60	246.90	65.28

Fersk-mørtel observasjon

Ved absorpsjon av sementmørtelblandingen i laboratoriet er tekstur og konsistens tydelig. Mørtelen med et forhold på **M1:2** sementsand er jevnere og flyter pent enn med mer sand som **M1:5** sementsand. Men når PCM tilsettes til mørtel, ser blandingen ut til å være stivere at det kreves ekstra tilsatt vann for å oppnå den (Flow table Test) som trengs.



(a)



(b)

Figur 11-viser blandemaskin for mørtel. Foto: Yilham Abduxugu

5 Tester

5.1 Flow table test

Hensikten med dette testet

I denne teste er målet å bestemme av konsistensen på fersk mørtel i henhold til EN-EN 1015-3:1999+A1. Fersk mørtel bringes til et definert konsistensnivå og måles ved bruk av flow table test før egenskapene som blir brukt til å karakterisere den, blir vurdert.

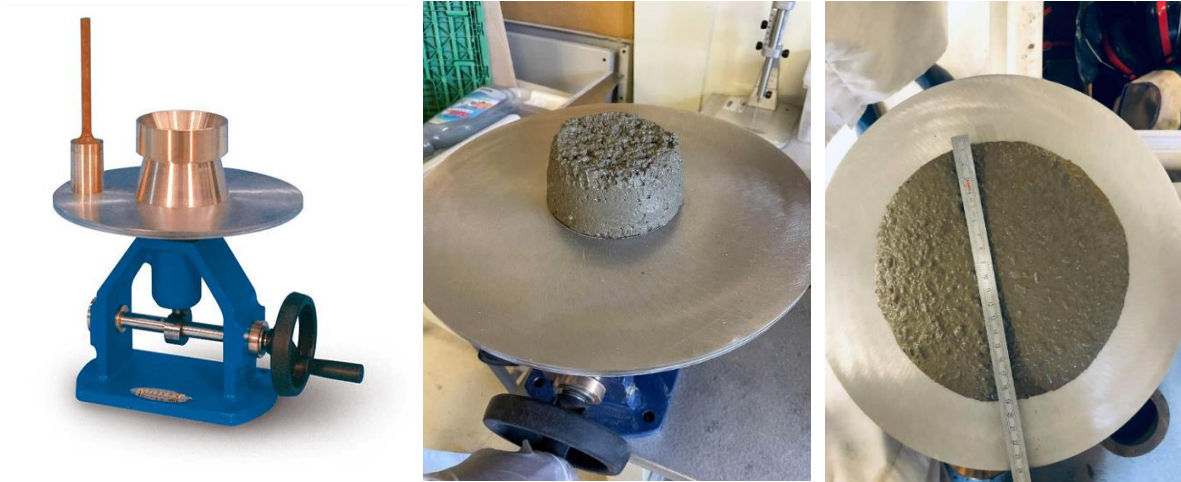
Konsistens er et mål på fluiditeten og/eller våtheten til fersk mørtel og gir et mål på deformeringen av den ferske mørtelen når den utsettes for en viss type spenning. Konsistensen er imidlertid ikke direkte knyttet til måten den ferske mørtelen kan behandles på når den brukes av en håndverker.

Fremgangsmåte

Prosedyre Før hver prøving tørkes skiven, den innvendige overflaten og kantene på formen ren med en fuktig klut. Etter at det er tørt, oljes overflatene lett med en ikke-harpiksholdig mineralsk olje med lav viskositet. Plasser formen i midten av skiven på rystebordet og tilfør mørtelen i to lag. Hvert lag stemples med korte støt av stamperen for å sikre jevn fylling av formen. Hold formen fast på skiven med én hånd under fylling. Fjern overflødig mørtel med en murerskje og tørk det frie området av skiven rent og tørt. Påse særlig at vann rundt formens kanter ved bunnen fjernes. Løft formen sakte vertikalt etter ca. 15 s og spre mørtelen på skiven ved å ryste bordet 25 ganger med en konstant frekvens på ca. én rystelse per sekund. Mål mørtelens diameter i to retninger vinkelrett på hverandre ved hjelp av skyvelære. Angi resultatene i millimeter med en nøyaktighet på 1 mm.

Beregning og angivelse av resultater

$$\text{Gjennomsnitt diameter} = \frac{D_1 + D_2 + D_3}{3}$$



Figur 12-Flow table test. Foto: Marwan Heri.

Prismene blir støpt på tre lag i hvert kubikkrom i den tredelte forskalingen, og blir komprimert med vibrasjonsbord. Bruk av Vibrasjonsbord for å fjerne luftbobler som setter seg i mørtlene, og slik at mørtlene blir fint fordelt og fyller formen helt. Så blir Prismene dekket med plastikk og lagret et døgn ved romtemperatur.



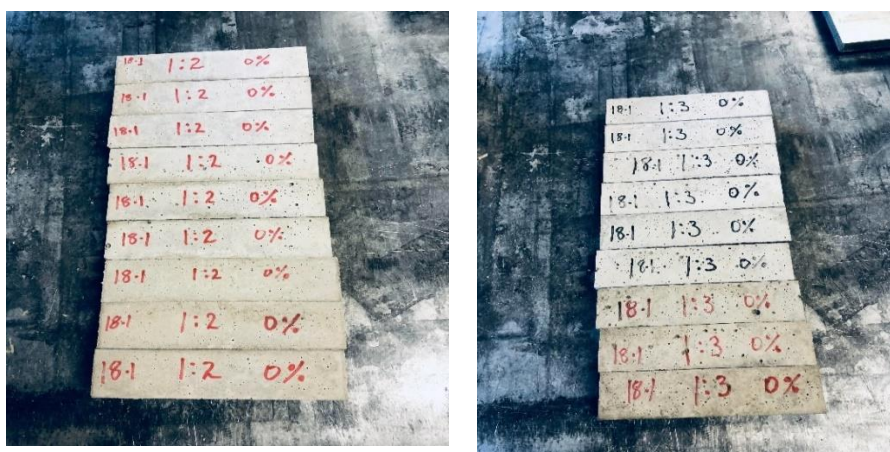
Figur 13- Ferske mørtelprøver. Foto: Yilham Abdugur.

Prøvene blir stående i laboratoriet i en slik form i 24 timer ved romtemperatur. Dagen etter blir prøvene plassert i vannbasseng ved 20°C helt frem til testen setter i gang i henhold til NS-EN 196-1:2016.



Figur 14-Oven og badebasseng. Foto: Marwan Heri.

Etter Sju åtte dager tas ut prøvene som er lagt på rist i en middels stor stålbeholder fylt med vann ved en temperatur på 20 ± 1 °C. grader vannbasseng. Rengjør deretter overflaten av prøvene forsiktig med en vått og myk klut for å bli kvitt vannet på de firkantede prismene. Deretter veies de en etter en på en liten digital vekt med detaljer skrevet på overflaten, så det ville være lettere for å skille dem og beregne gjennomsnittsvekten på de ni prøvene som har samme oppskrift. Ved hjelp av laboratorielederen, justeres ovens temperaturmåler til nøyaktig 105 grader før prøvene settes i ovnen til i morgen, altså etter 24 timer. Etter tørkingen så begynner bøy- og trykk testen.



Figur 15-Stykker tatt ut av oven før testing-Foto: Gatkuoth

5.2 Bøyefasthet

Hensikt

Bøyestrekfasthet til mørtel ble målt ved å bruke 3-punkts bøyeteste i henhold til NS-EN 196-1:2016 pkt. (9.1). Dette eksperimentelle programmet besto av å teste det vanlige mørtelprismet.

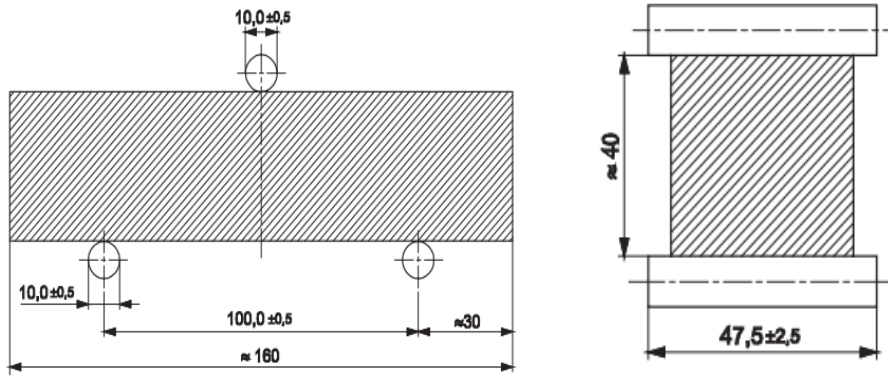
Plasser prismet i apparatet med den ene sideflaten på støtterullene og med lengdeaksen vinkelrett på støttene. Påfør belastningen vertikalt ved hjelp av lastevalsen på den motsatte sideflaten av prismet og øk den jevnt med en hastighet på (50 ± 10) N/s til brudd.

Fremgangsmåte

Bøyestyrken kan måles ved hjelp av en bøyestyrketestmaskin. I dette tilfellet må apparatet oppfylle følgende krav: Apparatet for bestemmelse av bøyestyrke skal være i stand til å påføre belastninger opptil 10 kN med en nøyaktighet på $\pm 1,0$ % av den registrerte belastningen i området som brukes, med en belastningshastighet på (50 ± 10) N/s. Apparatet skal være utstyrt med en bøyeanordning som omfatter to støtteruller av stål med $(10,0 \pm 0,5)$ mm diameter med avstand $(100,0 \pm 0,5)$ mm fra hverandre og en tredje stållasterulle med samme diameter plassert sentralt mellom de to andre. Lengden på disse valsene skal være mellom 45 mm og 50 mm.

De tre vertikale planene gjennom aksene til de tre valsene skal være parallelle og forbli parallelle, like lange og vinkelrett på retningen for prøven som prøves. En av støtterullene og lastevalsen skal kunne vippe litt for å tillate en jevn fordeling av lasten over prøvestykkets bredde uten å utsette den for vridningsspenninger.

Det er viktig å implementere bøyefastheten til mørtlene og beregning av riktig bøyestyrke for sementmørtler er avgjørende i konstruksjonsmekanikk. Den sikrer at konstruksjonen er i samsvar med byggeforskriftene og ikke truer mennesker og allmenn sikkerhet.



Figur 16- bøyestrekfasthet test (NS-EN 196-1:2016).

Beregningsformel for bøyestrekfasthet iht. NS-EN 196-1:2016 pkt. (9.1):

$$R_f = \frac{1.5 \times F_f \times l}{b^3}$$

Der:

R_f er bøyestrekfastheten i Mpa

b er siden av den kvadratiske delen av prismet i mm

F_f er belastningen som påføres midten av prismet ved brudd i N

l er avstanden mellom støttene i mm



Figur 17- bøyestrekfasthet test-Foto: Marwan Heri.

Bøyefasthet test observasjon:

I bøyning testen viser det seg at prismene brekker i forskjellige måter, men omtrent i midten akkurat som de har blitt plassert på bøyning apparatet. Sementmørtler med høy andel sement og mindre sand sprekker så hardt at de lager en sprekkyd, for eksempel **M1:2** uten PCM, men de med mer sand og PCM lager nesten ingen lyd gjennom hele prosessen før det merkes at maskinen stopper eksempel **M1:5** med 20% PCM.



Figur 18- Bøyefasthet test observasjon- Foto: Marwan Heri.

5.3 Trykktest

Hensikt

Trykkfasthet er viktig for å få kunnskap om sementmørtelegenskaper og kapasitet til å tåle belastninger før brudd. Av de mange testene som brukes på mørtel, er trykkfasthetstesten den viktigste fordi den gir en ide om egenskaper. Styrken til bindemidlet, som er sement og vann, legger stor vekt på effektiviteten til mørtelens ytelseegenskaper. Hvis det gjøres i riktig metode, kan det sikre den samlede kvaliteten på den ferdige mørtelen. I henhold til NS-EN 196-1:2016 blir bestemmelse av Trykkfasthet.

Fremgangsmåte

Testmaskinen for bestemmelse av trykkfasthet skal ha passende kapasitet for testen: den skal ha en nøyaktighet på $\pm 1,0$ % av registrert belastning av området verifisert iht. EN ISO 7500-1. Den skal gi en last økning hastighet på $(2\ 400 \pm 200)$ N/s. Den skal være utstyrt med en indikeringsanordning som skal være konstruert slik at verdien angitt ved innretningen på prøven forblir angitt etter at testmaskinen er avlastet.

Den vertikale aksen til støtten må falle sammen med den vertikale aksen til maskinen under belastning. Videre skal resultanten av kreftene passere gjennom midten av prøven. Overflaten på den nedre maskinplaten skal være vinkelrett på maskinens akse under lasting.

Sentrum av den øvre sfæriske platen skal være ved skjæringspunktet mellom den vertikale maskinaksen og planet til den nedre overflaten av den øvre maskinplaten med en toleranse på ± 1 mm. De øvre platene må kunne justeres fritt når de kommer i kontakt med prøven, men under lasting må de øvre og nedre platen stå fast. Testmaskinen skal være utstyrt med plater laget av wolframkarbid. Disse platene bør være minst 10 mm tykke, (40.00 ± 0.10) mm brede og (40.00 ± 00.10) mm lange. Planhetstoleransen i henhold til EN ISO 1101 over hele kontaktflaten med prøven må ikke være større enn 0,01 mm. Overflateteksturen i henhold til EN ISO 1302 skal ikke være glattere enn N3 og ikke grovere enn N6.

Overflateruhet er et mål på teksturen til en overflate. De vertikale avvikene til en reell overflate fra dens ideelle form måles. Hvis disse avvikene er små, er overflaten glatt og hvis de er store, er overflaten ru. Her er N3 = 0.1 mikromillimeter og N6 = 0.8 mikromillimeter overflateruhet som krav for testen.

I vårt tilfelle, bruk $(40,0 \pm 0,1)$ mm bred for alle sementmørtler i trykkfasthetstestmaskinen. Lengdene varierte litt mellom $(70,00 - 90,00)$ mm lange eller ca. halvparten av prismene.

årsaken er at betongsager eller mørtelsager bruker lang tid på å tilpasse seg for å kutte prøvene til $(40,00 \pm 0,10)$ mm lengder, denne metoden kan holde prosjektet bak. Å fullføre prosjektet for alle testene i tide ved å bruke $(80,00 \pm 10,00)$ mm lengde er den beste løsningen.

Beregningsformel for trykkfasthet iht. NS-EN 196-1:2016 pkt. (9.1).

$$R_c = \frac{F_c}{b \times l}$$

Der:

R_c er trykkfasthet i Mpa

F_c er maksimal belastning ved brudd i N

b er bredden i med mer

l er lengden i mm



Figur 19-Trykkfasthet test-Foto: Yilham Abduxugur.

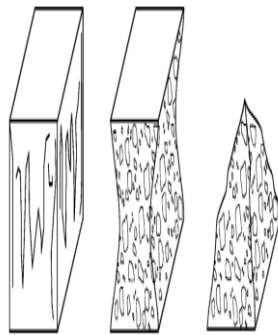
Trykkfasthet test observasjon:

Når prøvene utsettes for en trykktest og de vertikale kreftene kommer i kontakt med halvprismene, oppfører de seg nesten som i bøyningstesten. At prøvene uten PCM eksploderer voldsomt på sidene at små deler faller ned på gulvet som M1:2 mens midtdelene forblir intakte. Når det gjelder mørtlene med PCM skjer det motsatte at prøvene klemmes hardt og lydløst på trykkemaskinen, men holder seg som helhet som M1:5.



Figur 20- Trykkfasthet test observasjon- Foto: Yilham Abduxugur.

Figuren nedenfor viser bruddformene til mørtelprismene etter trykktestingen og tilfredsstillende Bruddformer av prismene. Bruddet i større grad preget av oppsprekking parallelt med hovedspenningsretningen. NS-EN 12390-3:2019 stiller krav til hvordan prøvestykkene ser ut etter brudd. I forhold til prosjektet kraven tydelig er oppfylt.



Figur 21-Viser bruddformer i sementmørtel- Marwan Heri.

5.4 Termisk ledningsevne, termisk diffusivitet og spesifikk varmekapasitet

Transient plane source (TPS) metode

Transient Plane Source (TPS) - er en metode som tillater rask og nøyaktig testing av termisk ledningsevne, spesifikk varmekapasitet og termisk diffusjon for de fleste materialtyper inkludert sementmørtel, alt i en enkelt måling. Den er veldig fleksibel og krever to stykker av den aktuelle prøven for å teste med aksept at hver sideflate er jevn nok. videre må en liten del av sensorutstyret påføres mellom de to halvdelene av sementmørtel. I denne metoden brukes en flat sensor, hvis temperatur økes mens elektrisk strøm går gjennom sensoren.

Isotropiske materialer: materialer kan ha en homogen eller ikke-homogen mikroskopisk struktur og er materialer med samme mekaniske og termiske egenskaper i alle retninger. For en isotrop prøve bør tykkelsen være minst lik sensorradius, r , mens bredden må være minst to ganger sensordiameteren.

Liste over Utstyr

- Oven
- Hot Disk maskin
- Temperatur måling
- Microsoft Office Excel



Figur 22- Hot Disk maskinen test-Foto: Bahlbi Sbhat.

Tabell 4-Hot Disk TPS 2500 S-modellen ble brukt til eksperimentet.

Thermal Conductivity	0.005 to 1800 W/m/K.
Thermal Diffusivity	0.1 to 1200 mm ² /s.
Specific Heat Capacity	Up to 5 MJ/m ³ K.
Measurement Time	1 to 1280 seconds.
Reproducibility	Typically, better than 1 %.
Accuracy	Better than 5 %.
Temperature Range	-253 °C to 1000 °C.
With Furnace	Ambient to 750 °C [1000 °C oxygen free].
With Circulator	-35 °C to 200 °C.
Smallest Sample Dimensions	0.5 mm × 2 mm diameter or square for bulk testing. 0.1 mm × 10 mm diameter or square for slab testing. 10 mm × 5 mm diameter or square for one-dimensional testing. 0.01 mm × 22 mm diameter or square for thin-film testing.
Sensor Types Available	Kapton sensors. Teflon sensors. Mica sensors.

Oven: De originale prismene er 40 x 40 x 160 mm³ og deretter kuttet i to halvdeler med en betong sag, størrelsene på prøvene som brukes i dette prosjektet er 40 x 40 x 80 mm³. Prismene plasseres i en ovn med konstant temperatur gjennom hele forsøket og veldig nøye for å få nøyaktige resultater, i dette tilfellet er de 21 og 27 grader. ved 27 grader er eksperimentet basert på prøvene som inneholder PCM på 10 og 20 prosent. Grunnen er å analysere variasjoner i termisk egenskaper når mikroinnkapslinger i mørtlene er i fast og flytende form.

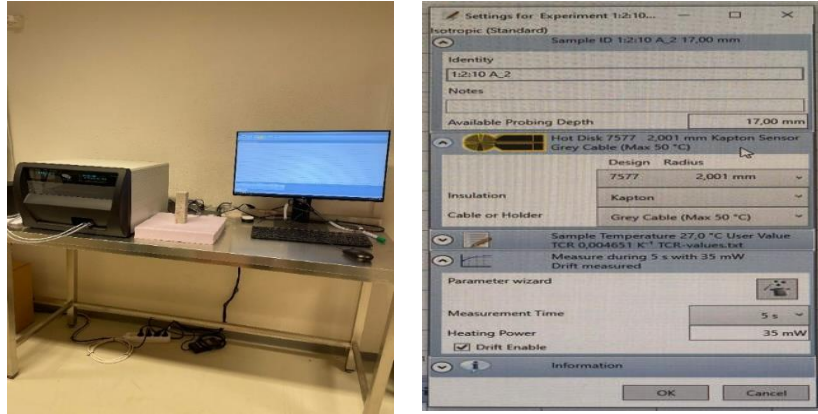


Figur 23-Viser oven- Foto: Bahlbi Sbhat.

Forsøket: Juster den bevegelige platen på bordet og legg den første halvdelen av sementmørtelprøven på den. Pass på at sensoren er sentrert og plasser den andre halvdelen på toppen av sensoren slik at den er helt dekket, og danner en prøve-sensor-prøve sandwich. Klem prøvene godt sammen forsiktig og streng anbefaling om at det ikke er luftspalte mellom sensoren og testflatene.

Starter Hot Disk Analysis-programvaren og klikk på Bulk (Type 1) isotropic, Sørg for at kombinasjonen Hot Disk-instrument og sensortype er valgt riktig i meny vinduet på PC skjermen. Deretter vises et prøveoppsett vindu der eksperimentelle parametere velges og prøveidentitet skrives inn i prøveoppsett vinduet. På PT100-sensoren velges prøvetemperaturen, her brukes temperaturen i henhold til forsøket som kreves 21 og 27 grader.

Still deretter inn passende sonderingsdybde som (Available probing depth) og dette er lagt på 17,00 mm. viktig å vite at den tilgjengelige sondedybden er den korteste avstanden mellom en kant eller overflate på sensoren og prøvekannten. Lengre mer bestemmes måletid og varmekraft er svært avgjørende for å oppnå pålitelige resultater og her er de 5 sekunder og 35 mW. Når Hot Disk-stasjonen og programvaretilkoblingen er bekreftet riktig, kjører eksperimentet og alt beregnes automatisk.



Figur 24-Viser (TPS) metode-Foto: Bahlbi Sbhat.

Termiske egenskaper

Energien til oppvarming og nedkjøling av bygninger avhenger av konstruksjonsmaterialets termiske egenskaper. Sementmørtel er et vanlig byggemateriale som har vært mye brukt i bygninger siden det ble oppfunnet. Hovedgrunnen til dette prosjektet er å vurdere de termiske egenskapene til sementmørtel når det gjelder varmeledningsevne, varmekapasitet og termisk diffusivitet.

Industriell computertomograafi (CT) viser at porestørrelsen varierer for prøver med forskjellige sement-til-sand-forhold. Porøsiteten til sementmørtel har en betydelig effekt på dens termiske og fysiske egenskaper.

Termisk konduktivitet: Konduktivitet varmeoverføring i faste stoffer skjer ved kollisjoner av mikroskopiske partikler og bevegelse av elektroner i sementmørtel. Hastigheten som varme overføres gjennom et tverrsnitts areal av et materiale, når en temperaturgradient strekker seg vinkelrett på området. Termisk ledningsevne i watt per meter kelvin representerer materialets evne til å lede og overføre den termiske energien. Jo høyere varmeledningsevne, desto raskere overføres energien og lav varmeledningsevne betyr på den annen side at hastigheten på overført energi er lav.

$$K = \frac{Qd}{A\Delta T}$$

Der:

K er termisk konduktivitet

Q er varmemengden

d er avstanden mellom de to isoterme planene

A er arealet av overflaten

ΔT er forskjell i temperatur

Spesifikkvarmen

Den spesifikke varmen til et materiale er energien som kreves for å heve ett gram prøvemateriale med én grad Celsius. Det er mengden energi som er lagret i eller frigjort av en materialstruktur når temperaturen endres og husk at varmekapasiteten, spesifikk varme og temperatur henger sammen.

Varmekapasiteten: Ulike materialer absorberer varme med ulik hastighet på grunn av ulike strukturelle faktorer. Varmekapasiteten til materialer er mengden energi som kreves for å heve temperaturen på prøvematerialet med én grad Celsius.

$$\text{Specific Heat Capacity (SHC)} = \frac{C_p}{\rho} \times 1000$$

Der:

SHC er Specific heat Capacity (kJ/kg. K)

C_p er volumetrisk (Mj/m³.K)

ρ er tetthet (kg/m³)

Termisk diffusivitet

Termiske diffusiviteter viser evnen til et materiale til å lede termisk energi sammenlignet med lagre energi. Når den termiske diffusiviteten til et materiale er høy, reagerer materialet raskt på termiske endringer i miljøet. Når den termiske diffusiviteten er lav, tar det lang tid å nå de nye likevekts forholdene.

Når PCM tilsettes mørtelen, produseres en ny spesifikk varme (C_p) ved hver ny temperatur. Årsaken er at PCM-ene smelter rundt en viss temperatur og dessuten avhenger den spesifikke varmen av temperaturen på PCM-mørtelblandingen. Derfor er C_p temperaturavhengig og resultatet er en termisk diffusivitet(α) avhengig av temperatur også.

Den termiske ledningsevnen(K) endres litt når PCM smeltes, noe som betyr at temperaturen øker. I tilfelle med PCM parafinmateriale vil denne faktoren(K) reduseres. Lavere termisk diffusivitet etter at PCM er smeltet sammenlignet med fast PCM, men påvirkningen er liten sammenlignet med smeltende PCM.

Termisk diffusivitet av materialer påvirkes av inkorporering av faseendringsmaterialer. Det kan defineres som.

$$\alpha = \frac{K}{\rho \times C_p}$$

Der:

α er den termiske diffusiviteten (m^2/s)

K er den termiske ledningsevnen i ($W/m \text{ } ^\circ K$)

ρ er tettheten (Kg/m^3)

C_p er den spesifikke varme ($Mj/m^3.K$)

5.5 Vannabsorpsjon

Hensikten med Vannabsorpsjon

Vannabsorpsjonen til sementmørtel er strømmen av væske inne i porøsitetene til umettede sementmørtelprøver. Dette viser at det er en sammenheng mellom porøsitet og vannopptak, men i de fleste tilfeller trenger ikke vannet helt inn. En annen årsak er at de tettere prøvene har lite plass til vann, og dette identifiserer at mørtelen er fast. Mørteltetthet inkluderer tetthet mot væsker og gasser når det gjelder mørtelfunksjon og holdbarhet.

Fremgangsmåte

For å utføre vannabsorpsjonstesten av sementmørtel plasseres den våte prøven i ovnen ved $105^\circ C$ i 24 timer. Etter det avkjøles prøven til romtemperatur og oppnå vekten kalles tørrvekt(M1). Deretter senkes den tørre prøven i vann i 24 timer og fjerner prøven fra vannet kalles våtvekt(M2).

Beregning og angivelse av resultater

Vannabsorpsjonen kan da regnes ut ved å bruke formelen under.

$(M_2 - M_1) [g] = \text{Oppsugd vann}$

$$\frac{M_2 - M_1}{M_2} = \text{Vannabsorpsjon i prosen}$$

Der:

M_1 tørrvekt [g]

M_2 våtvekt[g]

Vannabsorpsjon test observasjon

I vannabsorpsjonsforsøket er det som har skjedd at jo mer sand som tilsettes i blandingen, jo mer øker vanninnholdet i prøvene, prismene med 20% PCM viser det som M1:3:20. Mørtlene med PCM-innhold gir tydelig mer plass for vann å trenge inn mellom materialene som utgjorde sementmørtelen.

5.6 Densitet

Hensikt

I henhold til «NS-EN 1015-10 Prøvningsmetoder for mørtel til murverk Del 10: Bestemmelse av tørrdensitet til herdnet mørtel» skal mørtelprøvene tørkes i ovnen ved temperatur på $70\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$, så det skal neddykkes i vann ved $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ til det ikke lenger observeres en økning i den tilsynelatende massen. Dette skal oppnås når to påfølgende veiinger under neddykkingen med 15 min. hensikten med forsøket er at å bestemme tørrdensitet til prøvemørtlene, som kan man nå til densiteten til mørtel uten vanninnhold.

Fremgangsmåte

Prøvemørtlene ble tørket i ovnen ved temperatur på $70\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$, så det ble neddykket i vann ved $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ til det ikke lenger observeres en økning i den tilsynelatende massen. Dette ble oppnådd når to påfølgende veiinger under neddykkingen med 15 min. mellomrom varierer med mindre enn 0,2 masseprosent. Det våte prøvelegemet ble veid etter at overflødig vann ble fjernet ved hjelp av en fuktig klut, og masse $m_{s, \text{sat}}$ i kilogram, avrundet til nærmeste 0,1%, så ble registrert. Så volumet til prøvemørtel ble bestemt ved veiing i vann. Bøylene ble neddykket til samme dybde ved veiing både med og uten prøvemørtlene. Det prøvemørtel ble plassert på

bøyle, så $m_{s,i}$ i kilogram ble registrert mens det er neddykket. Tørrdensiteten til hvert prøvelegeme av mørtel ble beregnet som forholdet mellom registrert masse $m_{s,dry}$ og volum V_s . Totalt ble utført 12 forsøk etter NS-EN 1015-10.

Volumet til prøvelegement i m^3 beregnes etter følgende formel:

$$V_s = \frac{m_{s,sat} - m_{s,i}}{m_{s,dry}}$$

Der:

$m_{s,sat}$ er massen av det mettede prøvelegemet av herdnet mørtel, kilogram (kg)

$m_{s,i}$ er den tilsynelatende massen av det mettede av mørtel neddykket vann, kilogram (kg)

ρ_w er vanntettheten i kilogram per kubikkmeter (kg/m^3)

Beregning og angivelse av resultater

$$\rho(\text{densitet}) = \frac{m_{s,dry}}{V_s}$$

Der:

ρ er densitet i kilogram per kubikkmeter (kg/m^3)

$m_{s,dry}$ er den ovnstørkede massen av prøvelegemet av herdnet mørtel, i kilogram (kg)

V_s er volumet til prøvelegemet av herdnet mørtel, i kubikkmeter (m^3)

Densitet Liste over Utstyr:

- Bøyle
- Oven
- Temperatur måling for vann
- Målings vekt og neddykket bøyle som henger på vekten
- Vann på 20 ± 2



Figur 25-Densitet test-Foto: Yilham.

Tetthet observasjon

Tettheten avhenger av materialets poreinnhold eller materialporøsitet. Under testing av mørtelprismene observeres det at prøvene uten PCM har høyere tetthet. At vi sier at prøvene har mindre porer i hulrom. Prøvene med PCM har lavere tetthet, noe som gjør at jo mer PCM materialet blir lettere å ha mye porer i hulrom.

5.7 Porøsitet (CT-skanning)

Forholdet mellom hulroms volumet og det totale volumet av et materiale er definert som porøsitet og uttrykkes i %. Hule materialer har høy porøsitet. En ny metode for porøsitetsanalyse av kompositte materialer er tredimensjonal(3D) røntgencomputertomografi (CT). Ved bruk av denne maskin man kan statistisk analyse volum av porene. CT-skanning viser at pore størrelsen varierer for prøver med forskjellige sement-til-sand-forhold. Porøsiteten til sementmørtel har en betydelig effekt på dens termiske og fysiske egenskaper.

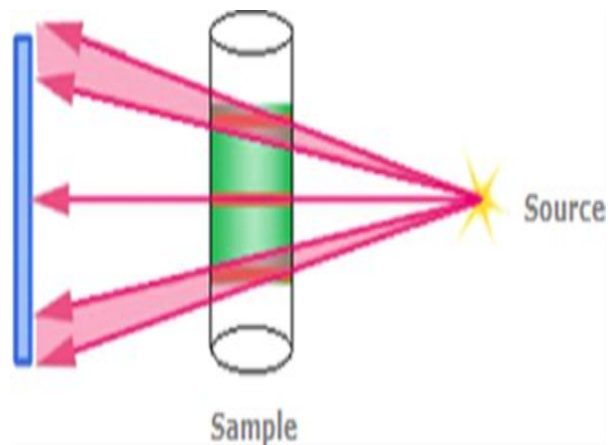
På NTNU B-bygg finnes det METROTOM maskin (Carl Zeiss, Tyskland), som vi brukte til å analysere våre prøver, prøvene ble montert på en polystyrenstøtte CT-skannet. Figuren under viser CT-skanning.

Denne metoden består av følgende hoved trinn:

- CT-skanning av mørtler
- En 3D volumetrisk pore morfologi av multimaterialkompositten som et enkelt materiale
- Bestemmelse av porøsiteten til hvert komponentmateriale
- Statistisk analyse av poreegenskaper.

Metode

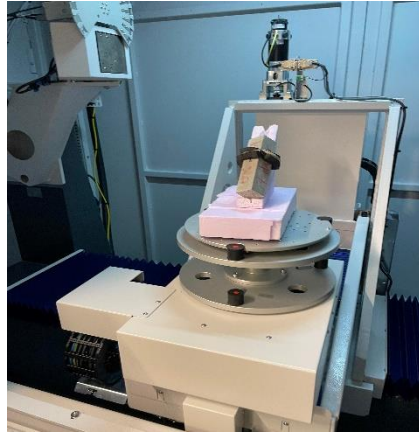
CT-skanner har sterke fordeler for å analysere den indre strukturen til sementholdige materialer, samtidig gir informasjon om indre defekter (dvs. porer), samt visualiserte 3D-anatomiske bilder. Bildeopptak og rekonstruksjon som brukes i CT-skanner for å lage et 3D-bilde av porene inne i betongen. I det første trinnet frikjennes flere 2D-projeksjoner, og deretter brukes tilbake projeksjonsalgoritmen til å rekonstruere det som et 3D-tomografisk bilde [1, 2]. Ytterligere analyse av 3D-bildet gir den volumetriske informasjonen om fast fase og interne defekter basert på 3D volumetriske elementer (voxels). I det tomografiske bildet har en tettere fase en høy røntgendempning og vises som en lys farge, mens en lavtetthetsfase – bestående av luft eller gass – vil fremstå som ganske mørk på grunn av liten røntgendempning. Vanligvis kreves det ingen spesiell forbehandling for prøveforberedelse. Ved hjelp av programvare fra VG studio kan porøsitet analyses. Defekt deteksjons algoritme sammenlignet den potensielle defekten med det lokale nabolaget. Verdien for minimum porestørrelse var ikke mindre enn 8 voxels kantlengder ($2 * 2 * 2$ voxels).



Figur 26-Motode CT-skanner for å lage et 3D-bilde-Foto:

Framgangsmåte

Porøsitetstesten ble utført på tolv prismep prøver, hver med en størrelse på 40 mm x 40 mm x 160 mm etter 28 dagers herding. Et stykke på 40mmx80mm kuttes fra hver prøve. Prøvene tørkes deretter i en ovn ved 105 °C i 24 timer for å fjerne fuktighet. Etterpå legges prøvene i CT-skanning for å beregne porøsitet.



Figur 27-CT-skanning-Foto: Yilham

6 Resultater

6.1 Flow table test resultater

Flow table test utføres for fersk mørtel etter at mørtel er behandlet i blandemaskin. Det tilberedes fire forskjellige mørteloppskrifter (1: 2,1: 3,1: 4 og 1: 5) uten PCM og med PCM i 10 og 20 %. Målet med testen er å finne ut om mørtlene har riktig konsistensnivå, og resultat ligger mellom 177mm -205mm. Testen er utført i henhold til Norsk standard, NS-EN 1015-3: 1999. Testmetoden er beskrevet i delkapittel 5.5.1.

Tabell 5-Under viser at proporsjonene for alle blandinger sammenlignes med C/S, PCM og V/C-forhold.

Blanding ID	PCM (%)	V/C	Tillegg vann(g)	PCM(g)	Flow tabell Test(mm)
M1:2	0	0.42	0	0	180
	10	0.50	50.00	63.95	187
	20	0.57	94.96	127.90	177
M1:3	0	0.50	0	0	180
	10	0.55	22.50	48.88	180
	20	0.61	54.35	97.76	177
M1:4	0	0.64	0	0	205
	10	0.66	5.00	38.98	187
	20	0.68	14.58	77.96	177
M1:5	0	0.75	0	0	200
	10	0.76	0	32.64	187
	20	0.80	12.62	65.28	182

6.2 Bøyefasthet resultater

Bøyefasthet er beregnet i henhold til Norsk standard, NS-EN 196-1: 2016. Tre sementmørtelprøver av hver blanding tester i bøyestyrke og beregnet gjennomsnittsverdi. Testmetoden er beskrevet i delkapittel 5.5.2. Nedenfor viser Tabell et gjennomsnitt av bøyestrekfastheten til mørtelprøvene. Mørtelprøvene uten PCM har høyest bøyestrekfasthet, mens prøvene med PCM har lav bøyefasthet.

Tabell 6-Viser resultater av bøyefasthet i MPa (Gjennomsnitt).

Blandings ID	0% PCM	10% PCM	20% PCM
M1:2	6.74	4.96	4.59
M1:3	7.68	6.96	5.88
M1:4	7.70	7.10	5.95
M1:5	6.90	6.61	5.56

6.3 Trykkfasthet resultater

Det blir gjennomført trykkfasthet i henhold til NS-EN 196-1:2016. Gjennomføring av testen er beskrevet i kapittel 5.5.3. Hensikten med testen er å bestemme holdbarheten til mørtelen ved å sjekke kravene i standarder. Mørtelprøvene skal testes for trykkfasthet etter 28 døgn herdet i vannbasseng. Tabellen nedenfor viser resultatene av mørteltestene i alderen 28 dager og gjennomsnittsverdien av hver blanding.

Tabell 7-Viser resultater av trykkfastheten i MPa (Gjennomsnitt).

Blandings ID	0% PCM	10% PCM	20% PCM
M1:2	32.28	22.18	17.75
M1:3	29.46	21.73	15.83
M1:4	22.02	19.37	15.62
M1:5	19.96	16.95	13.42

Tabellen over viser at vi har fire forskjellige blandinger med 0%, 10%, 20% PCM. Prøvene inneholder 0 % PCM det gir resultater høy trykkfasthet mens resultatene reduseres med 10 % PCM og 20 % PCM.

6.4 Termisk konduktivitet, spesifikk varmekapasitet og diffusivitet resultater

De termiske testene utføres ved hjelp av en Hot Disk-maskin. Formålet med testen er å undersøke prøvens varmeledningsevne, varmekapasitet og diffusivitet. Testmetoden er beskrevet i kapittel 5.5.4. De tabellene nedenfor viser at alle gjennomsnittlige verdiene blir registrert. Det vil si at termisk ledningsevne er i området 0.810 W/(mK) til 1.132 W/(mK) i følge av «resultater av termisk konduktivitet (W/mK) (Gjennomsnitt)» tabellen. Det gjelder for varmekapasiteten er i området 0.4613 (kJ/kg. K) til 0.7726 (kJ/kg. K) i henhold til

varmekapasitetstabellen. Den siste tabellen viser at termiske diffusivitet er i område 0.570 (mm²/s) til 1.010 (mm²/s).

Tabell 8- Viser resultater av termisk konduktivitet (W/mK) (Gjennomsnitt)

Blandings ID (21°)	0% PCM	10% PCM	20% PCM
M1:2	1.132	0.835	0.810
M1:3	1.048	0.988	0.872
M1:4	1.006	0.961	0.826
M1:5	1.057	0.983	0.946

Tabell 9-Viser resultater av varmekapasiteten i (kJ/kg. K) (Gjennomsnitt)

Blandings ID (21°)	0% PCM	10% PCM	20% PCM
M1:2	0.6778	0.7577	0.6704
M1:3	0.5077	0.7726	0.6651
M1:4	0.4613	0.5905	0.5563
M1:5	0.4993	0.5762	0.6376

Tabell 10-Viser resultater av termisk diffusivitet i (mm²/s) (Gjennomsnitt)

Blandings ID (21°)	0% PCM	10% PCM	20% PCM
M1:2	0.790	0.570	0.680
M1:3	0.980	0.630	0.690
M1:4	1.010	0.570	0.790
M1:5	1.010	0.630	0.810

6.5 Vannabsorpsjon resultater

Vannabsorpsjon Testene ble utført på en enkel måte som forklart i delkapittel 5.5.5. Formålet med testen er å bestemme prosentandelen av vannabsorpsjon for disse prøvene. Tabellen nedenfor viser resultatene av vannabsorpsjon i prosentenheter (%).

Tabell 11-Viser Resultater av Vannabsorpsjon i prosent (%) (Gjennomsnitt)

Blandings ID	0% PCM	10% PCM	20% PCM
M1:2	6.72	7.59	8.16
M1:3	7.01	7.03	8.86
M1:4	7.53	7.45	7.55
M1:5	7.98	8.03	8.22

6.6 Densitet resultater

Tettheten avhenger av innholdet av porer i materialet eller porøsiteten til materialet. høy tetthet betyr at materialene er tunge og godt kompakte. Mørtelspesifikasjoner avhenger av mengden komposittmaterialer som sement, sand og vann. Forsøket er utført i henhold til NS-EN 1015-10. Hensikten er bestemmelse av tørrdensitet til herdnet mørtel. Gjennomføring av testen blir beskrevet i delkapittel 5.5.6.

Tabell 12-Viser Tørrtetthet Resultater (Gjennomsnitt)

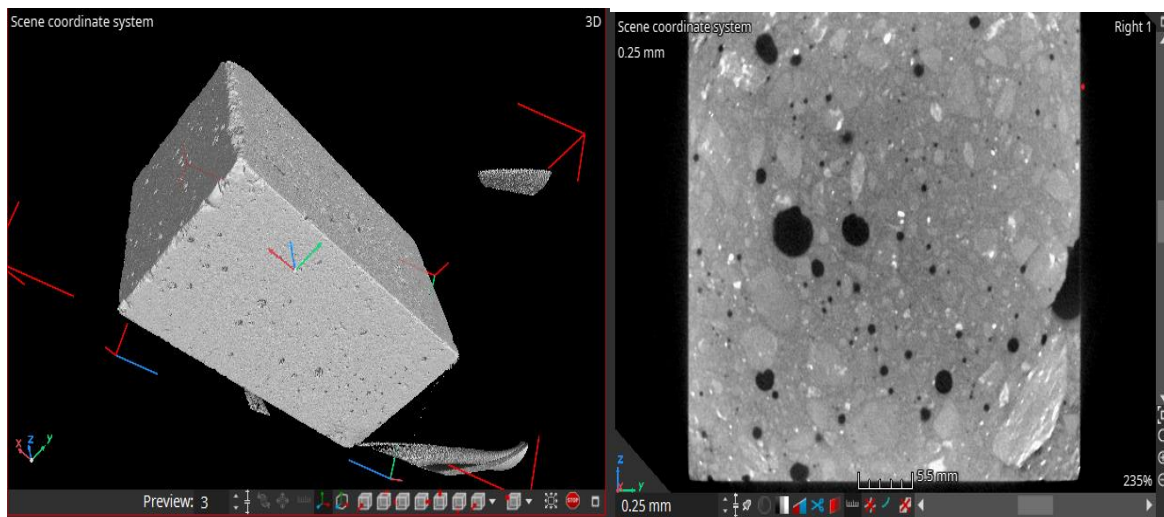
Blandings ID	0% PCM	10% PCM	20% PCM
M1:2	2164.57	1978.20	1767.84
M1:3	2172.24	2045.44	1894.67
M1:4	2189.47	2038.66	1956.99
M1:5	2135.44	1993.36	1931.19

6.7 Porøsitet resultater

Denne tabellen viser porøsitet resultater etter CT-skanning er gjennomgått. Det utføres totalt tolv tester, men hver blanding består av tre resepter med forskjellige PCM innhold 0 %, 10 % og 20 %. Testmetoden er forklart i delkapittel 5.5.7. Hensikten med testen er å bestemme prosentvist volum av porene i mørtlene.

Tabell 13-Viser om porøsiteten av prøvene.

Blandings ID	PCM (%)	Porøsitet (%)
M1:2	0	1.7
	10	2.5
	20	3.4
M1:3	0	1.9
	10	2.7
	20	3.4
M1:4	0	2.1
	10	2.9
	20	3.5
M1:5	0	2.4
	10	3.0
	20	3.5



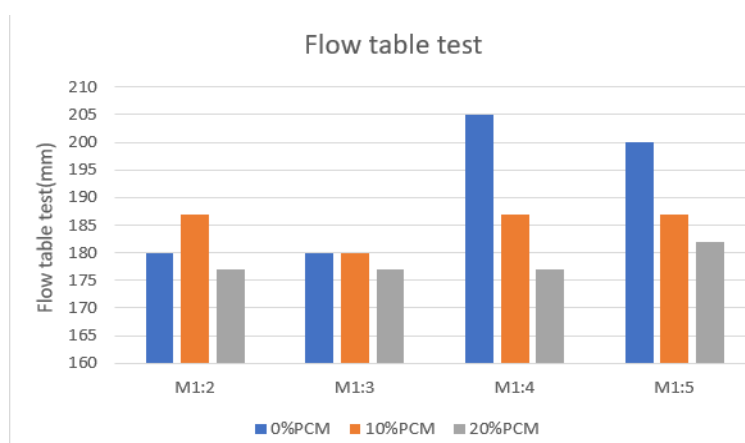
Figur 28-CT-skanning resultat etter 27 dager.

7 Diskusjon og drøft

7.1 Flow table test analyse

Ifølge stolpediagram nedenfor vet vi om fersk mørtel varierer avhengig av V/C-forhold, C/S-forhold og prosentandel av PCM. Det blir høyeste Flow table testen er M1:4 med 0% PCM, samtidig M1:2 med 0% PCM gir den laveste gjennomsnittlige verdien, mens M1:2, M1:4 og M1:5 med 10% PCM har like gjennomsnittlige verdier, med M1:3 med 10% PCM har lavere verdi. Så siste med prøvene med 20% PCM viser at M1:5 er høyest, men M1:2, M1:3 og M1:4 med 20% PCM har like og laveste verdier.

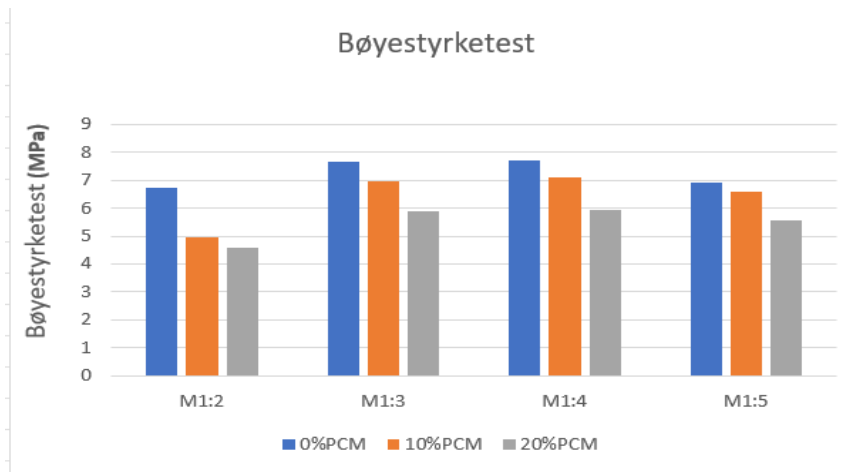
De resultatene viser at sement-sand forhold som påvirker til Flow table testen, ved økning av sand med 0% PCM, blir ferske mørtler mer flytende.



Figur 29-Flow table test analyse.

7.2 Bøyefasthet test analyse

Ifølge grafen nedenfor generelle sett, kan vi si at bøyefasthet øker, ved øking av PCM, det er M1:2 med 0% PCM har minst bøyefasthet, M1:5 med 20% burde være høyest i bøyefastheten, men resultatene på tabellen viser at M1:3 med 20% som har høyeste bøyefastheten.

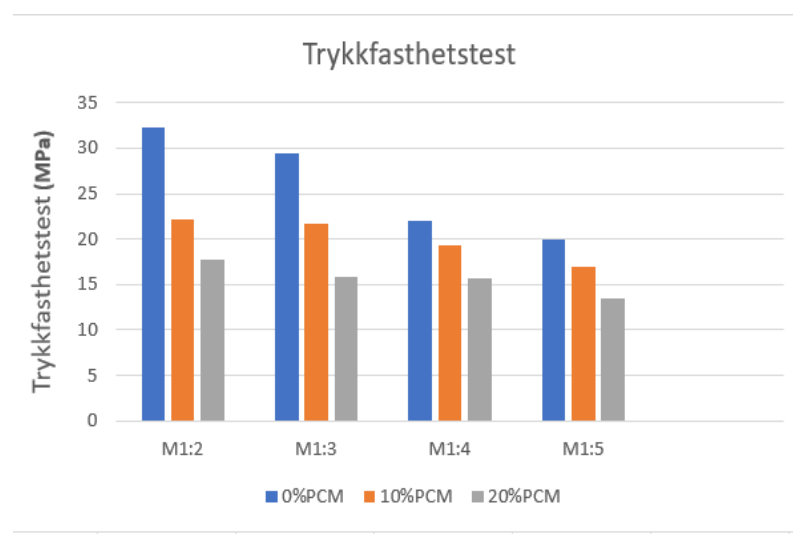


Figur 30-Bøyefasthet test resultater.

7.3 Trykkfasthet test analyse

I følge av diagram nedenfor, får vi vite at blandingen med M1:2 med 0% PCM som har høyeste trykkfasthet 32.28 Mpa og blandingen med M1:5 med 0% har minst trykkfasthet 19.96 Mpa, det vil si, ved øking av sand blandingen, minker trykkfasthet stadig.

Det gjelder blandingen av PCM, kan vi generelt si at med øking av PCM i blandingen, trykk fastheten minker stadig, men når vi sammenligner de to typer blandingene som med 10% og 20%, oppdager vi at økning av PCM fra 10% til 20% i blandingene, minker det trykkfasthet, det betyr M1:2 10%PCM har høyest trykkfasthet, mens M1:5 med 20% PCM har minst trykkfasthet.



Figur 31-Trykktest resultater for mørtel.

7.4 Termisk konduktivitet, spesifikk varmekapasitet og diffusivitet analyser

Prøvene med minustegn prosent viser at varmeledningsevnen øker med temperaturen, blant prøvene er de M1: 5: 10 % PCM med 4,78 % og M1: 4: 20 % PCM med 4,60 %. Mørtelen med minst antall prosent forskjell spesifiserer at dette materialet absorberer og frigjør varmeledningsevnen med nesten samme hastighet både i 21 og 27 grader, i dette tilfellet er det M1:2:10 med 2.87%. Materiale med høy prosentvis forskjell gjør at dette produktet overfører energi ved forskjellige hastigheter i 21 og 27 grader, dette er M1: 3: 20 % PCM med 18.58 %.

Tabell 14-Resultater av termisk konduktivitet (W/mK) (Gjennomsnitt).

Blandings ID (10% PCM)	21°	27°	%
M1:2:10	0.835	0.811	2.87
M1:3:10	0.988	0.875	11.44
M1:4:10	0.961	0.955	0.62
M1:5:10	0.983	1.030	-4.78
Blandings ID (20% PCM)			
M1:2:20	0.810	0.687	15.19
M1:3:20	0.872	0.710	18.58
M1:4:20	0.826	0.864	-4.60
M1:5:20	0.949	0.836	11.91

Prosentandelen representerer reduksjon av varmekapasitet når temperaturen hopper fra 21 til 27 grader. Spesifikk varmekapasitet synker med økende temperatur og avtar litt når tettheten blir høyere. Mørtelen med lavest prosentandel krever nesten like mye energi for å få varmen opp til 27 grader, i dette tilfellet er det M1:2:20 % med 5.73 Men den med høyest prosentandel krever mindre energi for å øke temperaturen fra 21 til 27, For eksempel M1: 3: 10 % PCM med 37 %.

Tabell 15-Resultater av varmekapasiteten i (kJ/kg. K) (Gjennomsnitt).

Blandings ID (10% PCM)	21°	27°	%
M1:2 10	0.7577	0.5061	33.20
M1:3 10	0.7726	0.4818	37.6
M1:410	0.5905	0.4533	23.23
M1:510	0.5762	0.5069	12.03
Blandings ID (20% PCM)			
M1:2 20	0.6704	0.5810	13.34
M1:3 20	0.6651	0.4274	35.74
M1:4 20	0.5563	0.5244	5.73
M1:5 20	0.6376	0.4468	29.92

Det forventes at den termiske diffusiviteten (α) øker når temperaturen øker fra 21° til 27° fordi spesifikk varme (C_p) avtar i denne perioden. Overraskelsen oppstår når den viser store gap-forskjeller mellom prøvene fra den laveste M1:2:20 % PCM økt med bare 02 % og den høyeste som er M1:4:10 % PCM økt med 48 % som er nesten dobbelt så mye.

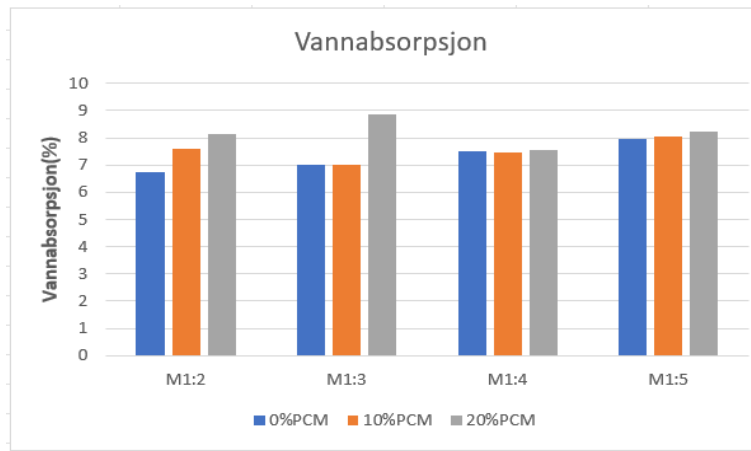
Tabell 16-Resultater av termisk diffusivitet i (m²/s) (Gjennomsnitt)

Blandings ID (10% PCM)	21°	27°	%
M1:2:10	0.570	0.810	29.63
M1:3:10	0.630	0.900	30
M1:4:10	0.570	1.050	45.71
M1:5:10	0.630	1.030	38.83
Blandings ID (20% PCM)			
M1:2:20	0.680	0.700	2.86
M1:3:20	0.690	0.920	25
M1:4:20	0.790	0.840	5.95
M1:5:20	0.810	0.990	18.18

7.5 Vannabsorpsjon test analyse

Etter diskusjon og analyserte dataene indikerer vannopptak en økning samtidig med PCM-innholdet. Årsaken er at når mengden sand øker og PCM, øker porevolumet samtidig, dette gir

vann større tomrom i prøvene. Ut fra stolpediagram nedenfor så er, M1:2:0 er den minste, mens M1:3:20 er den største. Forholdet mellom disse blandinger har økt med 24,15%.



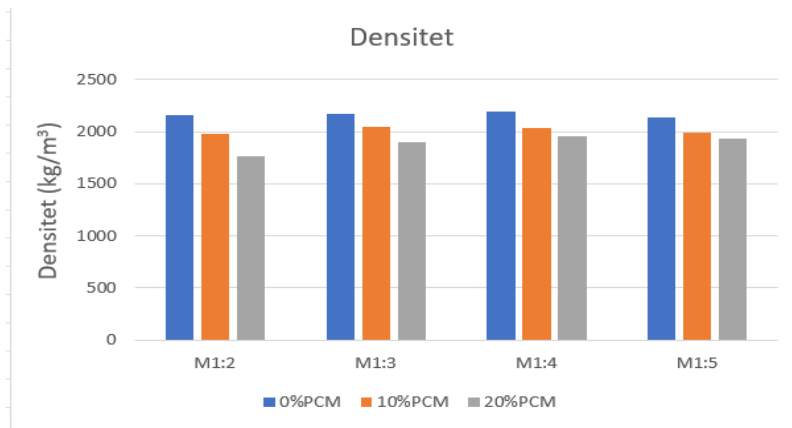
Figur 32- Resultater av vannabsorpsjon .

7.6 Tørr densitet test analyse

Diagrammen viser at med uten PCM har prøvene høyeste densiteter, generelt ved øking av sement -sand forhold med 0% PCM, øker densiteten med 0% PCM, men her burde densiteten til M1:5 med 0% være høyest, men tabellen viser at M1:4 med 0% som har høyeste densiteten med 2189.47 m³/g og M1:5 0% PCM som har minste densiteten.

Densiteten til prøvene øker med 10% PCM, når sement-sand forhold øker, men senker plutselig ved M1:5 med 10%, det vil si at M1:3 og M1:4 med 10% PCM, som har nesten like verdier som er høyeste, mens M1:5 med 10 % PCM, som har minst densitet verdien med 1993.66 m³/g.

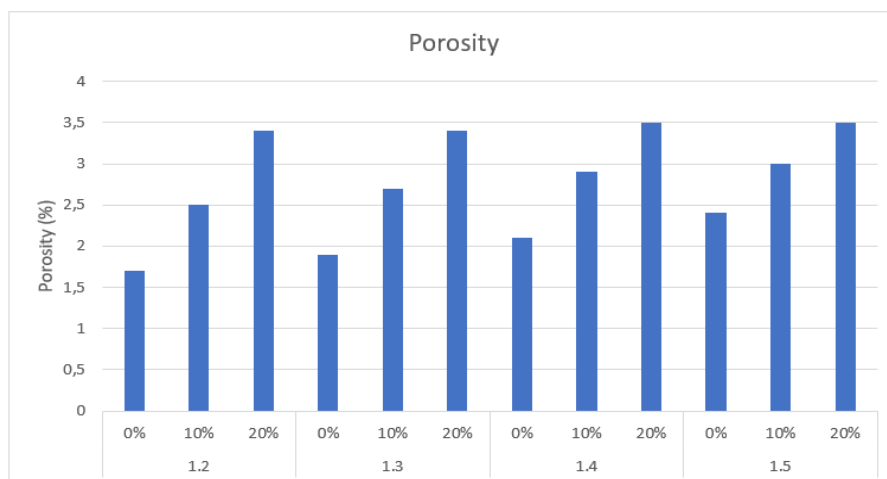
Densiteten til prøvene med 20% øker, ved øking av sement-sand forhold, men M1:5 med 20 % mørtel som burde ha høyst densitet, med tabell viser at prøven M1:4 med 20%, som har høyeste densitet med 1956.99 m³/g, mens M1:2 med 20% har minst densitet med 1767.84 m³/g.



Figur 33- Resultater av densitet.

7.7 Porøsitet test analyse

Diagrammet under viser at porøsitet kan påvirke mekaniske og termiske egenskapene til sementmørtel. Porøsiteten øker med en økning i andelen av PCM, sand og v/c-forhold i mørtlene. Trykksterke og varmeledningsevne blir høy når porøsiteten avtar.



Figur 34- Porøsitet test analyse

7.8 Sammenheng mellom termiske og fysiske/ mekaniske egenskaper til mørtlene.

7.8.1 Bøyefasthet og trykkfasthet

Figurene nedenfor viser bøyefasthet og trykkfasthet til sementmørtler som inneholder gjennomsnitt forskjellige C/S-forhold i alderen 28 dager i vannbad. Det viser seg at M1:2:0% PCM har den laveste bøyestykken med gjennomsnitt verdi på 6.74 Mpa mens prøvene M1:4:0%PCM har den høyeste bøyefastheten med gjennomsnitt verdi på 7.70 Mpa. Samtidig når det gjelder om trykkfasthet prøvene M1:2:0%PCM har høye gjennomsnitt verdi på 32.28 Mpa mens prøvene M1:5:0%PCM har laveste verdi på 19.96 Mpa.

Tabell nedenfor viser at når bøyefasthet og trykkfasthet er høye, blir det termiske konduktivitet og diffusivitet høyere. Samtidig når prøvene har høyere PCM, det blir både bøyefasthet og trykkfasthet mindre.

Tabell 17-Bøyefasthet og trykkfasthet resultater sammenhengen med termiske egenskaper.

Blanding ID	PCM %	Bøyefasthet (MPa)	Trykkfasthet (MPa)	Thermal conductivity (W/mK)		Termisk diffusivitet (m ² /s)	
				21°	27°	21°	27°
M1:2	0	6.72	32.28	1.132	-	0.790	-
	10	7.59	22.18	0.835	0.811	0.570	0.810
	20	8.16	17.75	0.810	0.687	0.680	0.700
M1:3	0	7.01	29.46	1.048	-	0.980	-
	10	7.03	21.73	0.988	0.875	0.630	0.900
	20	8.86	15.83	0.872	0.710	0.690	0.920
M1:4	0	7.53	22.02	1.006	-	1.010	-
	10	7.45	19.37	0.961	0.955	0.570	1.050
	20	7.55	15.62	0.826	0.864	0.790	0.840
M1:5	0	7.98	19.96	1.056	-	1.010	-
	10	8.03	16.95	0.983	1.030	0.630	1.030
	20	8.22	13.42	0.946	0.836	0.810	0.990

7.8.2 Densitet

Tabell nedenfor viser forholdet mellom termiske egenskaper og tetthet av sementmørtel. Resultatene av den termiske konduktivitet øker med ettersom tettheten øker. termisk diffusivitet øker mens tettheten avtar. Det vil si at jo mer PCM i prøvene, jo synkende tetthet av sementmørtlene.

Når vannabsorpsjon minker, så øker tettheten. Det kan være årsaken at jo minkende tetthet gjør at mørtelen får mer hulrom, da vann så ble absorbert av mørtelen blir mer, da øker vannabsorpsjonen til mørtelen. Tettheten er tilstrekkelig høy nok indikerer det at mørtelen er riktig blandet og at sementen holder mikromaterialene fast. Høy porøsitet er en dårlig faktor for mørtelens mekaniske egenskaper. Ved analysering av energi forbruket man kan komme å til kjenne til de termiske egenskapene til sementmørtel.

Tabell 18-Tetthet resultater sammenhengen med de termiske egenskapene.

Blanding ID	PCM (%)	Tetthet (m ³ /g)	Thermal conductivity (W/mK)		Termisk diffusivitet (m ² /s)	
			21°	27°	21°	27°
M1:2	0	2164.57	1.132	-	0.790	-
	10	1978.20	0.835	0.811	0.570	0.810
	20	1767.84	0.810	0.687	0.680	0.700
M1:3	0	2172.24	1.048	-	0.980	-
	10	2045.44	0.988	0.875	0.630	0.900
	20	1894.67	0.872	0.710	0.690	0.920
M1:4	0	2189.47	1.006	-	1.010	-
	10	2038.66	0.961	0.955	0.570	1.050
	20	1956.99	0.826	0.864	0.790	0.840
M1:5	0	2135.44	1.056	-	1.010	-
	10	1993.66	0.983	1.030	0.630	1.030
	20	1931.19	0.946	0.836	0.810	0.990

7.8.3 Vannabsorpsjon og Porøsitet

Vann kan strømme gjennom porøsitetene på overflaten med mindre millimeter inne i mørtelprøvene. Termiske egenskaper på prøvene har sammenheng mellom vannabsorpsjon og porøsitetene til prøvene. Tabell nedenfor viser at den endelige vannabsorpsjonen og termiske

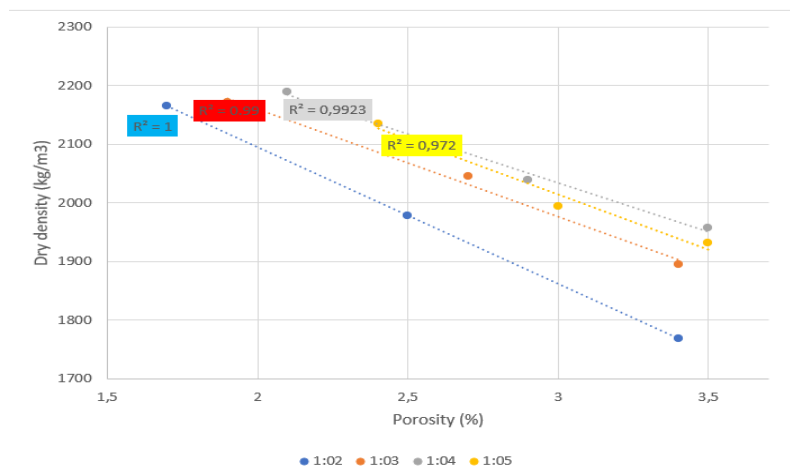
egenskaper av hver blanding typer av mørtlene etter 28 dager. Det er tydelig at de blanding typene som har mer PCM med, har mer vannabsorpsjonen og porøsitet på, samtidig minker termiske konduktivitet og diffusivitet. Tabell (19) viser termiske egenskaper sammenheng med vannabsorpsjon og porøsitet.

Tabell 19-Vannabsorpsjon og porøsitet resultater sammenhengen med de termiske egenskapene.

Blanding ID	PCM %	Vannabsorpsjon (%)	Porøsitet (%)	Thermal conductivity (W/mK)		Termisk diffusivitet (m ² /s)	
				21°	27°	21°	27°
M1:2	0	6.72	1.7	1.132	-	0.790	-
	10	7.59	2.5	0.835	0.811	0.570	0.810
	20	8.16	3.4	0.810	0.687	0.680	0.700
M1:3	0	7.01	1.9	1.048	-	0.980	-
	10	7.03	2.7	0.988	0.875	0.630	0.900
	20	8.86	3.4	0.872	0.710	0.690	0.920
M1:4	0	7.53	2.1	1.006	-	1.010	-
	10	7.45	2.9	0.961	0.955	0.570	1.050
	20	7.55	3.5	0.826	0.864	0.790	0.840
M1:5	0	7.98	2.4	1.056	-	1.010	-
	10	8.03	3.0	0.983	1.030	0.630	1.030
	20	8.22	3.5	0.946	0.836	0.810	0.990

7.8.4 Forholdet mellom tetthet og porøsitet

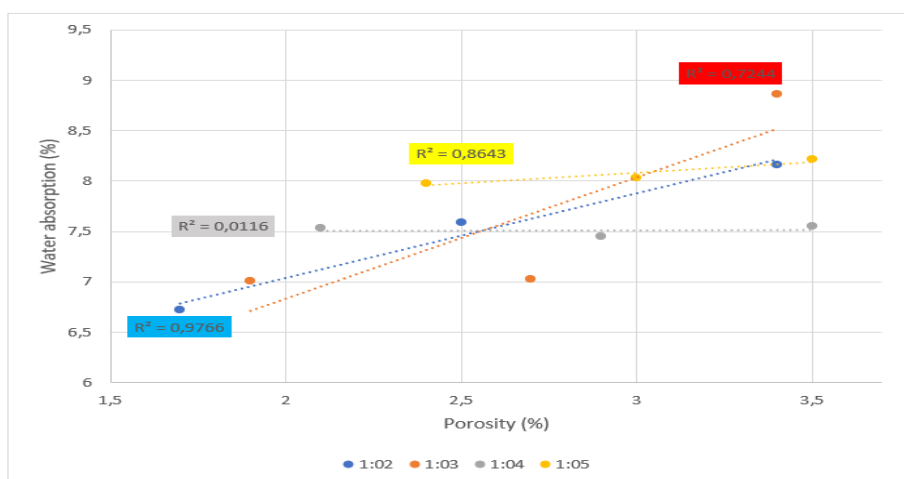
Figuren under viser forholdet mellom tetthet og porøsitet. Ved å se på porøsitetsperspektivet øker tettheten ettersom porerommet minker, det er denne sammenhengen den ene øker mens den andre avtar. Tørr tetthet er relatert til sement-sand-forhold og PCM, ettersom disse elementene øker, reduseres tettheten og vekten av prøvene reduseres.



Figur 35-Forholdet mellom tetthet og porøsitet

7.8.5 Forholdet vannabsorpsjon og porøsitet

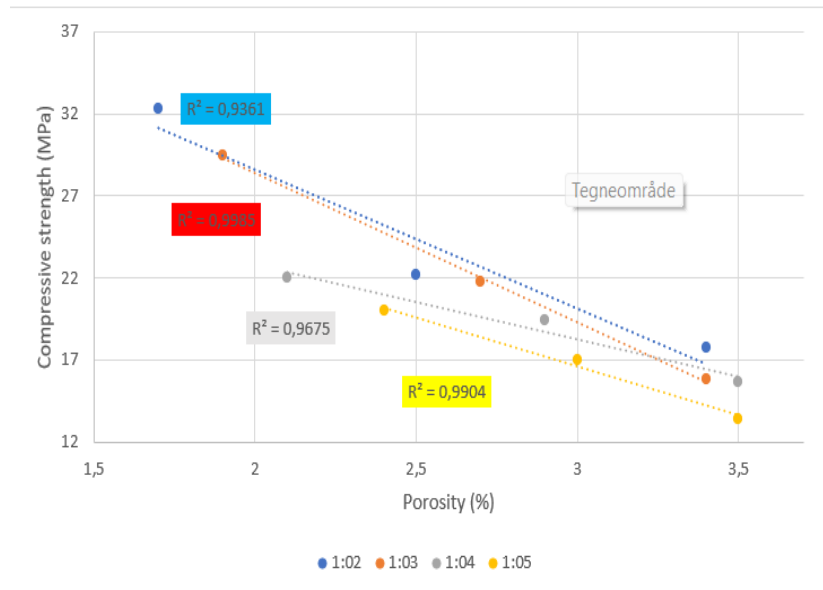
Vannabsorpsjonstest er en viktig test knyttet til holdbarheten til mørtel. Vannabsorpsjon er egenskapen til mørtel å inneholde vann i porene. Forholdet mellom porøsitet og vannabsorpsjon i prosent indikerer at variasjonen i vannabsorpsjon kan forklares med variasjonen i porøsitet. Siden prøvene er mettede, er alle porene fylt med vann, derfor er porevolumet lik volumet av vann i de mettede prøvene. Det viser seg at vannabsorpsjon øker i liten grad med, sementsandforhold og porøsitet. Det viser seg at vannopptaket øker i liten grad med sementsandforhold mens porøsiteten øker mer. Ved M1: 2: 0 er vannabsorpsjonen nesten konstant mens M1: 2: 0 økningen er størst og porøsiteten øker konstant i begge tilfeller.



Figur 36-Forholdet mellom vannabsorpsjon og porøsitet.

7.8.6 Forholdet mellom Trykkfasthet og porøsitet

Ved minking av sand blanding i prøven, øker trykkfasthet, mens porøsiteten minker. Grafikken viser at M1:2 med 0% PCM, som har høyeste trykkfastheten, mens har minste porøsiteten. M1:5 med 20% PCM, har høyeste porøsiteten. Det betyr økning med PCM til prøven, øker porøsiteten, men minker trykkfastheten.

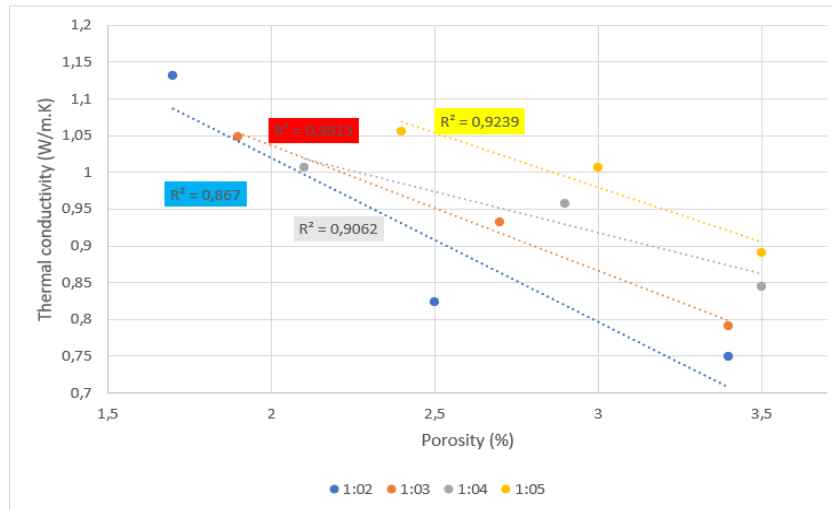


Tabell 20--Forhold mellom trykkfasthet og porøsitet

7.8.7 Forholdet mellom porøsitet og termisk konduktivitet

Porøsitet kan påvirke den termiske ledningsevnen til sementmørtel og PCM-mørtelmaterialer. Sammenhengen mellom porøsitet og varmeledningsevnen til mørtel er presentert i diagram Figur ned. K-verdien til termisk avtar med økende PCM, men varierer med sement-sand-forholdet. årsaken er at PCM har forhold til porøsitet og begge øker samtidig. Prøvene uten PCM har høyere K-verdier og mindre porøsitet, noe som videre gjør at de er tettere og høyeste av dem er M1:2:0 med 1.135.

PCM-mørtlene med 20 % innhold har mindre varmeledningsevne og større hulrom, den minste er M1: 2: 20 med 0,810.

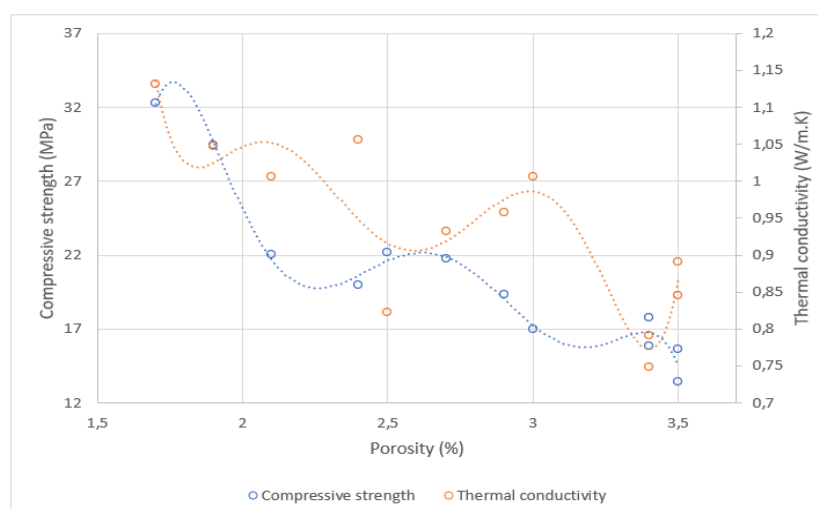


Tabell 21-Forholdet mellom porøsitet og termisk konduktivitet

7.8.8 Forholdet porøsitet, Trykkfasthet og termisk konduktivitet

Volumet av sementmørtel som ikke er sammensatt av fast materiale er porøsitet. Porøsitet kan påvirke mekaniske og termiske egenskapene til prøvene. ved å se det gjennom CT-skanning at den gjennomsnittlige hulroms størrelsen øker i prøvene der sement-til-sand-forholdet øker fra 1:2 til 1:5. PCM spiller også en betydelig rolle fordi porene øker med økningen av PCM, 10 og 20 prosent.

K-verdien til sementmørtel synker på grunn av luftens lave varmeledningsevne, derfor oppstår en reduksjon i varmeledningsevnen når porøsiteten øker. Fordi porøsiteten styrer trykkfastheten til mørtelen med økningen av porøsiteten, vil trykkstyrken til prøven reduseres.



Tabell 22-Forholdet porøsitet, Trykkfasthet og termisk konduktivitet

8 Konklusjon

Det er en viss sammenheng mellom bøyefasthet og trykkfasthet i sementmørtel når det gjelder styrke. Bøyestyrken er størst i prøvene uten tilsatt PCM mens den avtar når PCM-mengden av prøver øker som forventet. Mørtelen med høyest verdi av bøyefasthet er M1,4,0 % uten PCM mens mørtelen med lavest er M1:2:20 % med PCM, forskjellen er 40,39 %. Når det gjelder bøyefasthet er det lite å si på sement- og sand forhold fordi det er variasjon mellom prøvene.

Basert på resultatene ser det ut til at trykkfasthet avtar med økende PCM, årsaken er at PCM reduserer styrken til prismene også. Av dette viser det seg at sement forhold til sand og PCM sier mye om trykkstyrken til alle prøvene, fordi når de to elementene øker, minker trykkstyrken etter mengde. I dette tilfellet er det åpenbart at mørtelen som tåler mest trykkbelastning er M1: 2: 0 uten PCM og den med minst trykkfasthet er M1: 5: 20% med PCM uten tvil, med prosent forskjell på 58.43%. Årsaken er at høy sement lim i mørtelblanding gir mindre vannabsorpsjon og mindre porøsitet som ytterligere gir økt tetthet, derfor er mørtel uten PCM sterkest

Vannabsorpsjon av sementmørtler er proporsjonal med porøsitet fordi disse faktorene reduserer og øker samtidig. PCM og sand øker porøsitetene til mørtler fordi disse materialene gir store tomvolum i prøvene. M1:2: % uten PCM har lavest vannabsorpsjon mens M1:3:20 % med PCM har høyest og prosentvis forskjell er 24,15 %. Fordi permeabilitetene øker med økende masseforhold som er sement-vann forhold, derfor øker også vannmengden.

Det er definitivt forholdet mellom disse tre hovedfaktorene som utgjør tørr tetthet i mørtelproduksjon og disse er masseforhold, porøsitet og vannabsorpsjon. Sementfinhet og type sand kan øke eller minker tettheten, fasthet og varmeutviklingen til mørtelen, men PCM kan påvirke disse egenskapene. De tørre tetthetsreduksjonene avhenger av mengden PCM som tilsettes i mørtlene under blanding. her viser det seg at den tyngste og tetteste mørtelen er M1: 4: 0 % uten PCM, den letteste mørtelen er M1: 2: 20 % med PCM og forskjell er 19.26%.

Den termiske ledningsevnen til materialet er antall watt ledet per meter tykkelse av materialet, prøvene med tett tetthet og mer kompakt leder og overfører varme raskere. Variasjon viser tydelig at den avtar gradvis med økende tilsetning av PCM på 10 og 20 prosent. lavere varmeledningsevne er bedre, dette viser at PCM er effektive materialer fordi mørtlene med 20 % leder mindre varmeenergi. Sammenligner den høyeste M1: 2: 0 og den laveste M1: 20 er det ikke mye forskjell fordi det er bare 28. 45%, men når det gjelder energisparing er dette stor.

En spesifikk varmekapasitet med lav verdi betyr at det ikke krever mye energi å varme fordi prøvene har mindre varmekapasitet. Ved å tilføre varme til et mørtelprisme med lav spesifikk varme vil temperaturen øke mye raskere, grunnen er at varmen blir lettere presset ut, og objektet blir varme. Det viser seg at prøvene uten PCM som har høyere tetthet kommer med lav verdi og den minste er M1: 4:0 med 0.4613.

Spesifikk varmekapasitet refererer til mengden varmeenergi som kreves for å øke temperaturen i en enhet. Jo høyere varmekapasitet et stoff har, jo mer energi kreves det for å øke temperaturen, årsaken er at prøvene har bedre evne til å lagre energi. Her er M1:3:10 med 10 % prosent PCM gir den høyeste verdien på 0,7726.

Termisk diffusivitet er den termiske ledningsevnen delt på tetthet og spesifikk varmekapasitet ved konstant trykk. Den måler et materiales evne til å lede termisk energi i forhold til dets evne til å lagre termisk energi. Høy diffusivitet betyr at varme overføres raskt og en lav termisk diffusivitet begrenser penetrering av varme gjennom et legeme.

prøvene med høy tetthet og varmeledningsevne, har mindre varmekapasitet, er mørtlene uten tilsatt PCM. Sementmørtlene med moderat tetthet og varmeledningsevne, har størst varmekapasitet, er prøvene med 10 % PCM.

I dette tilfellet er prøvene med høy termisk diffusivitet grupper uten PCM, men øker det samme med økt sandinnhold og høyeste er M1: 4: 0% og M1: 5: 0%. legemene i gruppen med 10 % PCM, har lavere verdier og laveste av alle er M1: 2: 10% og M1: 4: 10%.

Studien viser at prismene uten PCM oppfyller trykk kravet, de termiske egenskapene som er varmeledningsevne og diffusivitet er høye, men varmekapasiteten er lav..

Prøvene med 10 % PCM innhold oppfyller trykkkravet bortsett fra M1:5:10 med 16,95 MPa men alle med 20 % PCM er ikke godkjent unntatt M1:2:20 med 17,75 MPa.

Når det gjelder varmeledningsevne, er alle PCM-mørtler med 10 % innhold mellom (0,961 - 0,988 W/mK) bortsett fra M1:2:10 med 0,835 MPa. Alle har lav diffusivitet, bare 0,570 mm² / s og 0,630 mm² / s, men høy varmekapasitet, spesielt M1:2:10 og M1:3: 10 med 0,7577 kJ/kgK og 0,7726 kJ/kgK. Sementmørtlene med 20 % innhold har K-verdier som ligger mellom (0,810-0,872 W/mk) kun M1: 5: 20 som avviker med 0,946 W/mk. Diffusiviteten er mellom (0,680-0,810 mm² / s) og varmekapasiteten er mellom (0,5563-0,6704 kJ/kgK), men uansett de med 20% er ikke GODKJENT.

9 Litteraturliste

1-Iman Asadi, Payam Shafigh, Zahiruddin Fitri Bin Abu Hassan, Norhayati Binti Mahyuddin. Thermal conductivity of concrete. *Journal of Building Engineering* 20 (2018) 81-93.

2-Sarra Drissi, Tung Chai Ling, Kim Hung Mo, Anissa Eddhahak. A review of microencapsulated and composite phasechange materials: Alteration of strength and thermalproperties of cement-based materials. *Renewable and sustainable Energy Reviews* 110 (2019) 467-484.

3-Milan Ostry, Halime O.Paksoy,PavelCharva.Review on using microencapsulated phase change materials (PCM) in building applications.*Energy and buidings* 106(2015)134-155.

4-Payam Shafigha, Iman Asadi, Norhayati Binti Mahyuddin. Concrete as a thermal mass material for building applications. *Journal of Building Engineering* 19 (2018)14-25.

5-Shafigh, P.; Asadi, I.; Akhiani, A.R.; Mahyuddin, N.B.; Hashemi, M. (2020) Thermal properties of cement mortar with different mix proportions. *Mater. Construcc.* 70 [339], e224 <https://doi.org/10.3989/mc.2020.09219>

6-Magne MAAGE, M. 2015a.*Betong: regelverk, teknologi og utførelse, Oslo, Byggenæringens forlag.*

7-Magne MAAGE, M. 2015b.*Betong: regelverk, teknologi og utførelse, Oslo, Byggenæringens forlag.*

8-Bjørn Normann Sandaker, Malvin Sandvik, Bjørn Vik ,2003, *Materialkunnskap, Lillestrøm, Byggenæringens Forlag.*

9-Jon Kosny,2015chapter 3. *PCM-Enhanced Building Components, Manchester UK.*

10-Mehling. Cabeza, 2008.*Heat and cold Storage with PCM, Berlin.*

11- [Norcem Industrisement | Norcem](#)

12-[Sikkerhetsblad_Norcem.pdf \(dyroybetong.no\)](#)

13-[Eylüllab Test Cihazları \(eylullab.com\)](#)

14-[Søkeresultater | standard.no](#)

15-572.221 Pussmørtler. Typer og egenskaper - Byggforskserien

16-770.007 Eldre byggevarer. Sement, betong, betongprodukter, mørtler, naturstein og keramiske produkter - Byggforskserien

17-Use of phase change material (PCM) for the improvement of thermal performance of cold storage ([medcraveonline.com](#))

- 18-Pcm egenskaper – Kopi.pdf
- 19-RSER-2007-11-9Kensarinsolarenergystorage.pdf
- 20-Phase-Change-Materials-BioPCMs-vs-Salt-Hydrates.pdf (phasechange.com)
- 21-Inkorporere PCM-aktivert termisk energilagring i 3D-utskrivbare sementiøse kompositter - sssScienceDirect
- 22-Termiske og mekaniske egenskaper av strukturell lett betong som inneholder lette aggregater og fly-asje cenospheres - ScienceDirect
- 23-Materialer for faseendring (madhavuniversity.edu.in)
- 24-Forskjell mellom latent varme og spesifikk varme 2022 (esdifferent.com)
- 25-produktdatablad_ind_ensidig_revmars2021.pdf
- 26-produktinfo_industrisement_endretjuli2016_2.pdf
- 27-Norcem | Industrisement
- 28-Sikkerhetsblad_Norcem.pdf (dyroybetong.no)
- 29-Withers, P.J., et al., X-ray computed tomography. Nature Reviews Methods Primers, 2021. 1(1): p. 1-21.
- 30-Landis, E.N. and D.T. Keane, X-ray microtomography. Materials characterization, 2010. 61(12): p. 1305-1316.

10 Vedlegg

Vedlegg 1-Tabeller for Proporsjoner fersk mørtel

Tabell 23-Mengde av tilsatt delmaterialer-0%PCM.

Blanding ID	W/C	Cement (g)	Sand (g)	Water (g)	D-Flow Table Test(mm)
M1:2					
A	0.42	639.50	1290.00	270.30	180
B	0.42	639.50	1290.00	270.30	170
C	0.42	639.50	1290.00	270.30	190
Gjennomsnitt					180
M1:3					
A	0.50	488.80	1466.60	244.40	185
B	0.50	488.80	1466.60	244.40	180
C	0.50	488.80	1466.60	244.40	175
Gjennomsnitt					180
M1:4					
A	0.64	389.80	1559.40	250.60	200
B	0.64	389.80	1559.40	250.60	210
C	0.64	389.80	1559.40	250.60	205
Gjennomsnitt					205
M1:5					
A	0.75	326.40	1626.60	246.90	190
B	0.75	326.40	1626.60	246.90	210
C	0.75	326.40	1626.60	246.90	200
Gjennomsnitt					200

Tabell 24-Mengde av tilsatt delmaterialer-10%PCM.

Blanding ID	V/C	cement[g]	Sand [g]	Vann [g]	Ekstra vann [g]	10%PCM [g]	Flow Table Test [mm]
M1:2:10%PCM							
A	0.50	639.50	1290.00	270.30	50	63.95	190
B	0.49	639.50	1290.00	270.30	40	63.95	180
C	0.49	639.50	1290.00	270.30	45.08	63.95	190
Gjennomsnitt							187
1:3: 10%PCM							
A	0.55	488.80	1490.00	244.40	22.50	48.88	180
B	0.55	488.80	1490.00	244.40	24.50	48.88	180
C	0.55	488.80	1490.00	244.40	24.80	48.88	180
Gjennomsnitt							180
1:4: 10%PCM							
A	0.66	389.80	1559.40	250.60	5.00	38.98	190
B	0.65	389.80	1559.40	250.60	2.50	38.98	190
C	0.65	389.80	1559.40	250.60	2.50	38.98	180
Gjennomsnitt							187
1:5: 10%PCM							
A	0.76	326.40	1626.60	246.90	0	32.64	190
B	0.76	326.40	1626.60	246.90	0	32.64	180
C	0.76	326.40	1626.60	246.90	0	32.64	190
Gjennomsnitt							187

Tabell 25-Mengde av tilsatt delmaterialer-20%PCM.

Blanding ID	V/C	Cement[g]	Sand [g]	Vann [g]	Ekstra vann[g]	20% PCM [g]	Flow Table Test [mm]
M1:2:20% PCM							
A	0.57	639.50	1290.00	270.30	94.96	127.90	180
B	0.55	639.50	1290.00	270.30	80.00	127.90	170
C	0.56	639.50	1290.00	270.30	87.50	127.90	180
Gjennomsnitt							177
M1:3:20 % PCM							
A	0.61	488.80	1466.60	244.40	54.35	97.76	170
B	0.63	488.80	1466.60	244.40	63.15	97.76	180
C	0.63	488.80	1466.60	244.40	63.12	97.76	180
Gjennomsnitt							177
M1:4:20 % PCM							
A	0.68	389.80	1559.40	250.60	14.58	77.96	170
B	0.70	389.80	1559.40	250.60	20.52	77.96	180
C	0.69	389.80	1559.40	250.60	20.00	77.96	180
Gjennomsnitt							177
M1:5:20 % PCM							
A	0.80	326.40	1626.60	246.90	12.62	65.28	180
B	0.79	326.40	1626.60	246.90	12.31	65.28	180
C	0.79	326.40	1626.60	246.90	12.26	65.28	185
Gjennomsnitt							182

Vedlegg 2 -Resultater av bøyefasthet og trykkefasthet i MPa.

Tabell 26-Bøyefasthet resultater sementmørtel 0% PCM.

Blanding ID	F_f Bøyestyrketest [KN]	l Lengde [mm]	b bredde [mm]	$R_f = \frac{1.5 \times F_f \times l}{b^3}$ (MPa)
M1:2				
B ₁	2.966	100	40	6.95
B ₂	2.840	100	40	6.66
B ₃	2.817	100	40	6.60
Gjennomsnitt				6.74
M1:3				
B ₁	2.801	100	40	6.56
B ₂	3.568	100	40	8.36
B ₃	3.466	100	40	8.12
Gjennomsnitt				7.68
M1:4				
B ₁	3.456	100	40	8.10
B ₂	3.211	100	40	7.53
B ₃	3.190	100	40	7.48
Gjennomsnitt				7.70
M1:5				
B ₁	2.793	100	40	6.55
B ₂	2.990	100	40	7.01
B ₃	3.048	100	40	7.14
Gjennomsnitt				6.90

Tabell 27-Bøyefasthet resultater sementmørtel 10% PCM.

Blanding ID	F_f Bøyestyrketest [KN]	l Lengde[mm]	B Bredde[mm]	$R_f = \frac{1.5 \times F_f \times l}{b^3}$ [Mpa]
1:2: 10%PCM				
B ₁	1.917	100	40	4.49
B ₂	1.889	100	40	4.43
B ₃	2.543	100	40	5.96
Gjennomsnitt				4.96
1:3: 10%PCM				
B ₁	2.918	100	40	6.84
B ₂	3.146	100	40	7.37
B ₃	2.842	100	40	6.66
Gjennomsnitt				6.96
1:4: 10%PCM				
B ₁	2.948	100	40	6.91
B ₂	3.155	100	40	7.39
B ₃	2.984	100	40	6.99
Gjennomsnitt				7.10
1:4: 10%PCM				
B ₁	2.980	100	40	6.98
B ₂	2.787	100	40	6.53
B ₃	2.702	100	40	6.33
Gjennomsnitt				6.61

Tabell 28-Bøyefasthet resultater sementmørtel 20% PCM.

Blanding ID	F_f Bøyestyrketest [KN]	l Lengde[mm]	B Bredde[mm]	$R_f = \frac{1.5 \times F_f \times l}{b^3}$ [Mpa]
M1:2:20				
B ₁	1.993	100	40	4.67
B ₂	1.912	100	40	4.48
B ₃	1.965	100	40	4.61
Gjennomsnitt				4.59
M1:3:20				
B ₁	2.500	100	40	5.86
B ₂	2.422	100	40	5.68
B ₃	2.609	100	40	6.11
Gjennomsnitt				5.88
M1:4:20				
B ₁	2.391	100	40	5.60
B ₂	2.514	100	40	5.89
B ₃	2.719	100	40	6.37
Gjennomsnitt				5.95
M1:5:20				
B ₁	2.525	100	40	5.92
B ₂	2.376	100	40	5.57
B ₃	2.465	100	40	5.78
Gjennomsnitt				5.56

Tabell 29-Trykkfasthet resultater sementmørtel 0% PCM.

Blanding ID	$F_{CB,1}$ [KN]	l [mm]	b [mm]	$R_{cx.1} = \frac{Fc}{l \times b}$ [MPa]	$F_{CB,2}$ [KN]	l [mm]	b [mm]	$R_{cx.2} = \frac{Fc}{l \times b}$ [MPa]	$\frac{(R_{cx.1} + R_{cx.2})}{2}$ [MPa]
M1:2									
B ₁	109.42	85	40	32,18	98.96	75	40	32,89	32.54
B ₂	99.74	80	40	31,17	104.72	80	40	32,73	31.95
B ₃	107.92	85	40	31,74	98.79	75	40	32,93	32.34
Gjennomsnitt									32.28
M1:3									
B ₁	88.56	84	40	26.36	86.89	76	40	28.58	27.47
B ₂	96.03	80	40	30.01	93.44	80	40	29.20	29.61
B ₃	97.67	93	40	26.26	97.32	67	40	36.31	31.29
Gjennomsnitt									29.46
M1:4									
B ₁	71.62	82	40	21.84	71.49	78	40	22.91	22.38
B ₂	67.56	82	40	20.62	70.24	78	40	22.51	21.57
B ₃	71.23	80	40	22.38	69.93	80	40	21.85	22.12
Gjennomsnitt									22.02
M1:5									
B ₁	62.45	84	40	18.59	61.34	76	40	20.34	19.47
B ₂	61.45	83	40	18.51	59.81	77	40	19.42	18.97
B ₃	61.06	73	40	20.91	60.69	87	40	21.99	21.45
Gjennomsnitt									19.96

Tabell 30-het resultater sementmørtel 10% PCM.

Blanding ID (10%PCM)	$F_{CB,1}$ [KN]	l [mm]	b [mm]	$R_{cx.1} = \frac{Fc}{l \times b}$ [Mpa]	$F_{CB,1}$ [KN]	l [mm]	b [mm]	$R_{cx.1} = \frac{Fc}{l \times b}$ [Mpa]	$\frac{(R_{cx.1} + R_{cx.2})}{2}$ [Mpa]
M1:2									
B ₁	69.95	70	40	24.98	69.43	90	40	19.29	22.14
B ₂	68.95	80	40	21.55	70.89	80	40	22.15	21.85
B ₃	72.84	75	40	24.29	70.71	85	40	20.80	22.55
Gjennomsnitt									22.18
M1:3									
B ₁	69.81	75	40	21.28	70.43	85	40	20.71	21.00
B ₂	70.09	80	40	21.90	69.38	80	40	21.74	21.82
B ₃	72.88	82	40	22.22	70.26	78	40	22.52	22.37
Gjennomsnitt									21.73
M1:4									
B ₁	62.70	76	40	20.63	62.58	84	40	18.63	19.63
B ₂	60.00	70	40	21.43	61.64	90	40	17.12	19.28
B ₃	61.91	75	40	20.63	60.34	85	40	17.74	19.19
Gjennomsnitt									19.37
M1:5									
B ₁	54.15	80	40	16.92	53.24	80	40	16.64	16.78
B ₂	54.75	81	40	16.90	54.10	79	40	17.12	17.01
B ₃	54.26	70	40	19.38	53.14	90	40	14.76	17.07
Gjennomsnitt									16.95

Tabell 31-Trykkfasthet resultater sementmørtel 20% PCM.

Blanding ID (20%PCM)	$FC_{B,1}$ [KN]	l [mm]	b [mm]	$Rcx.1 = \frac{Fc}{l \times b}$ [Mpa]	$FC_{B,1}$ [KN]	l [mm]	b [mm]	$Rcx.1 = \frac{Fc}{l \times b}$ [Mpa]	$\frac{(Rc_{x,1} + Rc_{x,2})}{2}$ [Mpa]
M1:2									
B ₁	56.40	76	40	18.55	57.34	84	40	17.07	17.81
B ₂	56.23	73	40	19.26	56.42	87	40	16.21	17.74
B ₃	55.95	85	40	16.46	56.79	75	40	18.93	17.70
Gjennomsnitt									17.75
M1:3									
B ₁	49.43	83	40	14.89	49.24	77	40	15.99	15.44
B ₂	50.06	78	40	16.04	50.67	82	40	15.45	15.75
B ₃	52.88	80	40	16.53	51.36	80	40	16.05	16.29
Gjennomsnitt									15.83
M1:4									
B ₁	48.50	84	40	14.43	50.01	76	40	16.45	15.44
B ₂	50.05	75	40	16.68	50.33	85	40	14.80	15.74
B ₃	49.76	83	40	14.99	50.48	77	40	16.39	15.69
Gjennomsnitt									15.62
M1:5									
B ₁	43.12	78	40	13.82	43.94	82	40	13.40	13.61
B ₂	42.57	80	40	13.30	42.72	80	40	13.35	13.33
B ₃	42.84	81	40	13.22	42.36	79	40	13.41	13.32
Gjennomsnitt									13.42

Vedlegg 3-Talleller viser resultater av termiske konduktivitet, spesifikt heat kapasitet og diffusivitet.

Sample ID	Temperature	Th. Conductivity	Th. Diffusivity	Spec. Heat
1:2:0% PCM, A ₁	21,0 °C	1,110 W/mK	0,90 mm ² /s	1,2265 MJ/m ³ K
1:2:0% PCM, A ₂	21,0 °C	1,180 W/mK	0,86 mm ² /s	1,3792 MJ/m ³ K
1:2:0% PCM, A ₃	21,0 °C	1,108 W/mK	0,62 mm ² /s	1,7956 MJ/m ³ K
1:3:0% PCM, A ₁	21,0 °C	1,054 W/mK	1,16 mm ² /s	0,9114 MJ/m ³ K
1:3:0% PCM, A ₂	21,0 °C	0,944 W/mK	1,02 mm ² /s	0,9265 MJ/m ³ K
1:3:0% PCM, A ₃	21,0 °C	1,145 W/mK	0,78 mm ² /s	1,4708 MJ/m ³ K
1:4:0% PCM, A ₁	21,0 °C	1,074 W/mK	0,90 mm ² /s	1,1954 MJ/m ³ K
1:4:0% PCM, A ₂	21,0 °C	0,945 W/mK	1,14 mm ² /s	0,8306 MJ/m ³ K
1:4:0% PCM, A ₃	21,0 °C	1,001 W/mK	1,00 mm ² /s	1,0036 MJ/m ³ K
1:5:0% PCM, A ₁	21,0 °C	1,096 W/mK	1,10 mm ² /s	0,9952 MJ/m ³ K
1:5:0% PCM, A ₂	21,0 °C	1,010 W/mK	1,13 mm ² /s	0,8972 MJ/m ³ K
1:5:0% PCM, A ₃	21,0 °C	1,062 W/mK	0,81 mm ² /s	1,3063 MJ/m ³ K
Gjennomsnitt1:2:0% PCM,A	21,0 °C	1,132 W/mK	0,79 mm ² /s	1,4671 MJ/m ³ K
Gjennomsnitt1:3:0% PCM,A	21,0 °C	1,048 W/mK	0,98 mm ² /s	1,1029 MJ/m ³ K
Gjennomsnitt1:4:0% PCM,A	21,0 °C	1,006 W/mK	1,01 mm ² /s	1,0099 MJ/m ³ K
Gjennomsnitt1:5:0% PCM,A	21,0 °C	1,056 W/mK	1,01 mm ² /s	1,0662 MJ/m ³ K

Figur 37-Termiske egenskaper resultater 0%PCM med 21 °C.

Sample ID	Temperature	Th. Conductivity	Th. Diffusivity	Spec. Heat
1:2:10% PCM, A ₁	21,0 °C	0,864 W/mK	0,55 mm ² /s	1,5782 MJ/m ³ K
1:2:10% PCM, A ₂	21,0 °C	0,855 W/mK	0,71 mm ² /s	1,2041 MJ/m ³ K
1:2:10% PCM, A ₃	21,0 °C	0,787 W/mK	0,46 mm ² /s	1,7140 MJ/m ³ K
1:3:10% PCM, A ₁	21,0 °C	0,906 W/mK	0,66 mm ² /s	1,3697 MJ/m ³ K
1:3:10% PCM, A ₂	21,0 °C	0,994 W/mK	0,60 mm ² /s	1,6512 MJ/m ³ K
1:3:10 % PCM, A ₃	21,0 °C	1,063 W/mK	0,62 mm ² /s	1,7203 MJ/m ³ K
1:4:10% PCM, A ₁	21,0 °C	0,924 W/mK	0,55 mm ² /s	1,1006 MJ/m ³ K
1:4:10 % PCM, A ₂	21,0 °C	1,008 W/mK	0,71 mm ² /s	1,3163 MJ/m ³ K
1:4:10% PCM, A ₃	21,0 °C	0,951 W/mK	0,46 mm ² /s	1,1949 MJ/m ³ K
1:5:10% PCM, A ₁	21,0 °C	0,988 W/mK	0,66 mm ² /s	1,1030 MJ/m ³ K
1:5:10% PCM, A ₂	21,0 °C	1,048 W/mK	0,60 mm ² /s	1,3319 MJ/m ³ K
1:5:10% PCM, A ₃	21,0 °C	0,914 W/mK	0,62 mm ² /s	1,0113 MJ/m ³ K
Gjennomsnitt1:2:10% PCM,A	21,0 °C	0,835 W/mK	0,57 mm ² /s	1,4988 MJ/m ³ K
Gjennomsnitt1:3:10% PCM,A	21,0 °C	0,988 W/mK	0,63 mm ² /s	1,5804 MJ/m ³ K
Gjennomsnitt1:4:10% PCM,A	21,0 °C	0,961 W/mK	0,57 mm ² /s	1,2039 MJ/m ³ K
Gjennomsnitt1:5:10% PCM,A	21,0 °C	0,983 W/mK	0,63 mm ² /s	1,1487 MJ/m ³ K

Figur 38-Termiske egenskaper resultater 10%PCM med 21 °C.

Sample ID	Temperature	Th. Conductivity	Th. Diffusivity	Spec. Heat
1:2:20% PCM, A ₁	21,0 °C	0,635 W/mK	0,58 mm ² /s	1,0912 MJ/m ³ K
1:2:20% PCM, A ₂	21,0 °C	0,713 W/mK	0,72 mm ² /s	0,9854 MJ/m ³ K
1:2:20% PCM, A ₃	21,0 °C	1,081 W/mK	0,73 mm ² /s	1,4751 MJ/m ³ K
1:3:20% PCM, A ₁	21,0 °C	0,799 W/mK	0,71 mm ² /s	1,1244 MJ/m ³ K
1:3:20% PCM, A ₂	21,0 °C	0,887 W/mK	0,69 mm ² /s	1,2853 MJ/m ³ K
1:3:20% PCM, A ₃	21,0 °C	0,929 W/mK	0,68 mm ² /s	1,3708 MJ/m ³ K
1:4:20% PCM, A ₁	21,0 °C	0,809 W/mK	0,76 mm ² /s	1,0607 MJ/m ³ K
1:4:20% PCM, A ₂	21,0 °C	0,935 W/mK	0,66 mm ² /s	1,4262 MJ/m ³ K
1:4:20% PCM, A ₃	21,0 °C	0,734 W/mK	0,94 mm ² /s	0,7793 MJ/m ³ K
1:5:20% PCM, A ₁	21,0 °C	1,129 W/mK	0,75 mm ² /s	1,5017 MJ/m ³ K
1:5:20% PCM, A ₂	21,0 °C	0,936 W/mK	0,65 mm ² /s	1,4327 MJ/m ³ K
1:5:20% PCM, A ₃	21,0 °C	0,773 W/mK	1,02 mm ² /s	0,7597 MJ/m ³ K
Gjennomsnitt1:2:20% PCM,A	21,0 °C	0,810 W/mK	0,68 mm ² /s	1,1839 MJ/m ³ K
Gjennomsnitt1:3:20% PCM,A	21,0 °C	0,872 W/mK	0,69 mm ² /s	1,2602 MJ/m ³ K
Gjennomsnitt1:4:20% PCM,A	21,0 °C	0,826 W/mK	0,79 mm ² /s	1,0887 MJ/m ³ K
Gjennomsnitt1:5:20% PCM,A	21,0 °C	0,946 W/mK	0,81 mm ² /s	1,2314 MJ/m ³ K

Figur 39-Termiske egenskaper resultater 20%PCM med 21 °C.

Sample ID	Temperature	Th. Conductivity	Th. Diffusivity	Spec. Heat
1:2:10% PCM, A ₁	27,0 °C	0,822 W/mK	0,80 mm ² /s	1,0309 MJ/m ³ K
1:2:10% PCM, A ₂	27,0 °C	0,788 W/mK	0,78 mm ² /s	1,0101 MJ/m ³ K
1:2:10% PCM, A ₃	27,0 °C	0,823 W/mK	0,85 mm ² /s	0,9629 MJ/m ³ K
1:3:10 % PCM, A ₁	27,0 °C	0,590 W/mK	0,94 mm ² /s	0,6257 MJ/m ³ K
1:3:10% PCM, A ₂	27,0 °C	1,082 W/mK	0,88 mm ² /s	1,2341 MJ/m ³ K
1:3:10 % PCM, A ₃	27,0 °C	0,953 W/mK	0,87 mm ² /s	1,0966 MJ/m ³ K
1:4:10 % PCM, A ₁	27,0 °C	0,937 W/mK	1,18 mm ² /s	0,7957 MJ/m ³ K
1:4:10 % PCM, A ₂	27,0 °C	0,991 W/mK	1,05 mm ² /s	0,9421 MJ/m ³ K
1:4:10% PCM, A ₃	27,0 °C	0,938 W/mK	0,91 mm ² /s	1,0344 MJ/m ³ K
1:5:10% PCM, A ₁	27,0 °C	1,055 W/mK	0,93 mm ² /s	1,1397 MJ/m ³ K
1:5:10% PCM, A ₂	27,0 °C	1,031 W/mK	1,18 mm ² /s	0,8758 MJ/m ³ K
1:5:10 % PCM, A ₃	27,0 °C	1,002 W/mK	0,99 mm ² /s	1,0160 MJ/m ³ K
Gjennomsnitt1:2:10% PCM,A	27,0 °C	0,811 W/mK	0,81 mm ² /s	1,0013 MJ/m ³ K
Gjennomsnitt1:3:10% PCM,A	27,0 °C	0,875 W/mK	0,90 mm ² /s	0,9855 MJ/m ³ K
Gjennomsnitt1:4:10% PCM,A	27,0 °C	0,955 W/mK	1,05 mm ² /s	0,9241 MJ/m ³ K
Gjennomsnitt1:5:10% PCM,A	27,0 °C	1,030 W/mK	1,03 mm ² /s	1,0105 MJ/m ³ K

Figur 40-Termiske egenskaper resultater 10%PCM med 27 °C.

Sample ID	Temperature	Th. Conductivity	Th. Diffusivity	Spec. Heat
1:2:20% PCM, A ₁	27,0 °C	0,590 W/mK	0,78 mm ² /s	0,7569 MJ/m ³ K
1:2:20% PCM, A ₂	27,0 °C	0,711 W/mK	0,51 mm ² /s	1,4025 MJ/m ³ K
1:2:20% PCM, A ₃	27,0 °C	0,760 W/mK	0,83 mm ² /s	0,9184 MJ/m ³ K
1:3:20% PCM, A ₁	27,0 °C	0,624 W/mK	1,07 mm ² /s	0,5850 MJ/m ³ K
1:3:20% PCM, A ₂	27,0 °C	0,727 W/mK	1,01 mm ² /s	0,7215 MJ/m ³ K
1:3:20% PCM, A ₃	27,0 °C	0,779 W/mK	0,69 mm ² /s	1,1225 MJ/m ³ K
1:4:20% PCM, A ₁	27,0 °C	0,877 W/mK	0,83 mm ² /s	1,0508 MJ/m ³ K
1:4:20% PCM, A ₂	27,0 °C	0,868 W/mK	0,89 mm ² /s	0,9709 MJ/m ³ K
1:4:20% PCM, A ₃	27,0 °C	0,848 W/mK	0,80 mm ² /s	1,0570 MJ/m ³ K
1:5:20% PCM, A ₁	27,0 °C	0,822 W/mK	1,18 mm ² /s	0,6967 MJ/m ³ K
1:5:20% PCM, A ₂	27,0 °C	0,787 W/mK	0,87 mm ² /s	0,9030 MJ/m ³ K
1:5:20% PCM, A ₃	27,0 °C	0,900 W/mK	0,91 mm ² /s	0,9885 MJ/m ³ K
Gjennomsnitt1:2:10% PCM,A	27,0 °C	0,687 W/mK	0,70 mm ² /s	1,0259 MJ/m ³ K
Gjennomsnitt1:3:10% PCM,A	27,0 °C	0,710 W/mK	0,92 mm ² /s	0,8097 MJ/m ³ K
Gjennomsnitt1:4:10% PCM,A	27,0 °C	0,864 W/mK	0,84 mm ² /s	1,0262 MJ/m ³ K
Gjennomsnitt1:5:10% PCM,A	27,0 °C	0,836 W/mK	0,99 mm ² /s	0,8628 MJ/m ³ K

Figur 41-Termiske egenskaper resultater 20%PCM med 27 °C.

Tabell 32-Resultater av termisk diffusivitet.

Blanding ID (PCM%)	Specific Heat 21°(C _p)	Specific Heat 27°(C _p)	Density(ρ) [kg/m ³]	SHC= $\frac{C_p}{\rho} * 1000$ 21°	SHC= $\frac{C_p}{\rho} * 1000$ 27°
M1:2:0	1.4671		2164.57	0.6778	
M1:3:0	1.1029		2172.24	0.5077	
M1:4:0	1.0099		2189.47	0.4613	
M1:5:0	1.0662		2135.44	0.4993	
M1:2:10	1.4988	1.0013	1978.20	0.7577	0.5061
M1:3:10	1.5804	0.9855	2045.44	0.7726	0.4818
M1:4:10	1.2039	0.9241	2038.66	0.5905	0.4533
M1:5:10	1.1487	1.0105	1993.66	0.5762	0.5069
M1:2:20	1.1839	1.0259	1765.84	0.6704	0.5810
M1:3:20	1.2602	0.8097	1894.67	0.6651	0.4274
M1:4:20	1.0887	1.0262	1956.99	0.5563	0.5244
M1:5:20	1.2314	0.8628	1931.19	0.6376	0.4468

Vedlegg 4-Vannabsorpsjon, Densitet og porøsitet -CT-skanning

Tabell 33- Vannabsorpsjon resultater sementmørtel 0% PCM.

Blanding ID	Etter 28 dager i vann[g] M	Etter 24timer tørr[g] 105° M1	Etter 24 timer i vann[g] M2	Absorpsjon= (M2- M1) [g]	Absorpsjon = $\frac{(M2-M1)}{M1} * 100\%$
M1:2					
C₁	574.77	532.47	570.37	37.90	7.12
C₂	591.43	551.49	587.10	35.61	6.46
C₃	589.06	548.31	584.38	36.07	6.58
Gjennomsnitt					6.72
M1:3					
C₁	588.30	545.10	583.80	38.70	7.10
C₂	587.31	544.65	582.55	37.90	6.96
C₃	585.61	542.98	580.86	37.88	6.98
Gjennomsnitt					7.01
M1:4					
C₁	583.24	539.04	577.70	38.66	7.17
C₂	586.46	539.21	580.65	41.44	7.67
C₃	578.48	531.20	572.36	41.16	7.75
Gjennomsnitt					7.53
M1:5					
C₁	576.63	528.78	571.73	42.95	8.12
C₂	574.67	527.66	569.49	41.83	7.93
C₃	578.36	531.51	573.41	41.90	7.88
Gjennomsnitt					7.98

Tabell 34-Vannabsorpsjon resultater sementmørtel 10% PCM.

Blanding ID (10%PCM)	Etter 28 dager i vann[g] M	Etter 24 timer tørr[g] 105° M1	Etter 24 timer i vann[g] M2	Absorpsjon= (M2- M1) [g]	Absorpsjon = $\frac{(M2-M1)}{M1} * 100\%$
M1:2					
C ₁	542.38	496.90	535.11	38.21	7.69
C ₂	547.55	502.69	540.37	37.68	7.50
C ₃	543.62	498.62	536.35	37.73	7.57
Gjennomsnitt					7.59
M1:3					
C ₁	564.03	521.43	557.76	36.33	7.00
C ₂	560.03	517.95	553.65	35.70	6.90
C ₃	561.28	517.60	554.75	37.15	7.18
Gjennomsnitt					7.03
M1:4					
C ₁	546.57	502.67	540.11	37.44	7.45
C ₂	544.10	500.66	537.97	37.31	7.45
C ₃	549.29	505.25	543.08	37.83	7.45
Gjennomsnitt					7.45
M1:5					
C ₁	543.83	497.70	537.43	39.73	7.98
C ₂	545.52	498.52	538.68	40.16	8.06
C ₃	546.92	499.97	540.15	40.16	8.04
Gjennomsnitt					8.03

Tabell 35-Vannabsorpsjon resultater sementmørtel 20% PCM.

Blanding ID	28 dager i vann[g] M	24 timer i oven[g] 105° M1	24 timer i vann[g] M2	Absorpsjon= (M2- M1) [g]	Absorpsjon = $\frac{(M2-M1)}{M1} * 100\%$
M1:2					
C ₁	524.08	475.96	514.98	39.02	8.20
C ₂	522.37	474.74	513.47	38.73	8.16
C ₃	524.04	476.46	515.15	38.69	8.12
Gjennomsnitt					8.16
M1:3					
C ₁	525.05	475.05	517.09	42.04	8.85
C ₂	526.08	475.72	517.99	42.27	8.89
C ₃	530.09	479.56	521.89	42.33	8.83
Gjennomsnitt					8.86
M1:4					
C ₁	541.16	496.48	533.72	37.24	7.50
C ₂	538.97	494.51	531.92	37.41	7.56
C ₃	547.32	501.44	539.50	38.06	7.59
Gjennomsnitt					7.55
M1:5					
C ₁	539.04	490.84	531.28	40.44	8.24
C ₂	537.75	489.73	529.96	40.23	8.21
C ₃	541.34	493.03	533.53	40.50	8.21
Gjennomsnitt					8.22

Tabell 36-Densitets resultater med 0% PCM.

Etter oven		Neddykket i vann etter 15 min										
Blanding ID	m _{s,dry}	C°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M1:2:0 C1	542.44	21	544.90	559.60	562.90	565.20	566.80	567.90				
				M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)
				0.85	0.58	0.4	0.28	0.19				
M1:3:0 C1	553.92	21	564.50	569.20	572.80	575.6	577.80	579.50	580.80	581.60		
				M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)
				0.83	0.63	0.48	0.38	0.29	0.22	0.14		
M1:4:0 C1	547.06	21	555.80	560.40	564	566.77	569.20	571.20	573	574.40	575.50	
				M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)
				0.83	0.64	0.47	0.43	0.35	0.32	0.24	0.19	
M1:5 :0 C1	536.85	21	544.60	548,70	552	554.80	557.30	559.30	561.10	562.80	564.30	566.60
				M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)
				0.75	0.60	0.50	0.45	0.36	0.32	0.30	0.27	0.19

Tabell 37-Densitets resultater med 10% PCM.

Etter oven		Neddykket i vann etter 15 min										
Blanding ID	m _{s,dry}	C°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M1:2:10 C1	506.22	20	517.20	521.10	523.80	525.80	527.40	528.70	529.70			
				M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)
				0.75	0.52	0.38	0.30	0.25	0.19			
M1:3:10 C1	528.95	20	541.40	546.20	549.10	551.40	552.90	554	554.80			
				M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)
				0.89	0.53	0.42	0.27	0.198	0.14			
M1:4: 10 C1	509.46	20	521.40	526.40	529.80	532.30	534.20	535.60	536.70	537.50		
				M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)
				0.96	0.65	0.47	0.36	0.26	0.21	0.15		
M1:5:10 C1	504.32	20	518.90	524.40	527.90	530.50	532.40	533.60	534.70	535.40		
				M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)
				1.06	0.67	0.49	0.36	0.23	0.21	0.13		

Tabell 38- Densitets resultater med 20%PCM.

Etter oven		Neddykket i vann etter 15 min											
Blanding ID	$m_{s,dry}$	C°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
M1:2:20 C1	485.40	20	496.50	500.30	503	505	506.60	507.80	508.90	509.60			
				M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)
				0.76	0.54	0.40	0.32	0.24	0.22	0.14			
M1:3: 20 C1	483.33	20	497	502.20	505.70	508.20	510	511.40	512.50	513.30			
				M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	
				1.05	0.70	0.49	0.35	0.27	0.22	0.16			
M1:4:20 C1	503.73	20	515	519.30	522.30	524.60	526.40	527.70	528.90	529.70			
				M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	
				0.83	0.58	0.44	0.34	0.25	0.23	0.13			
M1:5:20 C1	497.86	20	512.10	517.10	520.50	522.90	524.60	526.10	527.20	528			
				M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	M (%)	
				0.98	0.66	0.46	0.33	0.29	0.21	0.15			

Tabell 39-Densitets resultater med 0%PCM.

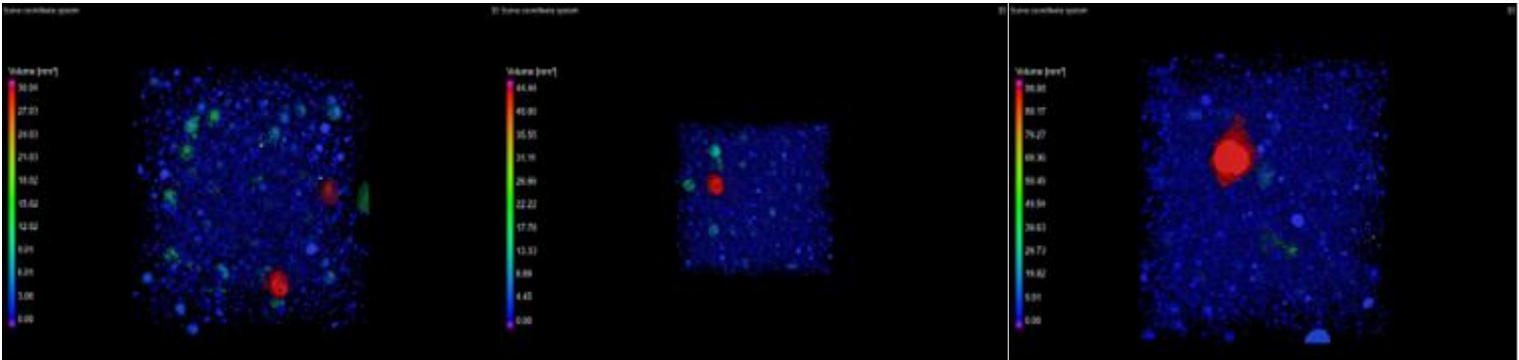
Blanding ID	PCM (%)	$m_{s,dry}$ [g]*10 ⁻³	$m_{s,sat}$ [g]*10 ⁻³	$M_{s,i}$ [g]*10 ⁻³	V_s [mm ³]*10 ⁻⁹	ρ (densitet) [kg/m ³]
M1:2C ₁	0	542,44	567,90	317,30	250600	2164.57
M1:3C ₁	0	553,92	581,60	326,60	255000	2172.24
M1:4C ₁	0	547,06	575,50	322,90	252600	2189.47
M1:5C ₁	0	536,85	566,60	315,20	251400	2135.44

Tabell 40-Densitets resultater med 10%PCM

Blanding ID	PCM (%)	$m_{s,dry}$ [g]*10 ⁻³	$m_{s,sat}$ [g]*10 ⁻³	$M_{s,i}$ [g]*10 ⁻³	V_s [mm ³]*10 ⁻⁹	ρ (densitet) [kg/m ³]
M1:2C ₁	10	506.22	529.70	273.80	255900	1978.20
M1:3C ₁	10	528.95	554.80	296.20	258600	2045.44
M1:4C ₁	10	509.46	537.50	287.60	249900	2038.66
M1:5C ₁	10	504.32	535.40	282.40	253000	1993.36

Tabell 41-Tabell 36: Densitet resultater sementmørtel 20% PCM.

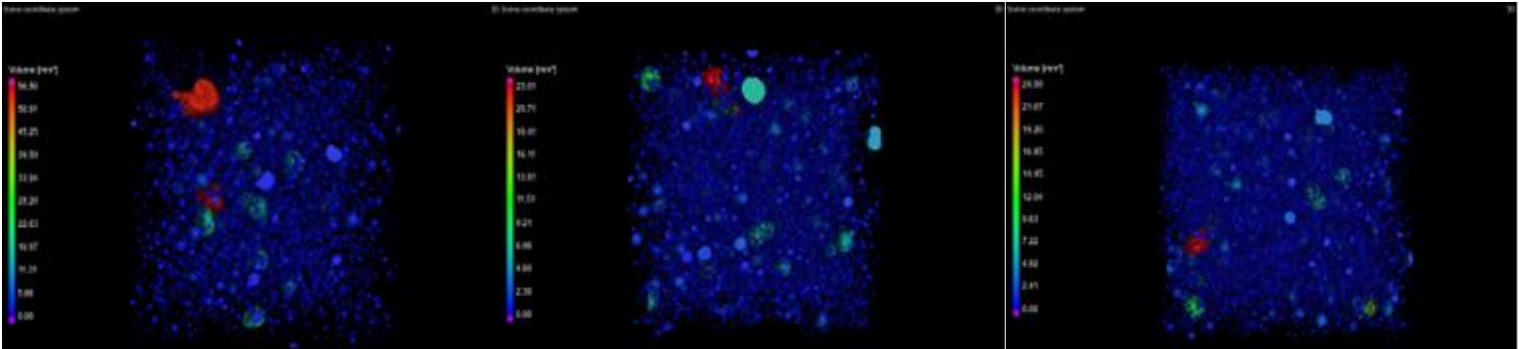
Blanding ID	PCM (%)	$m_{s,dry}$ [g]*10 ⁻³	$m_{s,sat}$ [g]*10 ⁻³	$M_{s,i}$ [g]*10 ⁻³	V_s [mm ³]*10 ⁻⁹	ρ (densitet) [kg/m ³]
M1:2C ₁	20	485.40	509.60	250.30	259300	1767.84
M1:3C ₁	20	483.33	513.30	258.20	255100	1894.67
M1:4C ₁	20	503.73	529.70	272.30	257400	1956.99
M1:5C ₁	20	497.86	528.00	270.20	257800	1931.19



1.2.0

1.2.10

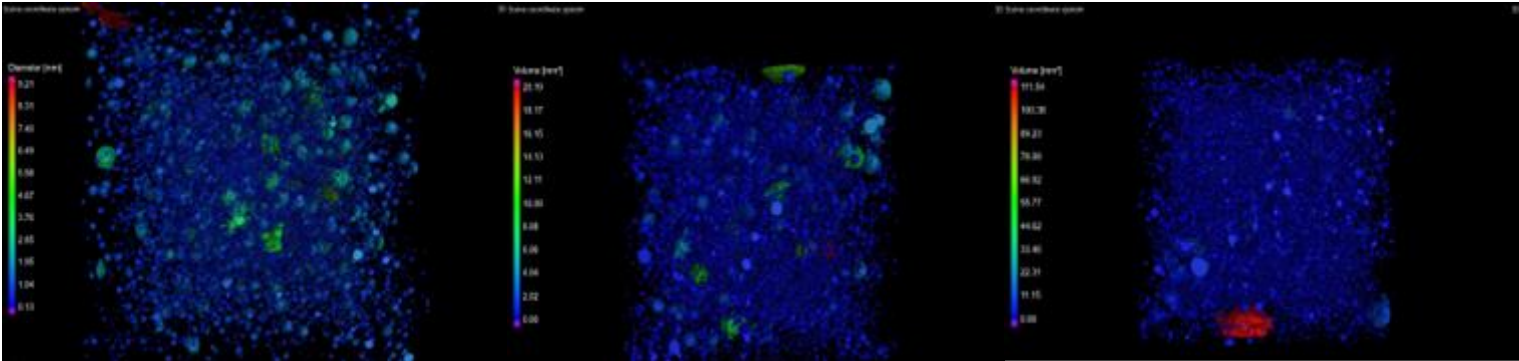
1.2.20



1.3.0

1.3.10

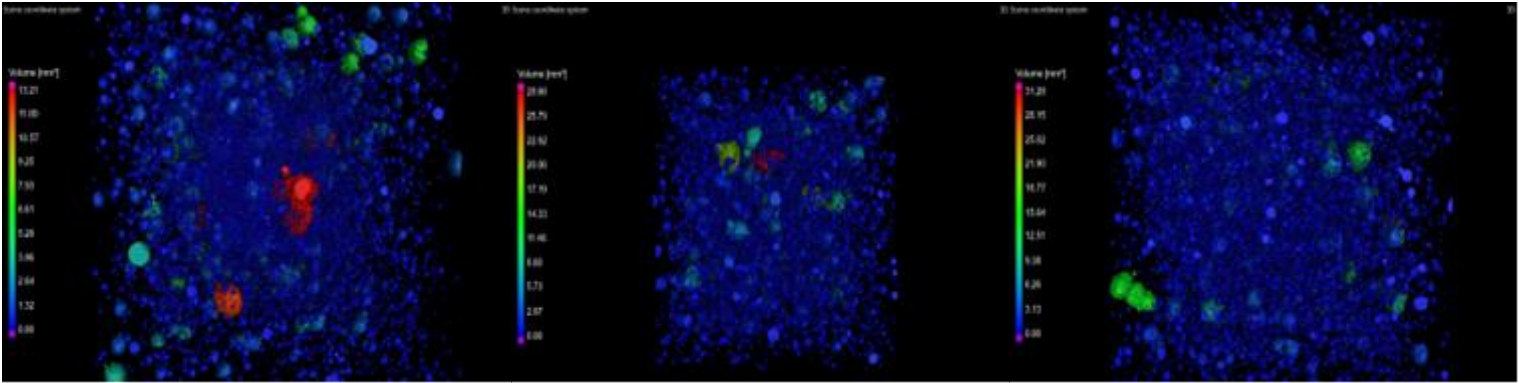
1.3.20



1.4.0

1.4.10

1.4.20

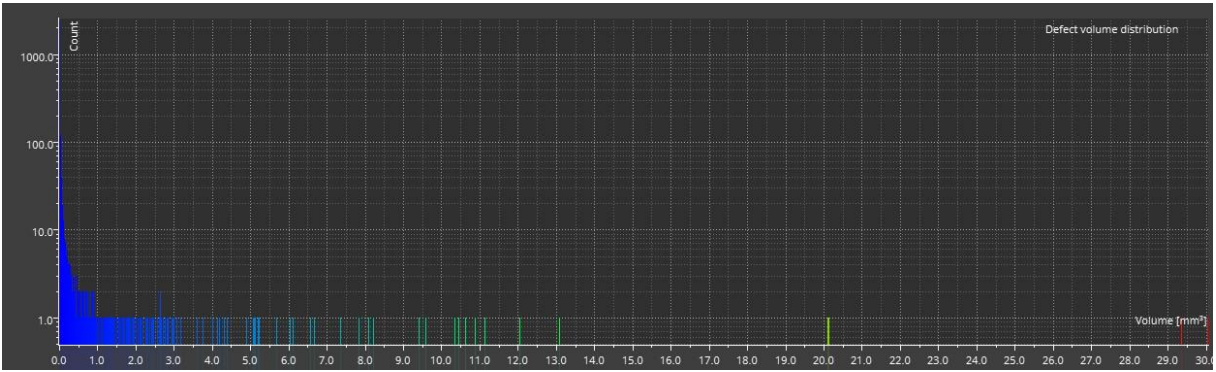


1.5.0

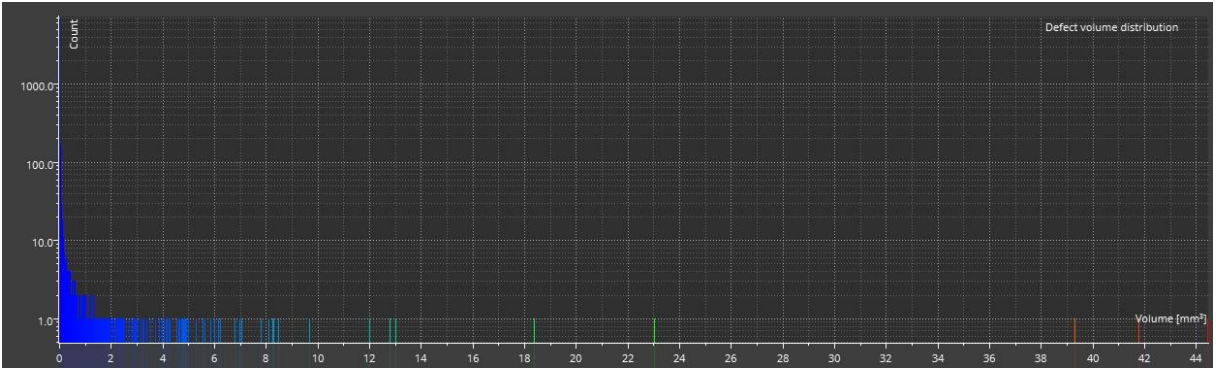
1.5.10

1.5.20

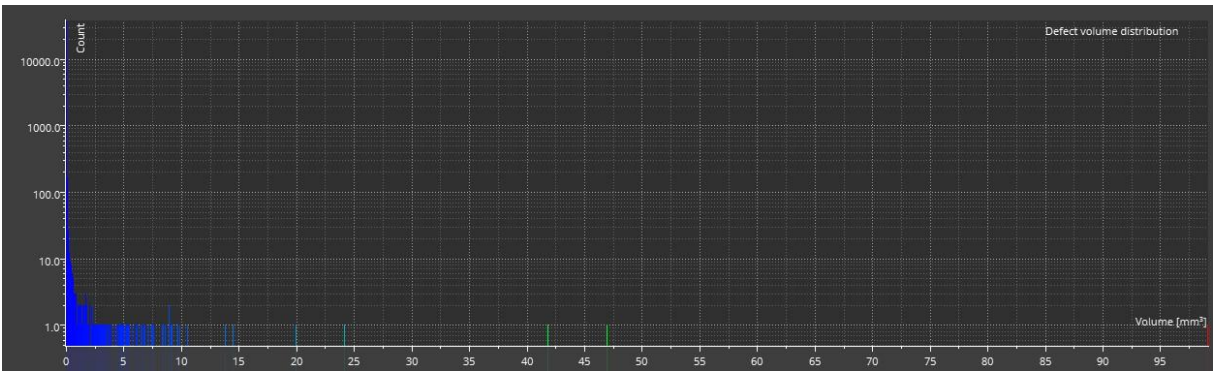
Tabell 42-Visualisering av luft hullfordelingen basert på volum i forskjellige prøver



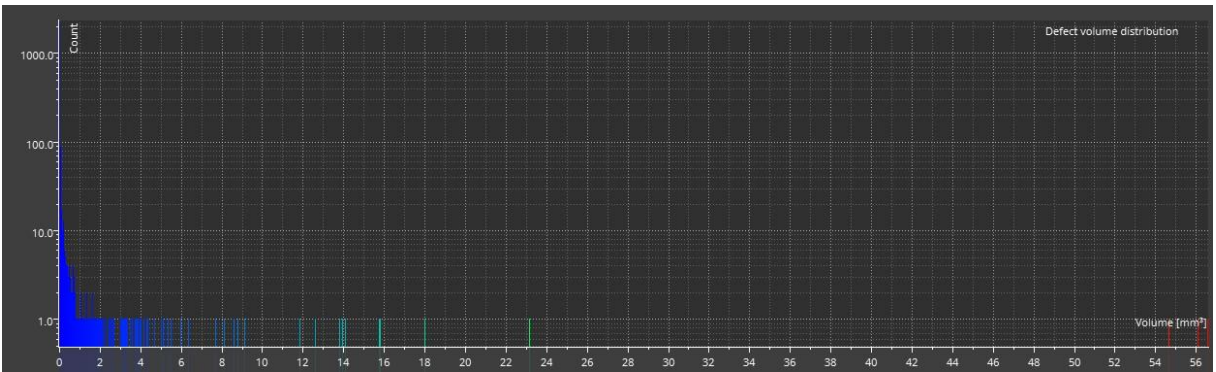
1.2.0



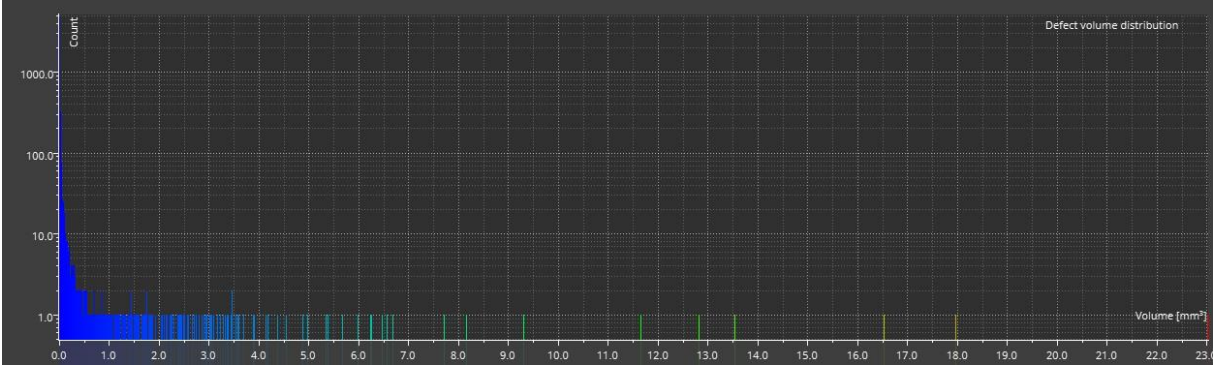
1.2.10



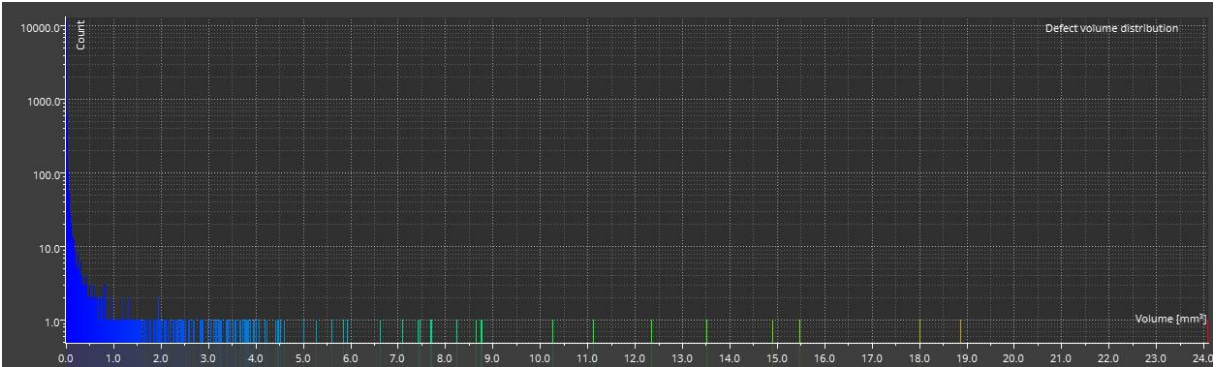
1.2.20



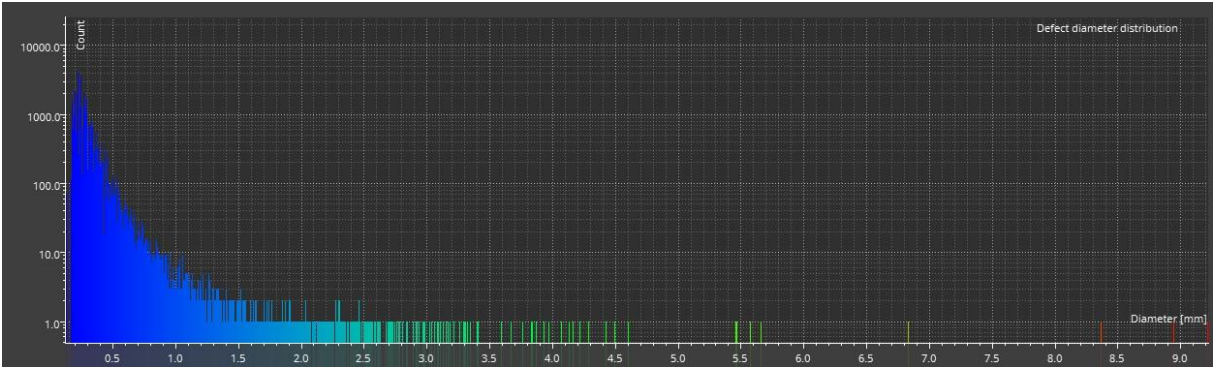
1.3.0



1.3.10



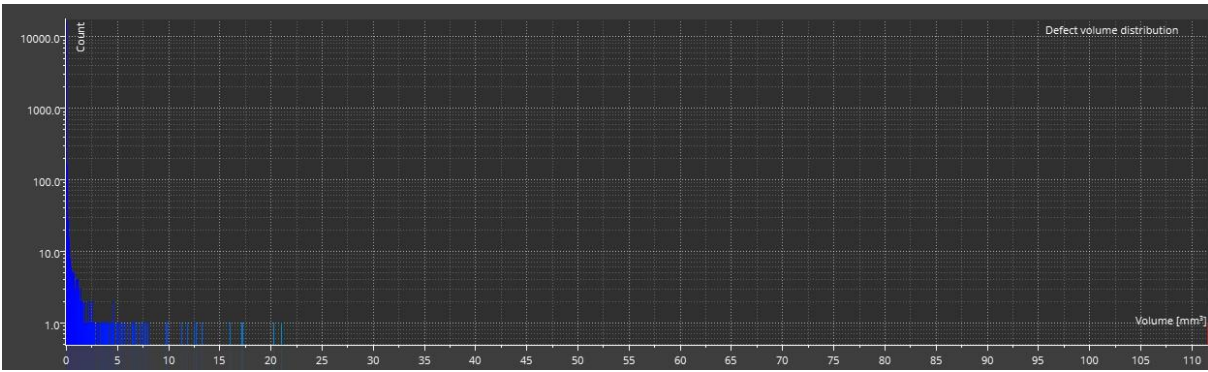
1.3.20



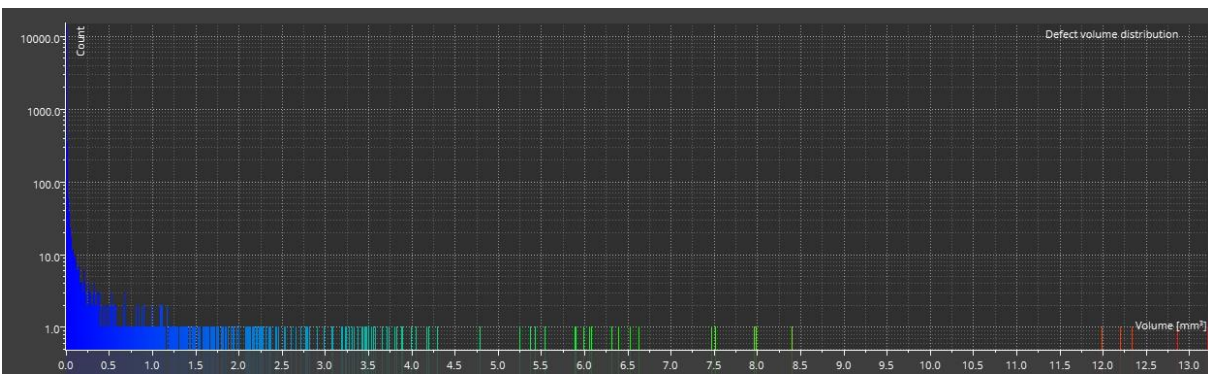
1.4.0



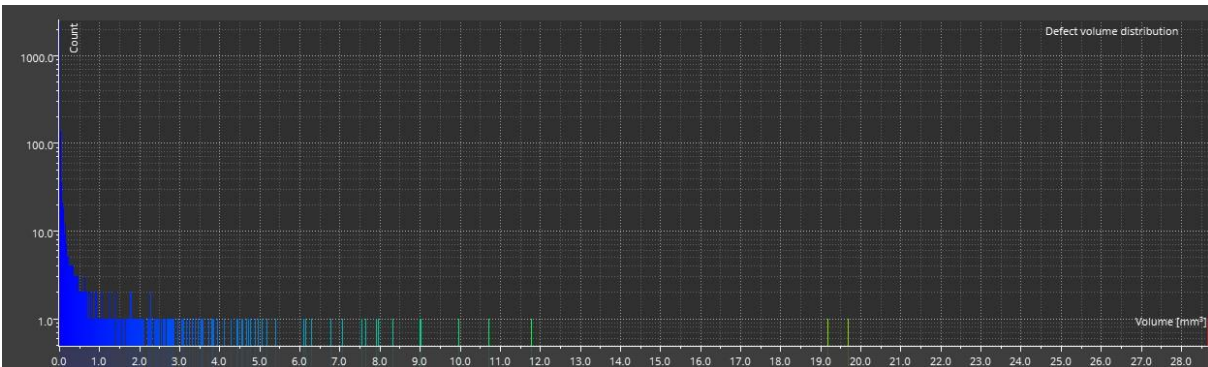
1.4.10



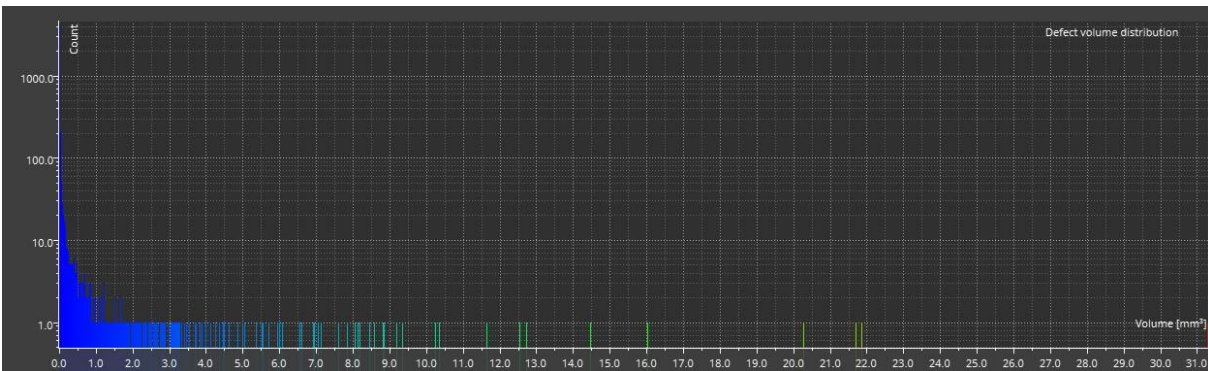
1.4.20



1.5.0



1.5.10



1.5.20

Tabell 43-Logaritmisk fordeling av luft hull for forskjellige blandinge

Vedlegg 5 -Teknisk datablad

PRODUKTDATABLAD

INDUSTRISEMENT

CEM I 52,5 R

SIST REVIDERT MARS 2021

Semenjen tilfredsstiller kravene i NS-EN 197-1:2011 til Portlandsement CEM I 52,5 R.

Egenskap		Deklarerte data	Krav ifølge NS-EN 197-1:2011
Finhet (Blaine m ² /kg)		550	
Spesifikk vekt (kg/dm ³)		3,13	
Volumbestandighet (mm)		1	≤ 10
Begynnendestørkning (min)		110	≥ 45
Trykkfasthet (MPa)	1 døgn	33	
	2 døgn	41	≥ 30
	7 døgn	50	
	28 døgn	59	≥ 52,5
Sulfat (% SO ₃)		≤ 4,0	≤ 4,0
Klorid (% Cl ⁻)		≤ 0,085 (B) / ≤ 0,05 (K)	≤ 0,10
Vannløselig krom (ppm Cr ⁶⁺)		≤ 2	≤ 2 ¹
Alkalier (% Na ₂ O _{eq})		1,3	
Klinker (%)		96	95-100
Sekundærestanddeleler (%)		4	0-5

1. I henhold til EU forordning REACH Vedlegg XVII punkt 47 krom VI forbindelser.

NORCEM
 HEIDELBERG CEMENT Group

Norcem AS, Postboks 142, Lilleaker, 0216 Oslo
 Tlf: 22 87 84 00 firmapost@norcem.no www.norcem.no

Figur 42-Produktdatablad for sement-Norcem



2400 E. River Rd.
Dayton, Ohio 45439 USA

Phone: 937.236.2213 Fax: 937.236.2217

CERTIFICATE OF ANALYSIS

Product Information:

Product ID: MICRONAL_24D
Lot Number : MC24D-0000003
Date of Manufacture: 01/17/2022
Expire On: 01/16/2027

Laboratory Analysis:

Characteristic	Units	Test Value	Specification
Bulk Density	g/cm ³	0.4	0.3 - 0.5
Solids content	Percentage	99.5	>=98.0
Appearance		Pass	White to slightly off-white
Water Content	Percentage	0.5	0.0 - 2.0



This Certificate of Analysis has been produced electronically and is valid without a signature.

Figur 43-produktdatablad for PCM-microtek.

1. PRODUCT AND COMPANY IDENTIFICATION

Product Name: Micronal® 24D, Micronal® 28D
Synonym: None
Identified Uses of the Substance: Chemical Industry, Thermal management (packaging, etc.)
Company: Microtek Laboratories, Incorporated
2400 East River Road
Dayton, Ohio 45439
Phone: 937 236-2213 *
Fax: 937 236-2217 *
Emergency Phone: 937 236-2213 or 937 416-5903
Microteklabs.com

2. HAZARDS IDENTIFICATION

2.1 Classification of the Substance or Mixture

GHS Classification in accordance with 29 CFR 1910.1200:
Not a Hazardous Substance

2.2 GHS Label elements and precautionary statements: None

2.3 Hazards not otherwise classified (HNOC) or not covered by GHS: None

3. COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS

<u>Name</u>	<u>CAS Number</u>	<u>% by Weight</u>
Water	7732-18-5	45-65%
Proprietary wax blend	Trade Secret	25-35%
Acrylic Polymer	Trade Secret	10-20%
Silicon Dioxide	7631-86-9	10-20%
Cellulose Derivative	Trade Secret	1-5%
Paraffin	Trade Secret	1-5%

The specific blend of materials has been classified as trade secret

4. FIRST AID MEASURES

Normal routes of exposure: Inhalation, Skin/Eye Contact, Aspiration

No significant symptoms of exposure are expected due to the non-classification of the product.

In case of skin contact: Remove any contaminated clothing. Wash skin with soap or mild detergent and water for at least 15 minutes. Wash clothes before reuse. Get medical attention if irritation develops or persists.

Figur 44-produktdatablad for PCM-microtek.

8. EXPOSURE CONTROLS / PERSONAL PROTECTION

8.1 Components with occupational exposure limits

Component	CAS-No	Value	Limit	Basis
Silicon Dioxide	7631-86-9	TWA	20 Million particles per cubic foot	USA. Occupational Exposure Limits (OSHA) - Table Z-3 Mineral Dusts
		TWA	80mg/m3 / %SiO2	
		TWA	6mg/m3	USA. NIOSH Recommended Exposure Limits
		PEL	6mg/m3	California permissible exposure limits for chemical contaminants (Title 8, Article 107)

8.2 Engineering Controls:

Maintain air concentrations below occupational exposure standards using engineering controls where necessary

8.3 Recommended Personal protective equipment:

Hand/Skin/Body protection:

Handle with gloves. Gloves must be inspected prior to use. Use proper glove removal technique (without touching glove's outer surface) to avoid skin contact with this product. Dispose of contaminated gloves after use in accordance with applicable laws and good laboratory practices. Wash and dry hands.

Eye protection:

Face shield/safety glasses. Use equipment for eye protection tested and approved under appropriate government standards such as NIOSH (US) or EN 166 (EU).

Respiratory protection:

Where risk assessment shows air-purifying respirators are appropriate use a full-face respirator with multi-purpose combination (US) or type ABEK (EN 14387) respirator cartridges as a backup to engineering controls. If the respirator is the sole means of protection, use a full-face supplied air respirator. Use respirators and components tested and approved under appropriate government standards such as NIOSH (US) or CEN (EU).



24D
Microencapsulated
Phase Change Material
Phase Change: 24°C, 75.2°F



DESCRIPTION

Micronal is an acrylic PCM. It is primarily used as a functional component in foams, building materials, and thermal management systems, for temperature regulation to improve comfort and climate conditions.

APPLICATIONS

The applications for phase change materials are limited only by the imagination. Some common uses for Micronal at this temperature include:

- **Bedding** – to provide desired human comfort requirements such as a cool touch effect to mattresses, pillows, and mattress ticking.
- **Building Materials** – to increase the energy efficiency of residential and commercial buildings.

PACKAGING

Dry powder is generally shipped in fiber drums (64 kg) or super sacks (295 kg).

HEALTH AND SAFETY

Please refer to the Safety Data Sheet (SDS) for necessary safety and handling precautions for this product.

PROPERTIES

Micronal 24D typically exhibits these general properties:

Typical Properties

Appearance White to slightly off-white color

Form Dry powder (≥ 98% solids)

Particle size (mean) ca 50 – 300 micron

Melting point 24°C, ± 2°C

Heat of fusion 105 J/g

Visit www.microtek.com or call 937.236.2213 for more information on your thermal management needs.

IMPORTANT NOTE: This data has been compiled from testing that Microtek Labs believes reliable and is supplied for informational purposes only. Microtek Labs encourages purchasers to validate this data and the product's fitness for use in the purchaser's process by performing their own tests.

MT18-014 Micronal 24D PDS © 2018 Microtek Laboratories, Inc. All Rights Reserved. All other trademarks are the properties of their respective owners.

MPDS3300-0061 Revision 3 Effective Date: 02/25/2020



Figur 46-produktdatablad for PCM-microtek, Micronal 24D.