



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2020 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Kartlegging av mulighetene for implementering av termisk energilagring i tørking av kakaobønner

Mapping the Possibilities of Implementing Thermal
Energy Storage in Drying Cocoa Beans

Arabi Sivanesan

Maskin, prosess- og produktutvikling

Forord

Denne oppgaven avslutter det femårige sivilingeniørstudiet maskin, prosess og produktutvikling ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet (NMBU). Masteroppgaven tilsvarer 30 studiepoeng.

Jeg vil først og fremst takke Odd Ivar Lekang, førsteamanuensis ved NMBU, og Ola Sørby Omberg, universitetslektor ved NMBU, for å ha introdusert meg til oppgaven og god veiledning og oppfølging underveis. Takk for motiverende møter og raske svar på mail.

Jeg vil takke Stein Skjørshammer fra Sunergy for informasjon og tilsendt data fra Matouke.

Jeg er meget takknemlig for alle professorer ved NMBU som gjennom sine engasjerte forelesninger har lagt grunnlaget for min utdanning. Jeg vil også takke alle medstudenter som har bidratt til en bra studietid med fine minner som jeg kan ta med videre.

Jeg vil også takke familien min for selskap og motivasjon under arbeidet, spesielt min far, Aravinth Sivanesan for diskusjon og gjennomgang og min søster Abira Sivanesan for korrekturlesing.

Abstract

The cocoa industry is a large part of the economy in Cameroon, but the methods of drying cocoa beans are not auspicious regarding quality, efficiency or environmental impact. The Norwegian organization, Sunergy, is aspiring to provide the energy requirement for cocoa production by solar power from the stations in Cameroon. Sunergy has initiated the Agrisolar project with the purpose of supplying the energy from the solar power plant to dry cocoa beans. The aim of this thesis is to develop an energy efficient drying process of cocoa beans from the surplus power of the solar power plant and thermal energy storage.

This thesis applies the method of literature study to get an understanding of cocoa processing, drying of food and thermal energy storage. Experiments have been completed to determine the efficiency of the drying process by the use of thermal energy storage. A prototype, from the Agrisolar project, was used to simulate the drying process in some of the experiments. An analysis of energy production in relation to storage capacity of the battery packages, from the solar power plant in Matouke, Cameroon was performed to gain an understanding of accessible power for the drying process. Simple calculations were done to find the ratio of energy requirement for drying of cocoa beans and the storage capacity of the thermal energy storage.

It was discovered that latent heat storage using sodium acetate trihydrate was compatible with the drying process. The thermal stored energy can be used either by a controlled reduction of the heat supply or by stopping the heat supply during the drying process. Data collected from Matouke reveals that the solar power plant is capable of producing sufficient energy daily during the sunshine period. Based on these findings, the drying of cocoa beans in Cameroon could develop into an energy efficient process by using surplus power from the solar power plant in combination with the thermal energy storage.

Sammendrag

I Kamerun utgjør kakaoindustrien en stor del av landets økonomi, men tørkemetoden til kakaobønnene er i dag lite gunstig med tanke på kvaliteten av produktet og metoden innebærer også negative miljøeffekter. Et norsk selskap, Sunergy, jobber med å dekke energibehovet til forskjellige landsbyer ved hjelp av solkraftverk i Kamerun og har satt i gang Agrisolar-prosjektet med hensikten om å utnytte energi fra solkraftverket til å tørke kakaobønner. Formålet med denne oppgaven er å undersøke hvordan en energieffektiv tørkeprosess av kakaobønner kan utvikles ved bruk av overskuddsstrøm fra dette solkraftverket i tillegg til bruk av termisk energilagring. Det vil også bli sett på om det er mulig å forbedre dagens problemer med kvaliteten på de tørkede av kakaobønnene.

Et litteraturstudie har blitt utført for å få en dypere forståelse for kakaoprosessering, tørking av mat og termisk energilagring. Det har blitt utført forsøk for å undersøke hvor effektiv tørkeprosessen kan gjøres ved hjelp av termisk energilagring. I noen av forsøkene har en prototype, som er laget i Agrisolar-prosjektet, blitt benyttet for å simulere tørkeprosessen som skal gjennomføres i Kamerun. Det har også blitt gjort en analyse av energiproduksjon i forhold til lagringskapasitet på batteripakker fra solkraftverket i Matouke, Kamerun, for å få en forståelse over hvor mye energi som er tilgjengelig for tørkeprosessen. Noen enkle beregninger har blitt utført for å finne et forhold mellom hvor mye energi som trengs for å tørke kakaobønnene og hvor mye som kan lagres i det termiske energilageret.

Det ble funnet at latent varmelagring ved bruk av natriumacetattrihydrat er egnet for tørkeprosessen i forhold til tørketemperatur. Den termisk lagrede energien kan benyttes enten ved en kontrollert reduksjon av varmetilførselen til tørkeren eller ved å stoppe varmetilførselen til tørkeren i løpet av tørkeprosessen. Analysen av tilsendt data viser at solkraftverket er i stand til å produsere tilstrekkelig energi daglig i løpet av solskinnsperioden til å tørke kakaobønnene. Ut ifra disse funnene kan tørkeprosessen i Kamerun utvikles til en energieffektiv prosess ved bruk av overskuddsenergien i solkraftverket og termisk energilagring.

Innholdsfortegnelse

Forord	i
Abstract	ii
Sammendrag	iii
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Prosjektbeskrivelse	2
1.2.2 Begrensninger	3
2 Teori	4
2.1 Kakaoproduksjon.....	4
2.1.1 Prosessering av kakaobønner (fra frukt til sjokolade)	5
2.2 Tørking	8
2.2.1 Varmlufttørking	8
2.2.2 Tørking av mat.....	9
2.2.3 Vanninnhold og vannaktivitet.....	9
2.2.4 Tørking for mat med høy fuktighet.....	11
2.3 Solkraftverket i Matouke	12
2.4 Energilagring	13
2.4.1 Termisk energilagring	14
2.4.1.1 Følbar lagring	15
2.4.1.2 Kjemisk lagring	16
2.4.1.3 Latent varmelagring	18
2.4.2 Bruk av termisk energilagring i tørkeprosesser	20
2.5 Masse- og energibalanse.....	23
3 Metode, resultater og evaluering av resultater	25
3.1 Test av kakaobønnenes egenskaper	26
3.2 Test av fuktighetsinnhold fra tradisjonell tørkemetode: fuktighetsforsøk.....	28
3.2.1 Fremgangsmåte for fuktighetsforsøk	28
3.2.2 Resultat av fuktighetsforsøk	28
3.2.3 Evaluering av fuktighetsforsøk	29
3.3 Beskrivelse og test av Soltørkeren.....	29
3.3.1 Beskrivelse av Soltørkeren.....	29
3.3.2 Ytelsestest av Soltørkeren.....	30
3.3.2.1 Fremgangsmåte for ytelsestest	31

3.3.2.2	Resultat for ytelsestest.....	32
3.3.2.3	Evaluering av ytelsestest	33
3.4	Valg og test av termisk energilagring	33
3.4.1	Valg av termisk energilagring.....	33
3.4.2	Test av PCM i Soltørkeren.....	35
3.4.2.1	Fremgangsmåte for test av PCM.....	35
3.4.2.2	Resultat for test av PCM	36
3.4.2.3	Evaluering for test av PCM.....	38
3.4.3	Energiberegning	38
3.5	Sammenligning av temperaturstigning i Soltørkeren med og uten termisk energilagring	40
3.6	Analyse av solkraftverk i Matouke (analyse av overskuddsstrøm)	40
4	Diskusjon	44
5	Konklusjon	47
6	Litteraturliste	48

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

I solrike områder som i Afrika er tørking en av de viktigste måtene å konservere mat på. Tilgangen på elektrisitet fra nettet og andre ikke-fornybare energikilder er lite tilgjengelig og det er derfor vanskelig å benytte seg av tørkere som har motoriserte vifter eller elektrisk oppvarming. Tørking i direkte sol er derfor en populær tørkemetode. Fordelen med tørking i direkte sol er lave driftskostnader og uavhengighet av brenseltilgang. Selv om dette er en populær metode oppstår flere problemer. Tørking i direkte sol kan medføre et produkttap og kvalitetstap ved blant annet soppdannelse, insekter og støv. Uventet værforhold kan også ha en innvirkning for tørkemethoden samtidig som at tørketiden er svært lang. Det er derfor behov for å se på andre mulige tørkemethoder (Dhingra et al., 2019; Øygarden, 2011).

I Kamerun er kakaoindustrien en stor del av landets sysselsetting og flere millioner mennesker livnærer seg direkte og indirekte av kakaøkonomien. Tørkemethoden av kakaobønnene er i dag lite gunstig med tanke på kvalitet og kakaobøndene mister dermed ca. 20% av inntekten deres (Sunergy, 2019). Kakaobønnene tørkes i dag ved hjelp av direkte soltørking og vedfyring, noe som gir liten oversikt og kontroll på tørkeprosessen. Ved hjelp av en tørkeenhet kan bøndene ha bedre kontroll på prosessen og øke kvaliteten på sluttproduktet. Den vil også være med på å minske de negative miljøeffektene som for eksempel avskoging og forurensning.

Sunergy er et norsk selskap som jobber med å dekke behovet for energi i lokalsamfunnet i voksende markeder ved hjelp av off-grid solkraftverk. Solkraftverket er knyttet direkte til kunden gjennom et eget strømnnett. Kunden kan også få tilgang til Kabel TV og internett. Slik løfter Sunergy mennesker ut av fattigdom ved å legge til rette for bruk av teknologi og nye muligheter (Sunergy, 2019).

Sunergy har satt i gang Agrisolar-prosjektet der hensikten er å utnytte solenergi gjennom å benytte solkraftverket til tørking av kakaobønner i landsbyen Matouke i Kamerun. Målet med prosjektet er å utvikle en lavkostnads tørkeenhet som tørker kakaobønner over lengre perioder der det både er tilgang til sollys og der sollys uteblir. For å kunne utføre dette, har det blitt laget en prototype av tørkeenheten som kalles «Soltørkeren». Videre, skal det også sees på

muligheter av termisk lagring av energi slik at Soltørkeren driftes selv om forholdene ikke er gunstige.

I tillegg til bruken av elektrisk energi fra solkraftverket kan tørkeprosessen påvirkes positivt ved å lagre overskuddsenergien som termisk energi i tørkeenheten. Termisk energilagring gjør det mulig å holde på varmen i Soltørkeren over en lengre periode, noe som minsker andelen energi som må tilføres Soltørkeren. Energilagringen gjør det også mulig å drifte Soltørkeren når det ikke er tilstrekkelig med energi tilstede (Bal et al., 2011).

Arbeidet rundt energilagring kan også ha en betydning i en større sammenheng. Klimaendringene er i dag en av samfunnets største utfordringer. Et av FNs bærekraftsmål er å stoppe klimaendringene (FN-SAMBANDET, 2019), og dersom dette skal oppnås må det store endringer til globalt. Verden må redusere klimagassutslippene ved blant annet å minke fossil energiproduksjon og øke fornybar energiproduksjon. Energilagring vil være med på å nå målet ettersom energien kan distribueres etter behov. Da kan overskuddet av både fossil og fornybar energiproduksjon utnyttes fullstendig. Det er nødvendig å ta vare på energien som produseres og gjenbruke den effektivt for å skape en miljøvennlig produksjonssyklus.

Termisk energilagring er et verktøy som kan brukes for å forvalte energi som en ressurs. Det gir muligheten til å lagre overskuddsenergi dersom produksjonen av energi og forbruket av energi ikke samsvarer. På denne måten kan energien benyttes når etterspørselen er stor. Termisk energilagring vil også kunne føre til mindre behov av fossil energiproduksjon ettersom at den fornybare energien blir tilgjengelig for å dekke etterspørselen. Når en stor del av energiproduksjonen baseres på fornybare energikilder vil produksjonene være varierende og uforutsigbar, noe som gjør energilagring enda viktigere. Termisk energilagring kan være med på å sikre en stabil og kostnadseffektiv energiforsyning i fremtiden. Videre kan termisk energilagring også være viktig for å kutte effektoppene i kjøle og varmebehov (Sintef, u.å.).

1.2 Prosjektbeskrivelse

Målet med oppgaven er å utvikle en mer energieffektiv tørkeprosess av kakaobønner ved hjelp av overskuddsstrøm fra solkraftverket og ved bruk av termisk energilagring. Det skal undersøkes hvordan tørkingen blir gjort i dag, hvordan den kan bedres til en mer energieffektiv prosess og hvordan termisk energilagring kan spille en rolle i prosessen. Videre skal studien gi

Sunergy et beslutningsgrunnlag for å kunne vurdere termisk energilagring sammen med et tørker-konsept. Dermed formuleres problemstillingen slik:

Hvordan kan det utvikles en energieffektiv tørkemetode for kakaobønner i Kamerun som benytter overskuddsstrøm fra PV-anlegg og termisk energilagring?

For å besvare problemstillingen på en god måte har følgende delmål blitt satt opp:

- Utarbeide en prosessbeskrivelse for hvordan kakaoprosesseringen er i dag.
- Utføre et litteraturstudie om tørking av mat og lagring av termisk energi.
- Sette opp masse- og energibalanser for tørking av kakaobønner.
- Gjennomføre innledende forskning for termisk lagring av energi.

1.2.2 Begrensninger

I samråd med veileder har det blitt gjort følgende begrensninger:

- Det vil ikke bli gjennomført en økonomisk analyse av termisk energilagring.
- Det vil ikke bli gjort beregninger med tanke på kinetikk og modellering.
- Alle beregninger blir gjort på bakgrunn av tilsendt og innhentet data.
- Ettersom at prototypen er bygget benyttes den i forsøkene

På grunn av COVID-19-situasjonen har tilgangen til laboratoriet vært utelukket, og dermed har ikke alle planlagte forsøk blitt utført. Forsøkene som anvendes i oppgaven har blitt utført for å tilegne forkunnskaper for å planlegge og utføre forsøk som besvarer problemstillingen. Forsøkene og resultatene som benyttes i besvarelsen av problemstillingen er dermed begrenset.

2 Teori

2.1 Kakaoproduksjon

Kakaobønner er frøene som kommer fra kakaofrukten som vokser på kakaotreet, *Theobroma cacao*. Trærne vokser i tropene og i dag står afrikanske land for den største delen av produksjonen av kakaobønner. Bønnene brukes både til nytelse og som næringsmiddel (SNL, 2018). Kakaobønnene er hovedingrediensen i sjokolade og er et produkt som er etterspurt verden rundt. Kakaoindustrien er dermed en viktig del av de afrikanske landenes økonomi.

Figur 1 viser at kakaofrukten vokser rett på stammen til trærne og at kakaobønnene finnes i kjernen til frukten. For å få frem den aromatiske smaken må bønnene fermenteres og tørkes. Når skallet til kakaobønnene er fjernet deler de seg i små biter. Etter at disse bitene blir røstet blir de malt og varmet opp til en flytende masse med en sterk og bitter kakaosmak. Kakaomassen blir videre bearbeidet til kakaopulver og sjokolade (R.Graven, 2011; SNL, 2018).



Figur 1: Kakaofrukten som henger på kakaotreet til venstre (R.Graven, 2011) og kakaobønnene inni kakaofrukten til høyre (SNL, 2018).

Kjøperen av kakaobønnene betaler blant annet etter kvaliteten på bønnene, noe som er avhengige av prosesserings- og lagringsteknikken. Fermentering og tørking er de viktigste stegene i prosessereringen ettersom at dette legger et grunnlag for kakaosmaken som kommer frem gjennom ristingen og holdbarheten til kakaobønningen (Guda et al., 2017). De viktigste parameterne som må tas hensyn til ved prosessering av kakaobønnene er fuktinnhold, surhetsgrad (pH), smak, lukt og farge.

2.1.1 Prosessering av kakaobønner (fra frukt til sjokolade)

Etter innhøsting blir kakaofrukten bearbeidet slik at kakaobønnene blir hentet ut, og denne prosessen må gjøres senest 5 dager etter innhøsting. Kakaofrukten blir i de fleste tilfeller transportert videre til fermentering før de åpnes.

Kakaobønnene må fermenteres for å redusere spiring og for å legge et grunnlag for utviklingen av aroma og smaken av sjokolade. Fermenteringen skjer i to deler. I del en skjer det en anaerob fermentering der fruktkjøttet rundt kakaobønnene blir omdannet til væske. Her blir glukosen i kakaobønnen og rester av planteslim omdannet til etanol. I del to av fermenteringen blir det alkoholholdige fruktkjøttet omdannet til eddik gjennom en aerob prosess. Fermenteringsprosessen foregår over en periode på 5-7 dager der bønnene blir bearbeidet annen hver dag slik at alle bønnene blir fermentert jevnt. Etter fermentering har kakaobønnene et vanninnhold på 55.0 % +/- 5.0% og en pH på 4.80 +/- 0.5% (Nicolas et al., 2019). Figur 2 viser hvordan fermentering av kakaobønner kan sees ut.



Figur 2: Fermentering av kakaobønner (Nicolas et al., 2019)

Etter fermentering sorteres kakaobønnene og må tørkes fra ca. 60% til ca. 6% vanninnhold. Tørkeprosessen skjer i flere steg der kakaobønnene først tørkes ved naturlig tørking og til slutt ved hjelp av kunstig tørking. Tørketiden avhenger av de forskjellige produsentene. Først tørkes kakaobønnene ved hjelp av sollys i ca. 8-12 timer med en gjennomsnittlig temperatur på 25°C. Kakaobønnene spres ut på en presenning og blir bearbeidet med jevne mellomrom slik at alle bønnene tørkes likt. Etter soltørkingen blir kakaobønnene tørket ved vedfyring i en ovn i ca. 42-48 timer med en ønskelig temperatur på 51°C. Bønnene blir spredd utover en overflate av betong som har fyringsmulighet under. Det blir brukt ved og bønnene tørkes ved varmekontakt.

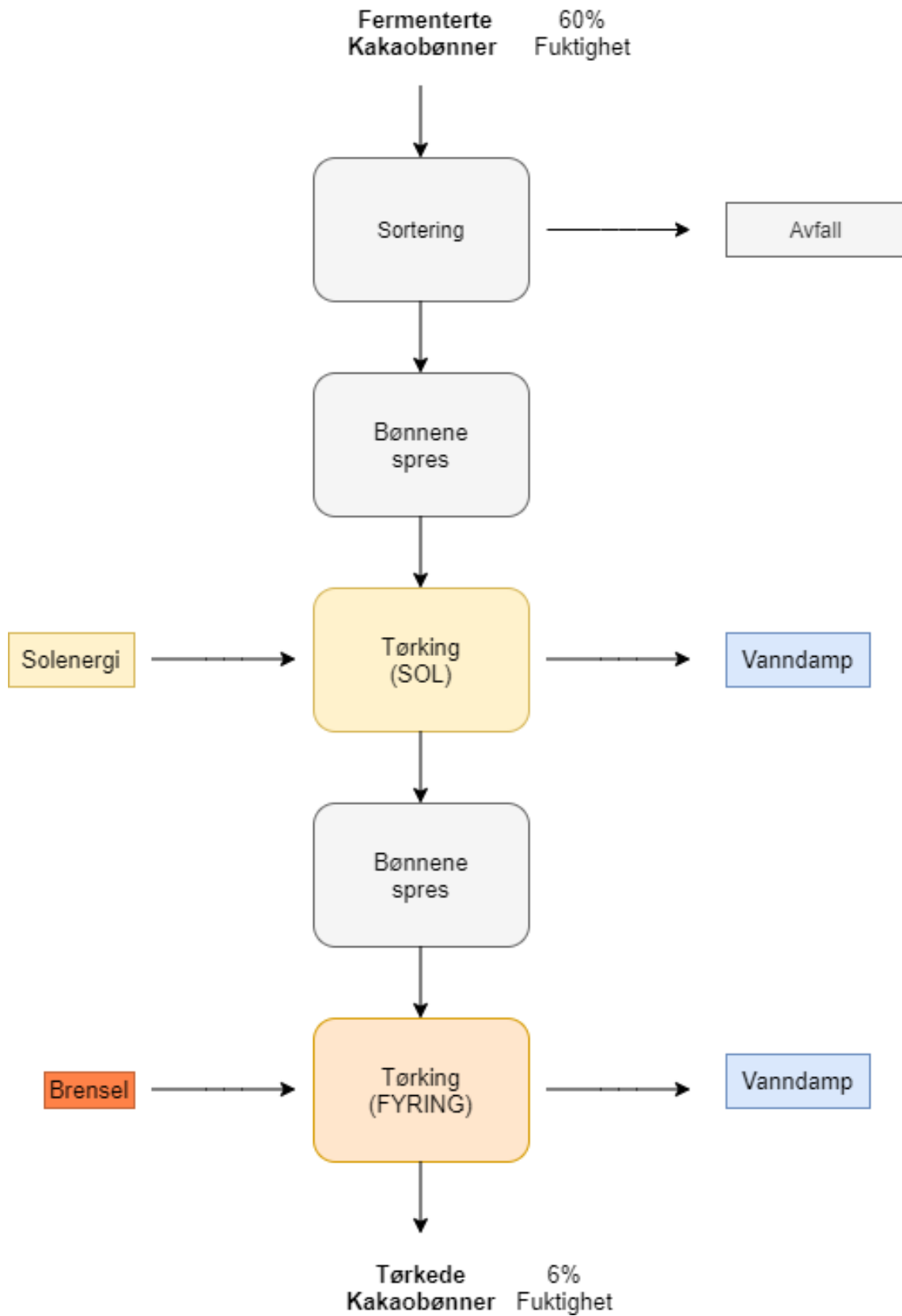
Etter tørkeprosessen hviler bønnene i 5 timer (Nicolas et al., 2019). Figur 3 viser hvordan kakaobønnene tørkes ved hjelp av vedfyring i dag.



Figur 3: Vedfyring, Fotograf: Stein Skjørshammer, Sunergy.

Problemer med vedfyring er at det er vanskelig å kontrollere temperaturen og at ovnen som oftest gir høye temperaturer. Det har blitt registrert temperaturer opp til 81°C (Nicolas et al., 2019). Dette er en betydelig høyere temperatur enn den ønskelige temperaturen på 51°C. Dette fører til uønsket syrlighet og mye røyk, noe som påvirker kvaliteten på kakaobønnene. Det er vanskelig å styre dagens tørkeprosess og den krever konstant overvåking. Tørketiden bør minskes, og kvaliteten og tørkekapasiteten bør økes.

Etter tørkingen blir kakaobønnene transportert til kakaofabrikk for videre bearbeiding. I fabrikkene fjernes skallet og kakaobønnene ristes i varmluft ved 120-140°C i ca. 1 time. Bønnene blir deretter malt og varmet opp slik at man får en flytende kakaomasse som videre kan bearbeides til kakaopulver og sjokolade (International Cocoa Organization, 2013). I figur 4 vises et forenklet flytskjema over hvordan kakaoprosesseringer er i dag.



Figur 4: Flytskjema over hvordan tørkeprosessen av kakaobønner er i Kamerun i dag. Figur inspirert av (Nicolas et al., 2019).

2.2 Tørking

Tørking er å fjerne vann eller andre organiske væsker fra en substans. I de fleste tilfeller krever tørking termisk energi som får vannet til å fordampe fra overflaten. Tørking kan deles i to prosesser: varmetransport fra varmekilden til produktet og massetransport av fukt fra kjernen av produktet til overflaten og videre til omgivelsene ved fordamping. Det finnes i prinsippet to måter å tørke på, direkte og indirekte. Materialet blir direkte eksponert for varme ved direkte tørking, og ved indirekte tørking blir varmen overført til materialet ved hjelp av et eksternt medium (Ore & Nesse, 2017).

Det finnes flere metoder å tørke på. Eksempler på direkte tørkemethoder er lufttørking, frysetørking, soltørking, brettørking og tørkeskap og eksempler på indirekte tørkemethoder er paddeltørker og skivetørker (Krosby, 1998). Tørkemethoden blir valgt etter hvilket produkt som skal tørkes, kvalitet på sluttproduktet og ved å se på det økonomiske og bærekraftige aspektet ved tørkemethoden. Ettersom at varmlufttørking benyttes i oppgaven beskrives tørkemethoden nærmere.

2.2.1 Varmlufttørking

Tørkemethoden som brukes i oppgaven er varmlufttørking der det blir brukt varmluft og varmeoverføring ved konveksjon for å tørke produkter. Luft varmes opp av energi og en vifte sprer denne varme luften til tørkeproduktet. Ved å varme luften vil den ha en høyere kapasitet til å frakte fuktighetsinnholdet til det som skal tørkes. Den oppvarmede luften kan både strømme over og gjennom produktet vertikalt eller horisontalt (Dhingra et al., 2019; Sokhansanj & Jayas, 2006).

Det finnes flere typer tørkere som benytter seg av varmlufttørking. Fluidiserte sengtørker og impigment tørker blåser varm luft gjennom et lag med produkt slik at det blir hengende i luften. Slik blir en stor overflate eksponert for den varme luften. Roterende tørkere blåser varm luft gjennom produktet ved rotasjon. Noen tørkere benytter seg av belter med produkt som går gjennom varm luft. En annen type tørker som kategoriseres som varmlufttørker er soltørker der luften varmes opp av solinnstråling (Fellows, 2009).

2.2.2 Tørking av mat

Tørking er en viktig prosess innenfor landbruk og har blitt brukt som en konserveringsmetode i flere hundre år. Det tørkede materialet holder seg lenger fordi vannfjerningen minker reproduksjon av mikroorganismer (Guda et al., 2017).

Tørking brukes også for å sørge for lavere vekt og volum, noe som påvirker kostnaden på produktet og lagringsplassen det opptar (NSF, 2008). Det vil også redusere kostnad for emballasje, pakking og transport (Fudholi et al., 2010; Vega-Gálvez et al., 2011). Med lettere vekt blir det lettere å håndtere produktet og arbeidet rundt produksjonen blir mer effektivt. Tørking av matvarer gjør det også lettere å bearbeide produktet og for videre prosessering. Maling, knusing, separering og miksing krever mindre energi når matvaren er i tørket form. Tørking blir også brukt til sanitering av mat da insekt og mikroorganismer ikke overlever uten fukt og dør ved varmetilførsel (Sokhansanj & Jayas, 2006).

Tørking er en viktig etterbehandling i matindustrien fordi det forlenger holdbarheten og forbedrer kvaliteten. Faktorer som smak og fordøyelighet kan forbedres ved tørking. Økningen i holdbarheten etter tørkeprosessen endrer forhandlingsposisjonen til produsenten og gjør prisen stabil. Noe som har en positiv virkning på det økonomiske aspektet til produsenten (Fudholi et al., 2010).

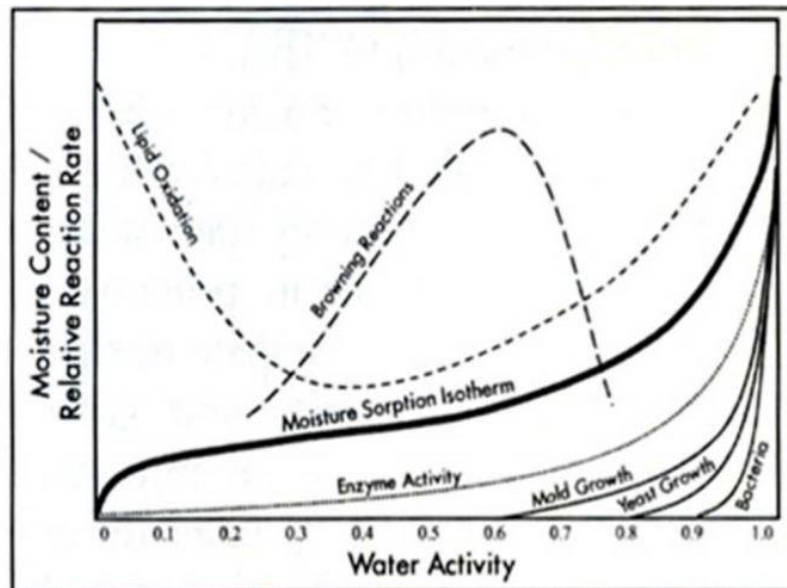
Det er ønskelig å tørke raskest mulig, med tanke på tidsbruk. Dette kan føre til høye temperaturer som videre vil være med på å påvirke kvaliteten til produktet. Noen matvarer er sensitive til høye temperaturer der smak, farge og konsistens blir mindre attraktivt. Matvarer kan krympe og tape viktige næringsstoffer. I medisinske planter kan essensielle ingredienser fordampe vekk ved høye temperaturer. Det er også noen matvarer som har en tendens til å danne et tørt overflatelag ved høye temperaturer. Dette overflatelaget er nærmest ugjennomtrengelig for fukt fra kjernen av produktet. Tørking ved høye temperaturer kan også føre til irreversible biologiske og kjemiske reaksjoner, der bakterier og enzymer deaktiveres. Høye temperaturer kan altså degradere kvaliteten på matvarene. For å hindre at dette skjer er det viktig å ha kontroll over tørkeprosessen slik at temperaturen holdes på et gunstig nivå (Øygarden, 2011).

2.2.3 Vanninnhold og vannaktivitet

Vanninnholdet i en matvare sier hvor mange prosent vann det er i matvaren. Dette er en viktig parameter for å kontrollere forverringsraten på et produkt (Fellows, 2009). Vanninnholdet

alene er ikke nok til å kunngjøre stabiliteten på matvaren. Noen matvarer er ustabile selv om de har et lavt vanninnhold. Da er det vannaktiviteten som utgjør forskjellen. Vannaktivitet er en parameter for hvor mye vann som er fritt og ubundet i et produkt. Vannaktiviteten i et produkt sier mye om trygghet og risiko for vekst av mikroorganismer. Mikroorganismene kan ikke formere seg i produkter der vannaktiviteten er under deres minimumskrav. De fleste bakterier krever en vannaktivitet på over 0,90, mens mugg klarer seg med 0,80. Lav vannaktivitet reduserer også faren for uønskede kjemiske reaksjoner under lagring (AKSOY, 2015; Mathlouthi, 2001).

Dersom luftfuktigheten er høy vil også tørkede produkter som lagres i luft ha høy vannaktivitet på grunn av kondensering og absorpsjon. Dersom fuktig luft kjøles kan det oppstå kondensering som medfører høy vannaktivitet. Det er derfor viktig å ha kontroll over temperatur og fuktighetsforhold under produksjon og lagring. Muggdannelse, bruningsreaksjoner, bakterievekst og enzymaktivitet er de største grunnene til minkende kvalitet i matvarer (Øygarden, 2011). Figur 5 viser hvordan reaksjonene varierer med vannaktivitet for en typisk matvare.



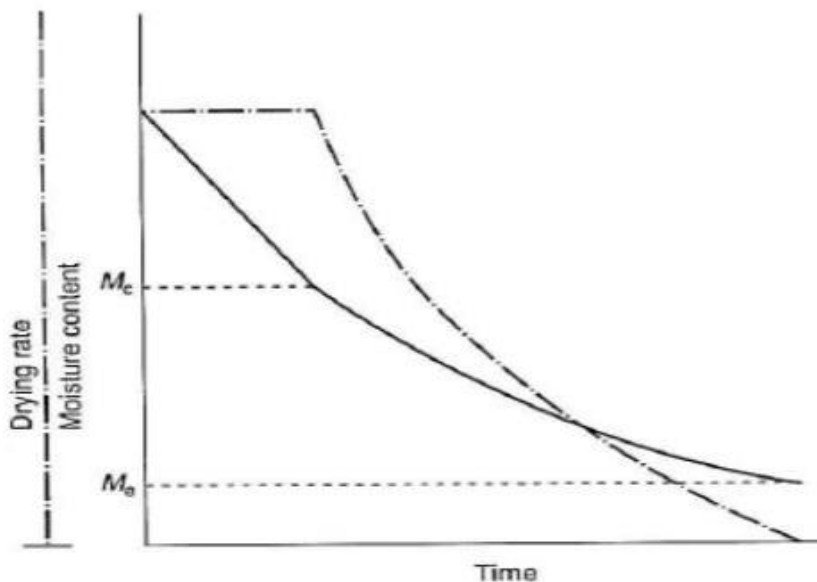
Figur 5: Kvalitetsendrende reaksjoner som følge av vannaktivitet (AKSOY, 2015)

Lavere vannaktivitet enn minimumskrav er uøkonomisk med tanke på vekt og prisen produktet selges for. Produktet kan også oppfattes som mindre attraktivt på grunn av utseende og tekstur. Måling av vannaktivitet er derfor en viktig del av produksjonen med tanke på økonomi og kvalitet av produktet (Øygarden, 2011).

2.2.4 Tørking for mat med høy fuktighet

Mat med høyt fuktighetsinnhold er mat som har ca. 50% vanninnhold eller mer. Tørkeraten til mat med høyt fuktighetsinnhold er konstant frem til et kritisk punkt og er deretter avtagende. Under konstant tørkerate er det alltid fukt på overflaten av produktet. Når vannet på overflaten har fordampet vil det indre vannet diffundere til overflaten. Ettersom at vannet på overflaten minker vil også tørkingen gå saktere, og tørkeraten blir avtagende (Sokhansanj & Jayas, 2006).

Figur 6 Viser en typisk tørkekurve for mat med høyt fuktighetsinnhold. Den stiplede linjen viser tørkeraten som funksjon av tid og den heltrukne linjen viser fuktighetsinnholdet som funksjon av tid. M_c i figuren er kritisk fuktinnhold, altså fuktighetsinnholdet der produktet går over fra konstant tørkerate til avtagende tørkerate.



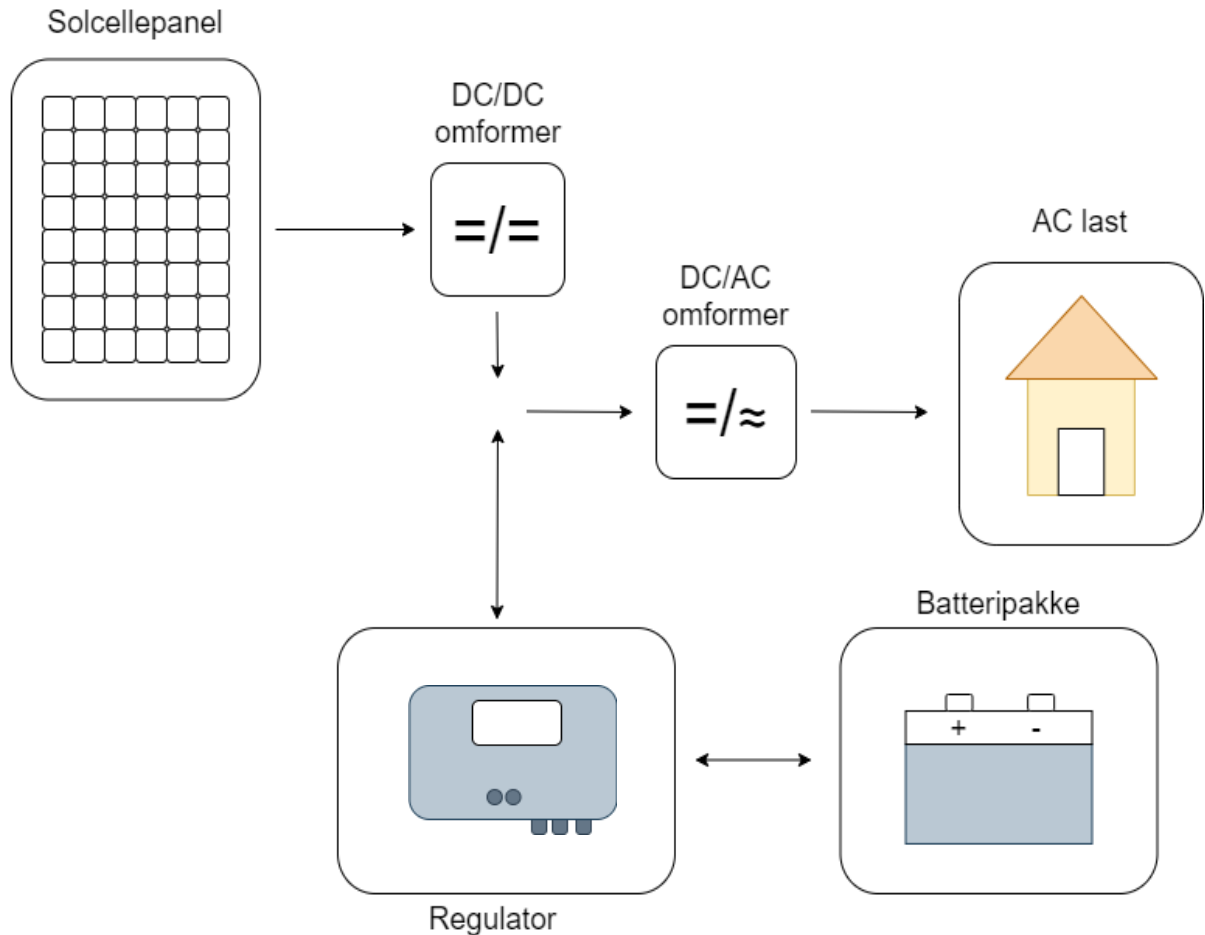
Figur 6: Typisk tørkekurve for mat med høy fuktighet, (Sokhansanj & Jayas, 2006)

Det er flere faktorer som påvirker tørkeraten på et produkt. Ved høyere temperaturer fordampes vanninnholdet i produktet raskere, men for høy temperatur kan gjøre slik at produktet danner et sjikt som forhindrer fukttransport. Dette påvirker kvaliteten på produktet. Ved lavere luftfuktighet vil luften lettere ta opp fukt fra overflaten til produktet raskere enn hvis luften hadde vært fuktigere. Høyere lufthastighet og bedre luftdistribusjon vil føre til høyere fordampningsrate. Luftskifte og karakteristikk på produktet som skal tørkes er også viktige faktorer (Øygarden, 2011).

2.3 Solkraftverket i Matouke

I Matouke i Kamerun er det bygget et solkraftverk med solceller. Solcellene omformer strålingsenergien fra sola til elektrisk energi ved hjelp av fotoelektrisk effekt (Rosvold, 2019). De er laget av et halvledermateriale, silisium, som er plassert mellom to elektroder. Energi fra sollyset bryter bindinger i halvledermaterialet og gjør slik at elektronene kan bevege seg i materialet og gi opphav til elektrisk energi. Elektronet går over fra å være et bindingselektron til et ledningselektron. Som følge av at elektronet beveger seg etterlates det en tom elektrontilstand. Andre elektroner vil da forflytte seg til den ledige posisjonen. Slik blir strålingsenergien fra sola omdannet til elektrisk energi (Reenaas et al., 2008; Smets et al., 2016).

Solkraftverket i Matouke består av solceller, en regulator, omformere og batteripakker. Elektrisiteten som produseres i solcellene i Matouke går gjennom en regulator og en DC/AC – omformer før den går videre til lasten. Overskuddsenergien går gjennom regulatoren til batteripakkene og lagres der. Energien fra batteripakkene kan hentes ut gjennom regulatoren og DC/AC – omformeren ved etterspørsel. Regulatoren korrigerer og detekterer variasjoner i strømspenningsegenskapene til solcellepanelet slik at maksimal tilgjengelig strøm blir trukket fra solcellene til enhver tid. Figur 7 viser et forenklet kretsskjema over solkraftverket.



Figur 7: Kretsskjema av solkraftverket i Matouke, figur inspirert av (SAPVIA & PVGreenCard, u.å.)

Det er solinnstråling mellom klokken 04.00 og 17.00 daglig, hele året i Matouke. Dette gir ca. 13 soltimer per dag. Det betyr at solkraftverket har muligheten til å produsere energi ca. 13 timer daglig (Bjånes, 2019).

2.4 Energilagring

Ettersom at energibehovet varierer fra tid til annen er energilagring en løsning på å dekke behovet. Den lagrede energien kan benyttes over en gitt periode eller i det øyeblikket den trengs. Energilagring kan bidra til å tilpasse energiproduksjonen til forbruket og balansere forbruk i forhold til etterspørsel. Energi kan lagres på flere måter og i mange former. Hvilken teknologi som er optimal for energilagring avhenger av mengden energi som ønskes å lagres, tidsrommet energien skal lagres, og hvor store tap og kostnader de ulike teknologiene har (Unneberg, 2017).

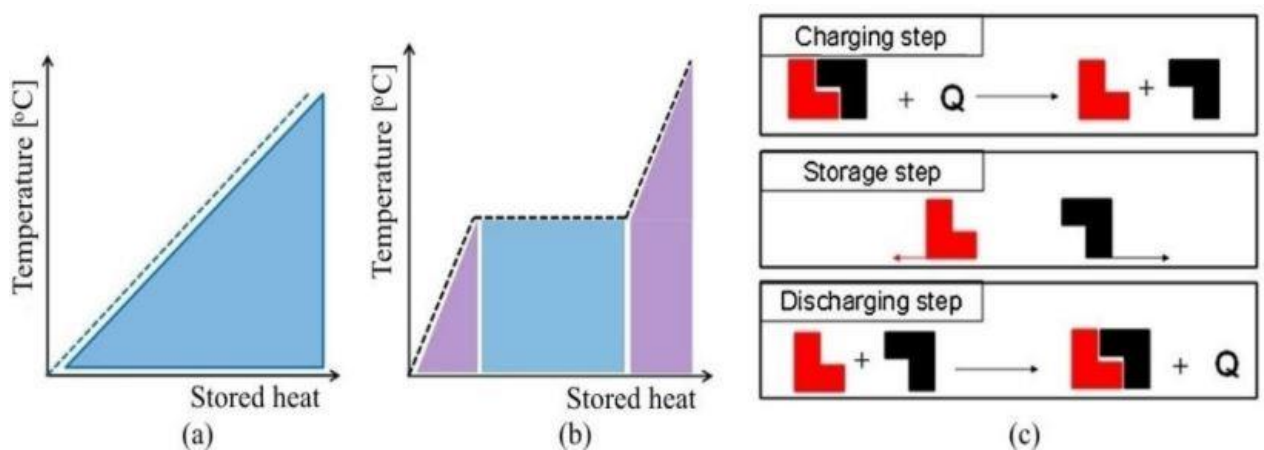
Elektrisk energi kan lagres i batterier eller ved bruk av superledere eller kondensatorer dersom det skal lagres i en kort periode. Den mest brukte formen for elektrisk energilagring er mekanisk lagring i form av pumpekraft, der for eksempel vann pumpes opp i magasiner og tilfører vannet en potensiell energi som kan brukes senere. Termisk lagring brukes også som en form for energilagring der termisk masse utnyttes til å lagre energi som varme eller kulde. Termisk lagring er mest utbredt når energien skal hentes ut igjen som termisk energi og ikke elektrisitet (NVE, 2019).

Soltørkeren, som har blitt laget i sammenheng med Agrisolar-prosjektet, skal utnytte energioverskuddet fra det lokale solkraftverk ved bruk av varmluftvifter. For å utnytte overskuddsenergien trengs det et energilager som kan lagre varme fra varmluftviften. Den termiske energien kan da hentes når tørkeprosessen trenger å opprettholde tørketemperaturen. Det sees derfor videre på termisk energilagring og forskjellige metoder av dette.

2.4.1 Termisk energilagring

Termisk energi kan lagres i ulike materialer ved oppvarming eller nedkjøling. Den lagrede energien kan bli benyttet til oppvarming, nedkjøling eller til produksjon av elektrisitet på et senere tidspunkt, men er mest gunstig når energien hentes ut som termisk energi (Christensen & Moskvil, 2017). Termisk energilagring har vært i bruk lenge og et eksempel er varmtvannstanken de fleste har i hjemmene sine, hvor varme lagres og brukes ved behov. Dette prinsippet kan brukes industrielt og i større skalaer (Stefanussen, 2017).

Lagring av termisk energi kan deles inn i følbare lagring, kjemisk lagring og latent varmelagring. Det finnes flere teknologier å lagre termisk energi på, hvor noen egner seg for langtidslagring og noen egner seg til korttidslagring. Enkelte teknologier er på forskningsstadiet mens andre har vært i kommersiell bruk i flere år (Unneberg, 2017). Figur 8 viser virkemåten for de forskjellige termiske energilagringsteknologiene. Figur 8 a) viser at energimengden som kan lagres ved følbare varme stiger lineært med temperaturøkningen i mediet. Det kan sees hvordan energien lagres i faseoverganger i figur 8 b) og figur 8 c) illustrerer hvordan en kjemisk reaksjon kan brukes til å lagre termisk energi.



Figur 8: Oversikt over a) følbar varme, b) latent varme, c) kjemisk reaksjon (Sarbu & Sebarchievici, 2018)

Tabell 1 viser typiske parametere for termisk energilagring som kapasitet, effekt, effektivitet, hvor lenge energien kan lagres og kostnaden i forhold til de forskjellige termiske energilagringemetodene.

Tabell 1: Driftscharakteristikk for termisk energilagring ved følbar varme, PCM og kjemisk reaksjon, (Sarbu & Sebarchievici, 2018)

TEL system	Kapasitet (kWh/t)	Effekt (MW)	Effektivitet (%)	Lagringsperiode	Kostnad (€/kWh)
Følbar varme (varmtvann)	10-50	0.001-10.0	50-90	Dager/måneder	0.1-10
PCM	50-150	0.001-1.0	75-90	Timer/måneder	10-50
Kjemisk reaksjon	120-250	0.01-1.0	75-100	Timer/dager	8-100

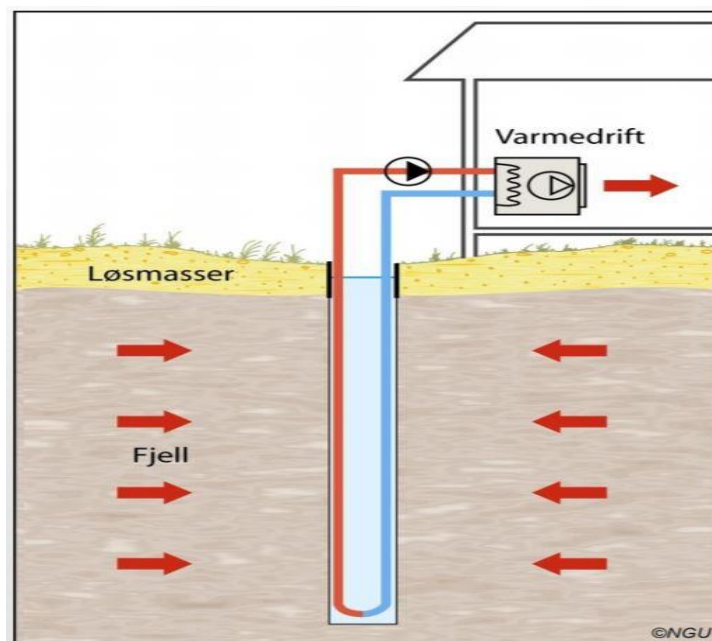
Latent varme og kjemisk energi har mye høyere lagringstetthet sammenlignet med teknologier for lagring av følbar varme (Farid et al., 2004; Midthun, 2014). PCM lagrer 4-14 ganger så mye varme per enhet volum enn materialer som lagrer følbar varme (Sharma et al., 2009).

2.4.1.1 Følbar lagring

Følbar lagring innebærer at den termiske energien kan lagres ved å øke eller minke temperaturen til et fast stoff. Endringen i temperaturen er det som avgjør hvor mye energi som

lagres, i tillegg til den spesifikke varmekapasiteten, tettheten og volumet til materialet. Under varmeabsorberingen skjer det ingen faseendring i materialet, men materialet opplever en endring i temperatur (Alva et al., 2017).

Energibrønner er et eksempel på følbare energilagring. Den termiske energien lagres i dype brønner i berggrunnen ved hjelp av et varmemedium. Denne energien kan senere hentes ut ved hjelp av pumper (Kvam & Winge, 2018). Varmesystemet kan benyttes til vannbåren varme, radiatorvarme eller oppvarmet luft. Energibrønner er et stillestående system som kan brukes til både oppvarming og nedkjøling. Energibrønner brukes i dag til oppvarming av boliger og bygg om vinteren, da det ikke er tilstrekkelig med solenergi tilstede (NIBE, u.å.). Ved bruk av energibrønner reduseres utslippet av klimagasser og andre avfallsstoffer og fyringskostnader. Brønnene er vedlikeholdsfrie og kan brukes i flere generasjoner noe som gjør dem driftssikre. Problemet med energibrønner er at de trenger stabile forhold. Det er krav til hvordan berggrunnen må være for å få et gunstig utbytte av energibrønnene. Virkemåten til energibrønner kan sees i figur 9.



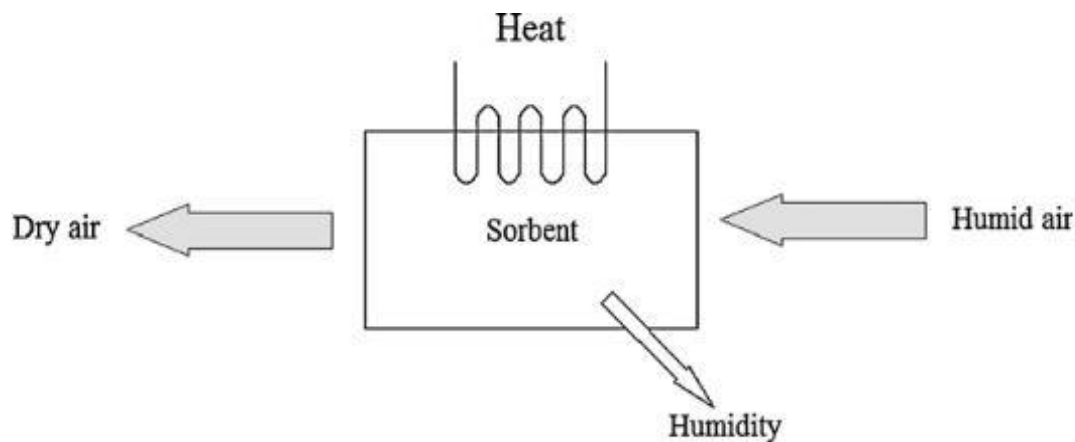
Figur 9: Oversikt over hvordan en energibrønn fungerer (Ramstad, 2017)

2.4.1.2 Kjemisk lagring

Kjemisk lagring av termisk energi kan deles inn i to hoveddeler, sorpsjon og kjemisk reaksjon. Lagring av kjemisk energi tar utgangspunkt i endo- og eksotermiske prosesser ved absorpsjon eller adsorpsjon (Bales, 2005; N'Tsoukpoe et al., 2009). I endotermiske prosesser blir energi

tatt opp og i eksotermiske prosesser blir energi avgitt. Den termiske energien som blir absorbert eller frigitt ved å splitte opp eller sette sammen et materiale er den kjemiske energien. Ved lagring av termisk energi i en kjemisk reaksjon blir en endotermisk reaksjon utført for å bryte bindinger i et stoff ved tilførsel av varme. For å benytte den lagrede energien må bindingene bli satt sammen igjen ved en eksotermisk reaksjon (Alva et al., 2017; Yan et al., 2015). Sorpsjon kan videre deles inn i absorpsjon og adsorpsjon. Sorpsjon består av en væske og et materiale som kan ta opp væske der væsken kalles for absorbent og materialet kalles for absorbator. Absorbator og absorbent vil reagere lett med hverandre og når absorbatoren får tilført varme vil det skje en endotermisk reaksjon. Når varmen blir frigitt skjer det en eksotermisk reaksjon.

Et eksempel på en kjemisk lagring av termisk energi ved sorpsjon er å integrere systemer i ventilasjonssystemet i bygninger. Den fuktige luften i ventilasjonssystemet blir absorbert av absorbenten slik at varm, tørr luft vil sirkulere videre i bygget. Ved tilførsel av varme vil absorbenten tørke og fuktigheten vil bli ført ut av systemet (Pinel et al., 2011). Figur 10 viser hvordan systemet fungerer.



Figur 10: Sorpsjon med adsorpsjon (Pinel et al., 2011).

Materialer som brukes i lagring av kjemisk energi har høye operasjonstemperaturer som normalt er over 300°C (Yan et al., 2015). Dermed er kjemiske reaksjoner godt egnet til lagring av energi ved høye temperaturer. Dette gjør kjemiske reaksjoner også mindre egnet til å lagre lavverdig energi som solenergi og avfallsenergi (Midthun, 2014).

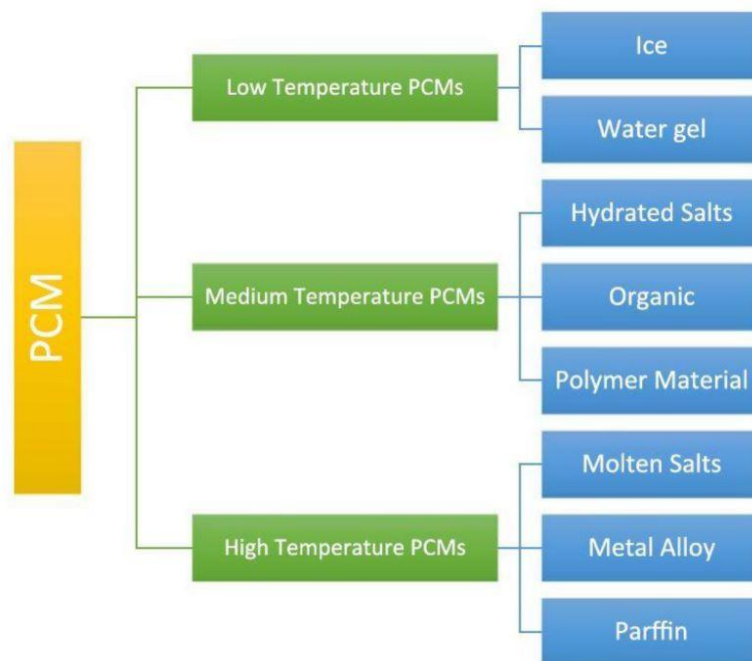
Lagring av termisk energi ved kjemisk reaksjon blir brukt ved kjøling ved lave temperaturer og oppvarming ved høye temperaturer. Ettersom at varmetapet under lagring er svært lite er

kjemisk energi godt egnet til sesonglagring av varme. Mengde energi som lagres er da avhengig av hvor mye materiale som er tilgjengelig og den endotermiske delen av reaksjonen (Alva et al., 2017; Midthun, 2014).

2.4.1.3 Latent varmelagring

Ved bruk av latent energilagring utnyttes varmevekslingen som skjer rundt faseforandringen til et materiale. Et slikt materiale kalles for faseendringmateriale eller PCM (Phase Change Materials). PCM er materialer som endrer fase ved en gitt temperatur. Disse materialene har egenskapen til å holde en temperatur over en gitt tid (Sevault, Alexis, 2018). Fasene som et PCM kan gjennomgå er: solid-solid, solid-væske, solid-gass, væske-gass og motsatt.

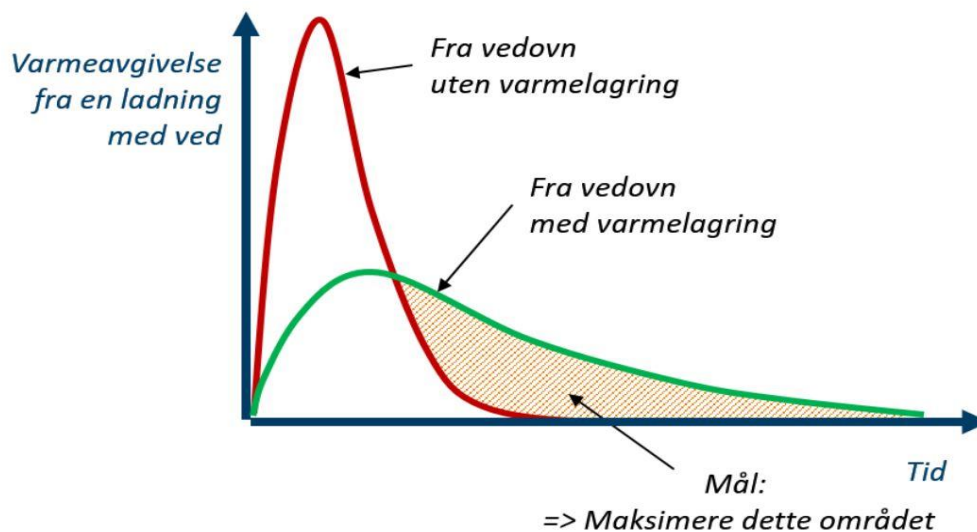
PCM kan deles inn i organiske materialer, uorganiske materialer og eutektiske materialer. Organiske materialer kan videre deles inn i parafiner og ikke-parafiner, uorganiske materialer i salhydrater og metaller. Eutektiske materialer kan deles inn i organisk-organisk, uorganisk-uorganisk og uorganisk-organiske blandinger. Eutektiske materialer er en lettmeltelig blanding av to stoffer som smelter ved lavere temperaturer enn de rene stoffene. Uorganiske materialer har generelt nesten dobbel så stor varmelagringskapasitet per enhet volum enn organiske materialer (Farid et al., 2004; Sharma et al., 2009). En av hovedkriteriene ved valg av PCM er smeltetemperaturen til materialet. Figur 11 viser hvilke PCM som passer til lave, middels og høye temperaturer.



Figur 11: Oversikt over hvilke PCM som passer til lav, middels og høy temperatur (Sarbu & Sebarchievici, 2018).

Et eksempel på en PCM er et fryseelement som kan brukes til å holde et objekt kaldt. Det er også mulig å holde på høye temperaturer ved hjelp av PCM. Når et solid PCM blir varmet til en temperatur over materialets smeltepunkt, absorberer materialet varmen og smelter. Det endrer altså fase. For at PCM skal være fullstendig solid eller fullstendig smeltet må materialet gi fra seg eller absorbere en gitt mengde energi. Denne energien kalles for latent varme. Det er mulig å finne den latente varmen for forskjellige materialer (Sevault, Alexis, 2018).

PCM kan også brukes i sammenheng med ovner. Et godt eksempel er å bruke PCM ved vedovner. I dagens hus er isoleringen så god at vedovnene fører til at huset fort blir for varmt. Ved å bruke PCM kan overskuddsvarmen absorberes før den slippes ut slik at ovnen også avgir varme etter forbrenning. Slik kan varmen avgis i et rom over lengere tid og holder temperaturen i rommet stabil (Sevault, Alexis, 2018). Dette prinsippet kan også overføres til et tørkeskap eller tørkeovn slik at temperaturen i ovnen kontinuerlig er jevn og stabil. Figur 12 viser hvordan termisk energilagring ved hjelp av PCM kan regulere temperaturen over en gitt tid.



Figur 12: Oversikt over hvordan PCM hjelper å avgi varme til et rom over en lengre periode slik at temperaturen i rommet blir stabil (Sevault, Alexis, 2018).

Vann er det mest brukte PCM i dag. På Norge vinterveier brukes det for eksempel salt blandes med regnvann for å minke frysepunktet under 0°C . Slik dannes det ikke is før lufttemperaturen er under 0°C . Det brukes også alkohol blandet med vann. Denne blandingen hjelper også med å endre på frysepunktet til under 0°C (Cabeza, 2017; Sevault, Alexis, 2018).

Det finnes flere utfordringer ved bruk av faseendingsmaterialer, der en av de første utfordringene er å velge riktig materiale til et gitt bruksområde. Materialene har andre egenskaper enn evnen til å endre fase. For eksempel kan en blanding av vann og salt skape rustdannelse og paraffiner kan være brannfarlige. Stabiliteten til materialet i faseendringen er også en viktig parameter. Noen PCM tåler høyere temperaturer enn andre og dette må tas i betraktning. Det er derfor viktig å kunne kontrollere temperaturene i et system som tar i bruk PCM (Sevault, Alexis, 2018). Tabell 2 viser smeltetemperaturen og smelteentalpien til noen av de mest relevante PCM materialene.

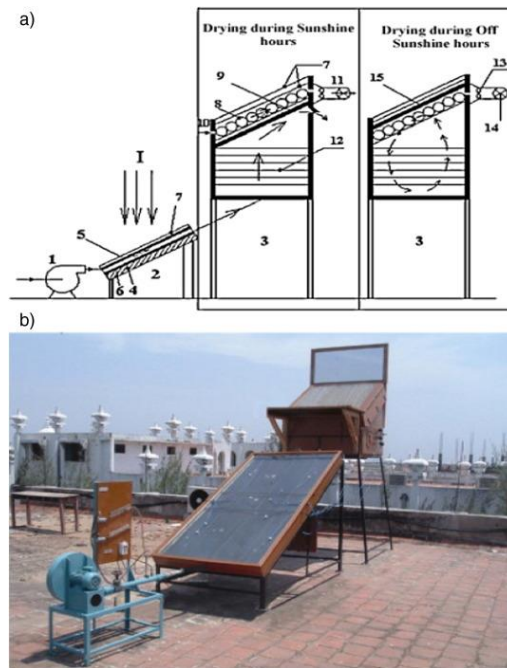
Tabell 2: Parametere til forskjellige PCM materiale, (Sarbu & Sebachievici, 2018)

PCM	Smeltetemperatur (°C)	Smelteentalpi (kJ/kg)	Tetthet (g/cm ³)
Is	0	333	0.92
Na-acetat trihydrat	58	250	1.30
Paraffin	-5-120	150-240	0.77
Erytritol	118	340	1.30

PCM materialer er altså materialer som tar til seg eller gir fra seg energi når det skjer en faseforandring. Det er dermed mulig å bruke disse materialene til å lagre termisk energi effektivt. Når det skal velges et PCM er de viktigste egenskapene: høy latent varmekapasitet, høy termisk konduktivitet, praktisk temperatur ved faseendring i forhold til bruken, minst mulig underkjøling, ingen separasjon av materialet, kjemisk stabilitet, lav kostnad og materialet skal ikke være giftig eller korroderende (Farid et al., 2004; Midthun, 2014). Ideelt sett er målet å lagre termisk energi i lik grad som elektrisk energi ved å bruke «ladebare» faser.

2.4.2 Bruk av termisk energilagring i tørkeprosesser

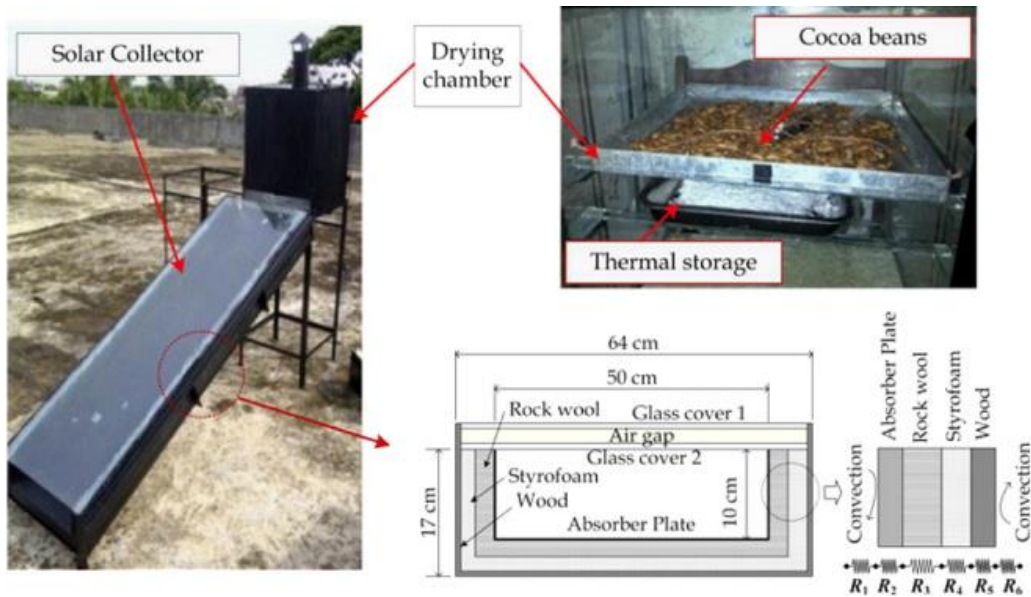
I nyere tid har tørking av mat ved hjelp av termisk energilagring blitt gjennomført. Figur 13 viser oppsettet til et forsøk der Parafinvoks er benyttet som PCM. Overskuddsvarmen lagres og brukes når det ikke er tilstrekkelig med varme for å fullføre tørkeprosessen. Forsøket ble utført i to omganger, en med og en uten sol tilstede. Varm luft fra kollektorplata blir tvunget inn i tørkekammeret og PCM-elementene lades opp ved solvarmen. Ved liten solinnstråling vil tørkeprosessen holdes i gang ved luftsirkulasjon inne i kammeret gjennom PCM elementene. Dette konseptet resulterte i uniform tørking og god kvalitet i produktet som tørkes i forhold til tørking i direkte sol.



Figur 13: a) Forklarer virkemåten til oppsett og b) Viser oppsett av forsøk med PCM (Kant et al., 2016)

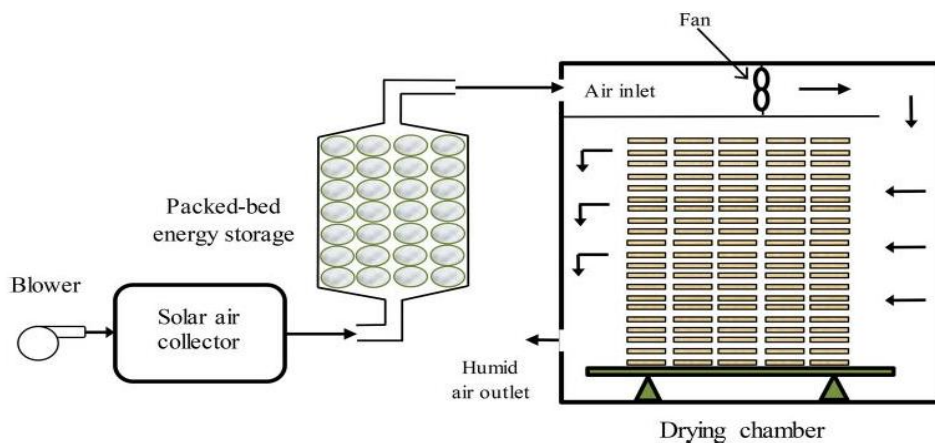
I et annet forsøk ble det brukt en tørker med indirekte sol, to luftvarmere, en vifte og et tørkekammer for å teste PCM-elementets effekt på tørkeprosesser. Tørkeren ble testet med og uten PCM elementer og resultatene viste at PCM elementene gjør lufttemperaturen jevnere. Ved bruk av PCM elementene ble temperaturen ca. 3,5 – 6,5°C høyere enn uten PCM elementene. Forsøket ble gjort med hvitløksfedd der de må tørkes fra 55% vanninnhold til 6.5% vanninnhold, noe som ligner kakaobønnens kriterier. Tørkeprosessen ble gjennomført på 8 timer (Kant et al., 2016).

Figur 14 viser et oppsett der effektiviteten ved kontinuerlig soltørking kombinert med termisk energilagring blir testet for tørking av kakaobønner. Oppsettet er satt opp av en kollektorplate, et tørkekammer og termisk energilagringselementer. Forsøket viste at tørketiden gikk fra tradisjonell tørketid på 55 timer til en ny tørketid på 44 timer. Dette er en reduksjon på 25%. Forsøket resulterte i at soltørking integrert med termisk energilagring gjør tørkeprosessen mer effektiv med tanke på tørketid og energibruk (Dinaab et al., 2015).



Figur 14: Oppsett av soltørking kombinert med termisk energilagring (Dinaab et al., 2015).

Det har også blitt gjennomført forsøk med følbare varmelager ved tørkeprosesser av trevirke. Hovedkomponentene i tørkeren som har blitt undersøkt av Bilal Lamrani og Abdeslam Draoui er en solfanger, et PBES (packed-bed energy storage) system og et tørkekammer. Under solskinnstimene vil luften fra blåseren passere gjennom solfangeren og varme opp det termiske energilageret. Varmen blir transportert fra den varme luften til det termiske energilageret ved følbare varme. Luften fra lagringssystemet blir videre benyttet i tørkeprosessen for trevirke. Når solen ikke skinner vil den kalde luften passere det termiske energilageret og oppta varme fra den følbare varmen. Den varme luften vil videre bli fraktet til tørkeprosessen slik at den kan driftes både når solen er tilstede og når solen uteblir (Lamrani & Draoui, 2020). Figur 15 viser hovedkomponentene i tørkeren og hvordan den varme luften går inn i tørkekammeret.



Figur 15: Oppsettet med Pakced-bed energy storage system (Lamrani & Draoui, 2020)

Studien resulterte i at den tradisjonelle tørketiden kunne bli redusert med 15% ved bruk av termisk energilagring. Det ble også funnet ut at det termiske energilageret bidro med varm tørkeluft i en liten del av tiden når sola uteblir. Slik kunne tørkeren driftes lenger ved bruk av termisk energilager (Lamrani & Draoui, 2020).

2.5 Masse- og energibalanse

For å beregne mengden og energibruken i en tørkeprosess brukes masse- og energibalanser. Den letteste formen for massebalansen i en tørkeprosess er:

$$input = output + akkumulering \quad (2.5.0)$$

Dersom prosessen blir regnet som adiabatisk, uten varme- og massetap, kan massebalansen forenkles og bli uttrykt som:

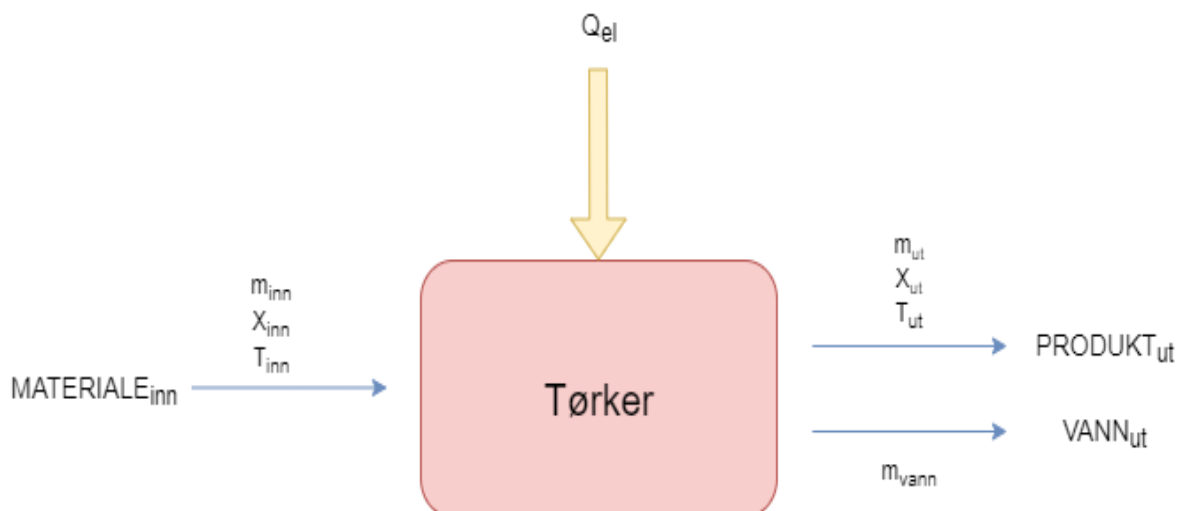
$$Input = output + fordampet vann \quad (2.5.1)$$

$$m_{inn} = m_{ut} + m_{vann} \quad (2.5.2)$$

Ved å anta at det ikke forekommer noe fordampning kan formelen forenkles:

$$m_{inn} = m_{ut} \quad (2.5.3)$$

Figur 16 viser masse- og energibalansen for en forenklet tørkeprosess der m_{inn} er masse til materialet, x_{inn} er fuktigheten til materialet og T_{inn} er temperaturen inn. M_{ut} er masse til produktet, x_{ut} er fuktigheten på produktet, T_{ut} er temperatur ut og m_{vann} er masse vann.



Figur 16: Forenklet skjema av tørkeprosess

Nødvendig tilført energi kan beregnes ved følgende formler:

$$Q = Q_m + Q_{vann} \quad (2.5.4)$$

$$Q_m = m_{inn,tørrstoff} * C_{p(Kakao)} * (T_1 - T_0) \quad (2.5.5)$$

$$Q_{vann} = m_{vann} * C_{p(vann)} * (T_1 - T_0) + m_{vann} * L_{vann} \quad (2.5.6)$$

Der $C_{p(Kakao)}$ er den spesifikke varmekapasiteten (kJ/kg K) for kakao, $C_{p(vann)}$ er den spesifikke varmekapasiteten (kJ/kg K) for vann og L_{vann} er fordampningsentalpien for vann. Basert på tilgjengelig data blir varmekapasiteten til Kakao regnet som 1.83 kJ/kg K, på grunnlag av lignende frukt og grønt (The Engineering Toolbox, 2003).

3 Metode, resultater og evaluering av resultater

I dette kapitlet blir metoden for å besvare problemstillingen beskrevet, i tillegg blir resultater presentert og evaluert. Kapitlet er delt inn i seks underkapitler som tar for seg utførte forsøk og analyser: 3.1) test av kakaobønnenes egenskaper, 3.2) test av fuktighetsinnhold fra tradisjonell tørkemethode, 3.3) beskrivelse og test av Soltørkeren, 3.4) valg og test av termisk energilagring, 3.5) sammenligning av oppvarmingen av Soltørkeren med og uten termisk energilagring, og 3.6) analyse av solkraftverket i Matouke. Under hvert forsøk vil fremgangsmåte, resultat og evaluering bli presentert. I evalueringen diskuteres resultatene. For å ha en sammenhengende struktur med en god oversikt ble det valgt å ha fremgangsmåte, resultater og evaluering i samme kapittel.

Det ble gjennomført en enkel egenskapstest av kakaobønnene og en fuktighetstest på tradisjonelt prosessert kakaobønner for å undersøke fuktighetsinnholdet. Soltørkerens egenskaper blir beskrevet og testet. Termisk energilagring ble utvalgt etter egnethet, og dens egenskaper ble analysert ved hjelp av laboratorieforsøk. Oppvarmingen av Soltørkeren med og uten termisk energilagring blir sammenlignet for å undersøke påvirkningen av termisk energilagring ved oppvarming. Overproduksjon av energi i forhold til lagringskapasitet i batteripakker ble analysert ved hjelp av tilsendt data fra solkraftverket i Matouke. Kakaobønnene som ble brukt i forsøkene ble tilsendt fra Matouke i Kamerun.

Forsøk er en god metode for å finne egenskapene til kakaobønner på en enkel måte. Ved å utføre forsøk er det mulig å undersøke hver parameter og se på hvilken påvirkning den har på tørkeprosessen slik at den kan endres med tanke på energieffektivisering. En analyse av tidligere utførte forsøk kunne ha blitt brukt for å undersøke dette. Allikevel ble det valgt å utføre laboratorieforsøk for å benytte Soltørkeren som allerede var bygd.

Det finnes flere metoder for å vurdere om termisk energilagring kan spille en rolle i effektivisering av tørkeprosessen. Litteraturstudium ble benyttet for å få en forståelse av termisk energilagring og forsøk ble utført for å teste virkningen av termisk energilagring i Soltørkeren.

På grunn av COVID-19-situasjonen ble ikke alle planlagte forsøk utført. Dermed er det ikke nok tilgjengelig rådata for å undersøke om termisk energilagring kan effektivisere

tørkeprosessen. Videre i oppgaven benyttes forsøk som ble utført for å tilegne seg forkunnskaper om kakaobønner, Soltørkeren, og termisk energilagring. Blant de planlagte forsøkene er:

- Sammenlignbare forsøk med og uten termisk energilager i Soltørkeren, der de fleste parameterne er like.
- Forsøk som viser nedkjøling av Soltørkeren med og uten termisk energilagring, for å kunne sammenligne og undersøke effekten til termisk energilagringmateriale.
- Forsøk med termisk energilagring og kakaobønner i Soltørkeren, for å undersøke Soltørkerens kapasitet.

3.1 Test av kakaobønnenes egenskaper

Ved test av kakaobønnenes egenskaper ble det tatt utgangspunkt i egenskapene lukt, smak, farge, og tekstur. Målet med testen var å få en bedre forståelse av disse egenskapene slik at disse kan observeres og sammenlignes i videre testing.

Figur 17a) viser den ferske fermenterte kakaobønningen med høyt fuktinnhold. Den hadde en slimete hinne rundt skallet. De fermenterte bønnene hadde en sterk gjærlignende lukt og ved lagring ble lukten mer eddiklignende. På figur 17b) vises den samme bønningen etter at den har blitt tørket i et tørkeskap på 105 grader i 24 timer. Kakaobønningen får en mørkere farge etter at den tørkes. Lukten av eddik og gjær forsvinner i løpet av tørkeprosessen. Skallet blir lettere å fjerne og kjernen av bønningen er mørk og litt lilla-farget. Smaken er bitter med en ettersmak av mørk sjokolade. Figur 17c) viser den tørre kjernen.



Figur 17: a) Fersk fermentert kakaobønne, b) Tørket kakaobønne, c) Kjernen til en tørket kakaobønne

De fermenterte bønnene som ikke ble tørket begynte å mugne etter lagring i romtemperatur over en periode på 1-2 uker. Lukten av gjær og eddik ble enda sterkere og kakaobønnene fikk et hvitt belegg som kan sees på figur 18.



Figur 18: Kakaobønner med mugg

For å finne ut hvor stort areal en gitt mengde fermenterte kakaobønner rommer ble det spredd ca. 1.4 kg kakaobønner utover en plate på ca. 0,14 m². Bønnene ble lagt enkeltvis i et lag utover platen. Dette ga ca. 10 kg kakaobønner per 1m². Figur 19 viser platen med kakaobønnene.



Figur 19: Hvor stort areal kakaobønnene rommer

3.2 Test av fuktighetsinnhold fra tradisjonell tørkemetode: fuktighetsforsøk

Det ble gjennomført et enkelt forsøk for å undersøke fuktighetsinnholdet til kakaobønnene som hadde blitt tørket på den tradisjonelle metoden i Matouke. Målet med forsøket var å undersøke om tørkemetoden, som blir brukt i dag, fører til ønskelig fuktighetsinnhold i kakaobønnene. Det settes en hypotese om at tørkemetoden ikke er tilstrekkelig.

3.2.1 Fremgangsmåte for fuktighetsforsøk

Det ble hentet kakaobønner som var tørket på den tradisjonelle måten fra Matouke. Følgende utstyr ble brukt:

Tørkeskap på 105°C

Tre stk. krus

En kjøkkenvekt

25 gram med tørkede kakaobønner ble veid inn i tre forskjellige krus. Krusene med bønnene ble plassert i et tørkeskap på 105°C i 24 timer. Tid og temperatur ble valgt for å sikre fullstendig tørking med tilnærmet lik 0% fuktighetsinnhold. Kakaobønnene ble veid etter tørking og vanninnholdet ble beregnet.

3.2.2 Resultat av fuktighetsforsøk

Kakaobønnene som var blitt tørket på den tradisjonelle måten i Matouke veide i gjennomsnitt 23 gram etter fullstendig tørking, som kan sees på figur 20.



Figur 20: Vektendringen før og etter tørking i tørkeskap.

Ca. 2 gram vann fordampet vekk fra kakaobønnene. Noe som vil si at de tørkede kakaobønnene fra Matouke hadde et vanninnhold på ca. 8%.

3.2.3 Evaluering av fuktighetsforsøk

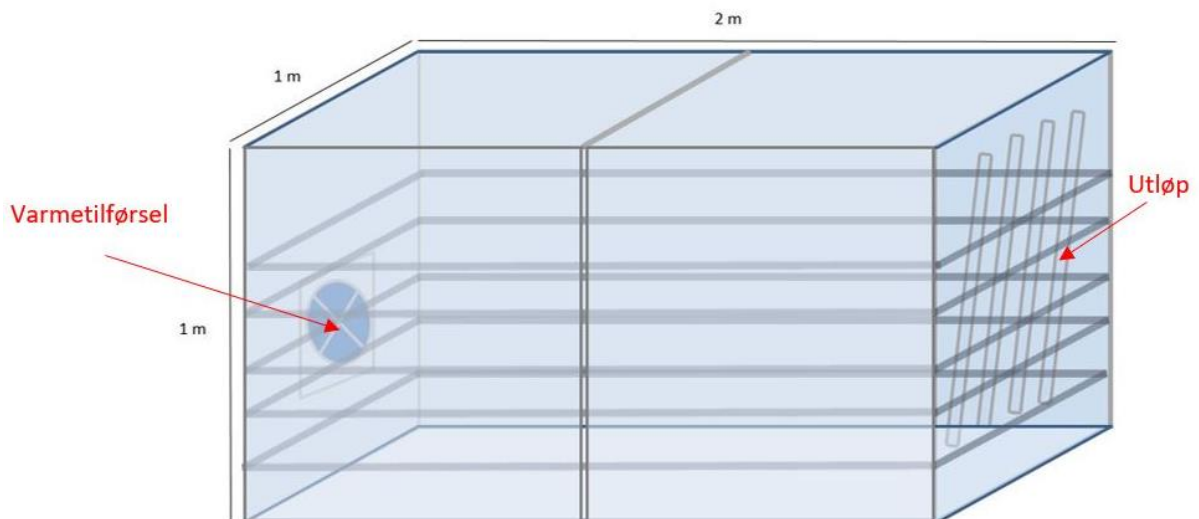
Test av tradisjonell tørkemetode viste at kakaobønnene som tørkes i Matouke har 8% fuktighetsinnhold, noe som er 2% mer enn ønsket verdi. Mulige feilkilder ved forsøket kan være unøyaktig veiing av kakaobønnene på kjøkkenvekten og usikkerhet rundt fuktighetsinnholdet til kakaobønner etter 24 timer tørking i varmeskap på 105°C. Hvis feilkildene blir sett bort ifra er hypotesen om at tørkemethoden ikke er tilstrekkelig sann.

3.3 Beskrivelse og test av Soltørkeren

Prototypen «Soltørkeren» som er blitt laget i sammenheng med Agrisolar-prosjektet benyttes i forsøkene der tørkeprosessen skal energieffektiviseres. Soltørkeren vil bli beskrevet og testet for ytelse i dette delkapittelet.

3.3.1 Beskrivelse av Soltørkeren

Soltørkeren er formet som en boks med 10 hyller, et utløp, og et hull til varmekilden som vist i figur 20. Boksen er 1m lang, 2m bred og 1m høy, og gir et volum på 2m³. Veggene og taket til boksen er laget av gjennomsiktig polykarbonat for å kunne inspisere produktet underveis i tørkeprosessen uten temperaturtap, slik at kontroller kan gjennomføres til riktig tid. Den ene veggen er laget som dobbeltdør for tilgang til oppfylling og tømning. Hver hylle er 1m² og laget av perforert aluminium. Hyllene ligger i et skinnesystem slik at operatøren enkelt kan skyve hyllene inn og ut. Soltørkerens varmekilde er en Namrom varmluftvifte med 3300W og 230V. Som sagt tidligere vil 1m² kunne romme ca.10kg kakaobønner. Det gir plass til ca. 100kg kakaobønner i Soltørkeren. Figur 21 viser formen og figur 22 viser materialene til Soltørkeren.



Figur 21: Soltørkeren med mål



Figur 22: Soltørkeren (Omberg, 2020)

3.3.2 Ytelsestest av Soltørkeren

Det ble gjennomført et forsøk for å teste ytelsen til Soltørkeren. Målet med forsøket var å finne ut om den fikk en høy nok temperatur, på mellom 50-60°C, til å tørke kakaobønnene. Det ble også observert hvor stor temperaturforskjellen var i Soltørkeren. Hypotesen ble satt til at Soltørkeren oppnår en tilstrekkelig temperatur for å tørke kakaobønner når den er tom.

3.3.2.1 Fremgangsmåte for ytelsestest

For å gjennomføre forsøket blir følgende utstyr brukt:

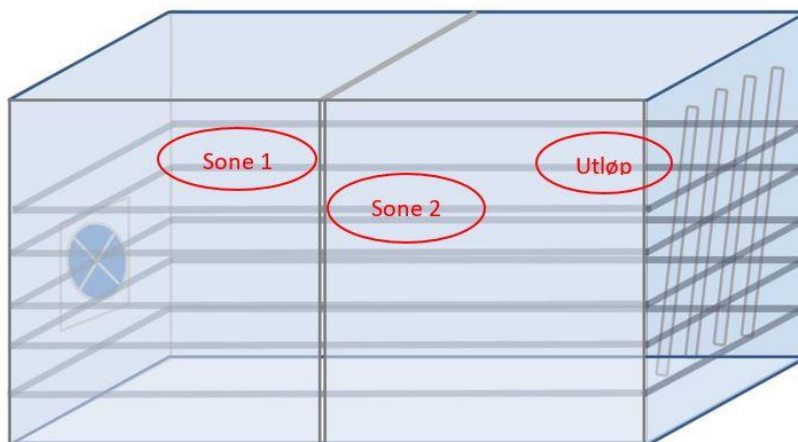
Soltørkeren,

Testo datalogger programvare,

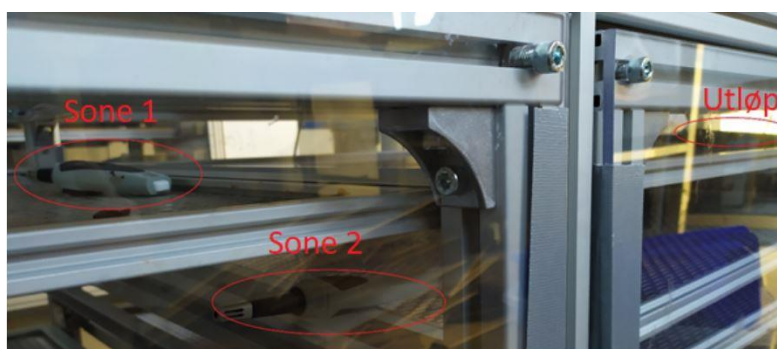
Testo 635 datalogger

3 stk. Testo RF måleprober som måler relativ fuktighet og temperatur

Måleprobene ble lagt i tre forskjellige soner, vist i figur 23 og 24, for å undersøke om det er en temperaturforskjell i tørkeren og om den er betydelig. Den ene måleproben ble lagt i den øverste hyllen, sone 1, den andre ble lagt i hyllen under, sone 2, og den siste måleproben ble lagt ved utløpet. Slik kunne også gjennomsnittstemperaturen i prototypen beregnes i etterkant av forsøket. Soltørkeren ble varmet over en periode på ca. 3 timer. Dataloggeren registrerte temperaturen underveis og en maksimumstemperatur for hver sone ble registrert. Den gjennomsnittlige maksimumstemperaturen for prototypen ble beregnet ved å bruke maksimumstemperaturen for hver sone.



Figur 23: Oppsett for ytelsestest av Soltørker



Figur 24: De forskjellige sonene fra forsøksoppsettet (Omberg, 2020)

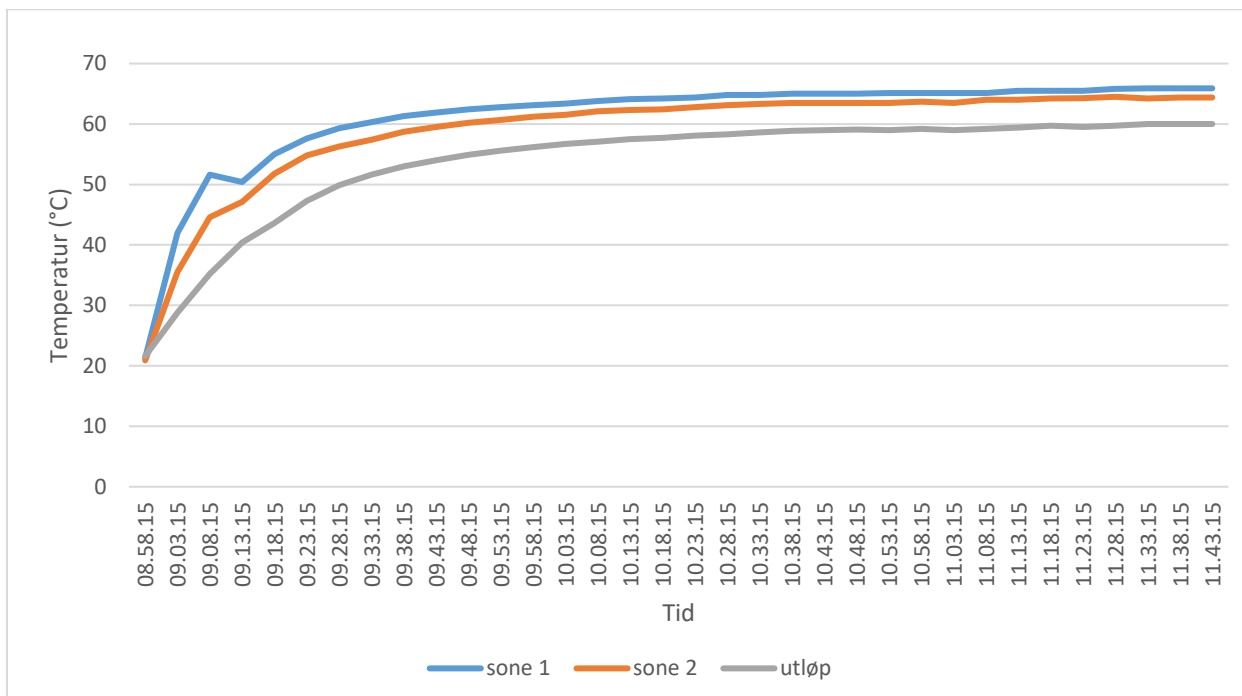
3.3.2.2 Resultat for ytelsestest

Resultatene fra soltørkerens ytelsestest vises i tabell 3. Tabell 3 er en utskrift fra testoprogramvaren og den viser at det er forskjellige temperaturer i de forskjellige sonene i Soltørkeren. I sone 1 ble det målt en maksimumstemperatur på 66,10°C og i sone 2 ble det målt en maksimumstemperatur på 64,50°C. Ved utløpet ble det målt en enda lavere maksimumstemperatur på 60,10°C som vises i tabell 3. Den gjennomsnittlige maksimumstemperaturen i tørkeren ligger på ca. 63,56°C.

Tabell 3: Maksimum, minimum og gjennomsnittstemperatur i Soltørkeren ved de forskjellige sonene etter tre timer.

	Min. temp. (C°)	max.temp. (C°)	mean temp. (C°)
Sone 1	21,30	66,10	61,54
Sone 2	20,90	64,50	59,36
Utløp	21,60	60,10	54,14

Resultatene fra ytelsestestingen til Soltørkeren visualiseres i figur 25 der blå er sone 1, rød er sone 2, og grå er ved utløpet. Det kan sees at temperaturforskjellen er betydelig. Tabell for figuren og visualisering fra dataloggeren kan sees i vedlegg 2.



Figur 25: Ytelsestest av Soltørkeren

3.3.2.3 Evaluering av ytelsestest

Ytelsestesten forteller at det er forskjellige temperaturer i ulike soner i soltørrereren. Det betyr at varmen ikke ble jevnt fordelt over hele volumet i tørrereren. Tørreraten blir påvirket av dette og blir ulik i de forskjellige sonene. Dette kan forbedres ved å sirkulere den tilførte varme luften bedre internt. Økt luftsirkulasjon gir bedre varmefordeling som igjen gir jevnere temperatur.

Den gjennomsnittlige maksimumstemperaturen i tørrereren ligger på ca. 63,56°C. Dette er en akseptabel tørketemperatur for tørking av kakaobønner. Hypotesen om at temperaturen i Soltørrereren er tilstrekkelig for å tørke kakaobønner er sann. Det er ønskelig å holde temperatur mellom 50-60°C i tørrereren.

3.4 Valg og test av termisk energilagring

Det er mulig å gjøre tørkeprosessen mer energieffektiv ved å ta bruk av termisk energilagring. Overskuddsvarme fra tørkeprosessen kan lagres og brukes når det ikke er tilstrekkelig med energi til prosessen, som forklart i kapittel 2.4.2. I en tørkeprosess brukes varme og det er derfor gunstig å velge en metode og et materiale som lagrer termisk energi ved oppvarming. Det velges dermed en metode for termisk energilagring og et materiale som er optimal for tørkeprosessen. Videre testes det valgte materiale i Soltørrereren for å undersøke om den har en positiv innvirkning på tørkeprosessen.

3.4.1 Valg av termisk energilagring

For å velge en optimal termisk energilagring metode for tørkeprosessen presenteres de forskjellige termiske energilagring metodene som følbar lagring, kjemisk lagring, og latent varmelagring, mer grunnleggende beskrevet i kapittel 2.4.1. Følbar lagring virker slik at energimengden som kan lagres stiger lineært med temperaturøkningen. Dette gjør at endringen i temperatur avgjør hvor mye energi som lagres. Følbar lagring har en effektivitet på 50-90%. Kjemisk lagring virker ved at bindinger mellom molekyler brytes og oppstår. Det egner seg til lagring av energi ved høye temperaturer, noe som gjør kjemisk lagring til mindre egnet til lagring av solenergi. Kjemisk lagring har en effektivitet på 75-100%. Ved latent varmelagring kan energien lagres ved faseovergangen til et materiale og det krever ikke en høyere temperatur enn faseovergangstemperaturen for å lagre mest mulig energi. Latent varmelagring har en effektivitet på 75-90%.

Ettersom at kakaobønner burde tørkes på en temperatur mellom 50°C og 60°C er latent varmelagring det mest gunstige valget når det kommer til termiske energilagringsteknologier. Latent varme har en mye høyere lagringstetthet sammenlignet med teknologier for lagring av følbare varme. Latent varmelagring har også en høy effektivitet. Tørkeprosessen er langtrukket og latent varmelagring har egenskapen til å lagre energien over en periode på flere timer. Det er mulig å finne PCM som passer med tørketemperaturen og har en høy latent varme. Dermed velges latent varmelagring.

Viktige parameter for å velge en gunstig PCM er: høy latent varmekapasitet, høy termisk konduktivitet, praktisk temperatur ved faseendring i forhold til bruken, minst mulig underkjøling, ingen separasjon av materialet, kjemisk stabilitet, lav kostnad, og at materialet ikke skal være giftig eller korroderende. Hovedfokuset ved valg av PCM ligger på parameterne høy latent varmekapasitet og praktisk temperatur ved faseendring.

Det er ønskelig å undersøke ulike PCM som is, vann, erytriton, parafin og natriumacetattrihydrat. Is har en høy latent varme men har en betydelig lavere smeltetemperatur enn tørketemperaturen for kakaobønner. Kokepunktet til vann er betydelig høyere enn tørketemperaturen. Is og vann er dermed ikke optimale PCM for tørkeprosessen. Erytritol har en høy latent varme, men har også et betydelig høyere smeltepunkt enn tørketemperaturen. Parafin kan ha en smeltetemperatur mellom -5°C og 120°C, noe som er et veldig bredt spekter. Parafin er et organisk PCM og har dermed en lavere latent varme. Erytritol og parafin velges bort siden de ikke egner seg. Natriumacetattrihydrat, ($\text{NaCH}_3\text{COO}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$), har en smeltetemperatur som ligger nært tørketemperaturen til kakaobønnene og en relativ høy latent varme. Det velges derfor å bruke natriumacetattrihydrat. Natriumacetattrihydrat endrer fase fra fast til flytende ved 58°C og varmekapasiteten ved fast stoff er 2,79 kJ/kg K og 3,0 kJ/kg K ved flytende stoff. For at natriumacetattrihydrat skal endre fase fra fast til flytende kreves det en energimengde på 260 kJ/kg (Seljeskog, 2012). Når stoffet endrer fase fra flytende til fast vil den samme energimengden bli frigjort.

Videre blir det brukt en PCM av en natriumacetattrihydrat-blanding med faseendringstemperatur på 55°C som ble tilsendt fra leverandør. Tabell 4 viser egenskapene til den tilsendte natriumacetattrihydrat-blandingen. Det tekniske databladet for blandingen kan sees i vedlegg 1.

Tabell 4: Oversikt over egenskapene til tilsendt Natriumacetattrihydratblanding,

Materialet	Faseendings temperatur	Faseendingsenergi (Latent varme)	Varme kapasitet (fast stoff)	Varme kapasitet (flytende)
Natriumacetattrihydrat -blanding	55°C	240 kJ/kg	1,5 kJ/kg K	3,0 kJ/kg K

3.4.2 Test av PCM i Soltørkeren

Det ble gjort et forsøk for å undersøke virkningen av PCM, natriumacetattrihydrat-blanding, i Soltørkeren. Målet med forsøket var å bestemme om PCM kan redusere energiforbruket i tørkeprosessen og å undersøke oppladningstiden og utladningstiden til PCM. Det settes en hypotese om at PCM kan redusere energiforbruket til tørkeprosessen.

3.4.2.1 Fremgangsmåte for test av PCM

For å teste virkningen av PCM ble følgende utstyr brukt:

Prototype for soltørker med Namron varmluftsvifte, 3300W og 230V

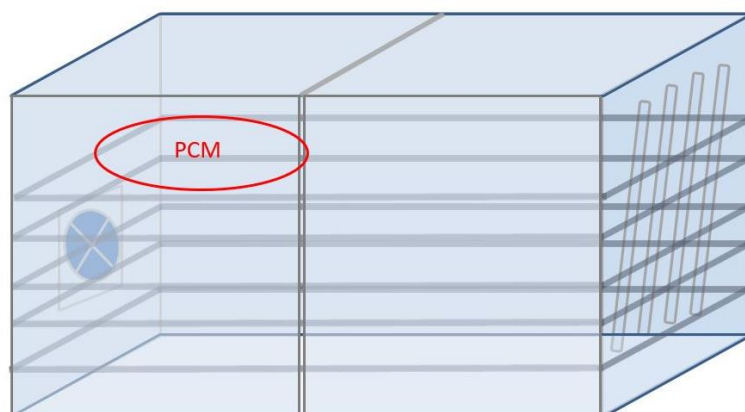
Testo datalogger programvare

Testo 635 datalogger

3 stk. Testo RF måleprober som måler relativ fuktighet og temperatur

En kjøkkenvekt

For å undersøke effekten av PCM ble det satt opp et testoppsett med 21 pakker med natriumacetattrihydrat-blanding med en totalvekt på ca. 11kg. PCM-elementene ble fordelt utover i den øverste hyllen i Soltørkeren. Elementene ble ladet opp over en periode på ca. 8,5 timer og ble inspisert ca. hver time for å sjekke om faseovergangen hadde skjedd. Temperaturene ble målt ved hjelp av Testo måleprobene. Testoppsettet er vist i figur 26 og 27.



Figur 26: Plassering av PCM-blandingen i soltørkeren



Figur 27: Testoppsett for test av PCM –blanding

Temperaturmålinger for oppvarming av Soltørkern ble tatt for å kunne sammenlignes med målinger fra testen uten PCM. Varmetilførselen ble avbrutt etter at materialet hadde oppnådd faseovergang. For å bestemme virkningen av termisk energilagring ble temperaturfallet målt ved nedkjøling etter at varmetilførselen ble brutt.

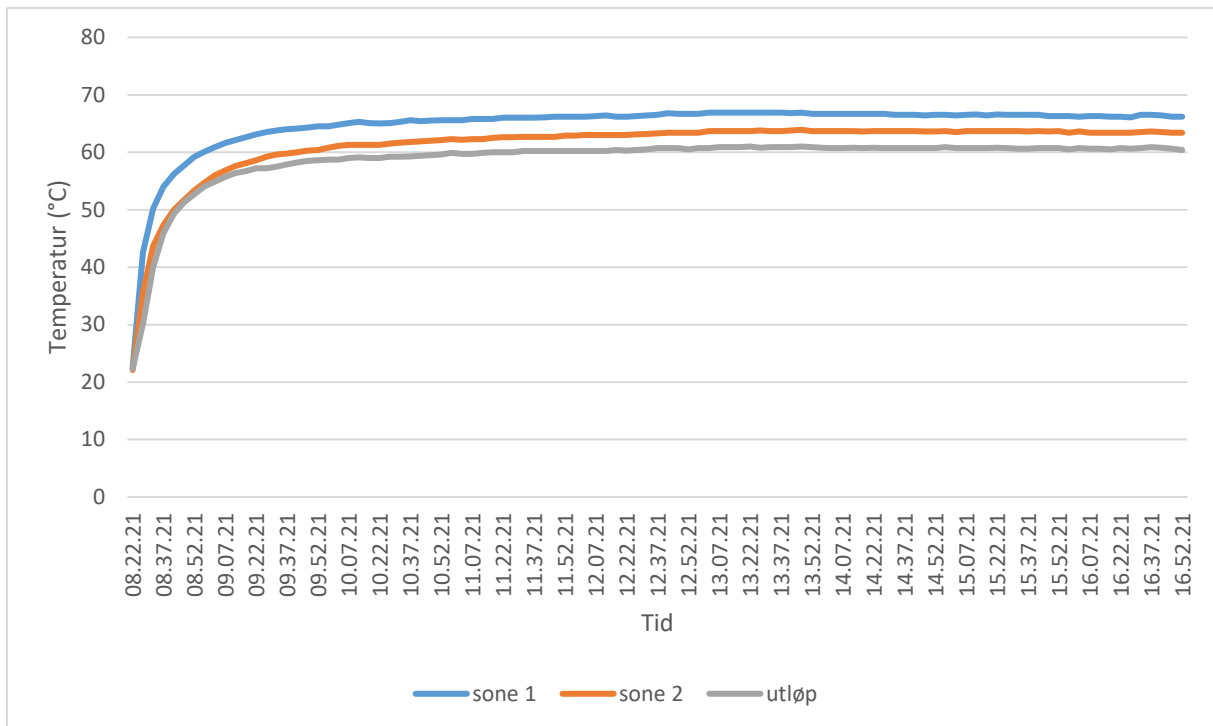
3.4.2.2 Resultat for test av PCM

Resultatene fra forsøket med PCM elementene i Soltørkeren vises i tabell 5. Det kan sees at tørkeren får en maksimumstemperatur på 67,10°C, 63,90°C og 61,10°C. Dette gir en gjennomsnittlig maksimumstemperatur på 64,03°C.

Tabell 5: Maksimum, minimum og gjennomsnittstemperatur i Soltørkeren ved de forskjellige sonene etter 8,5 timer.

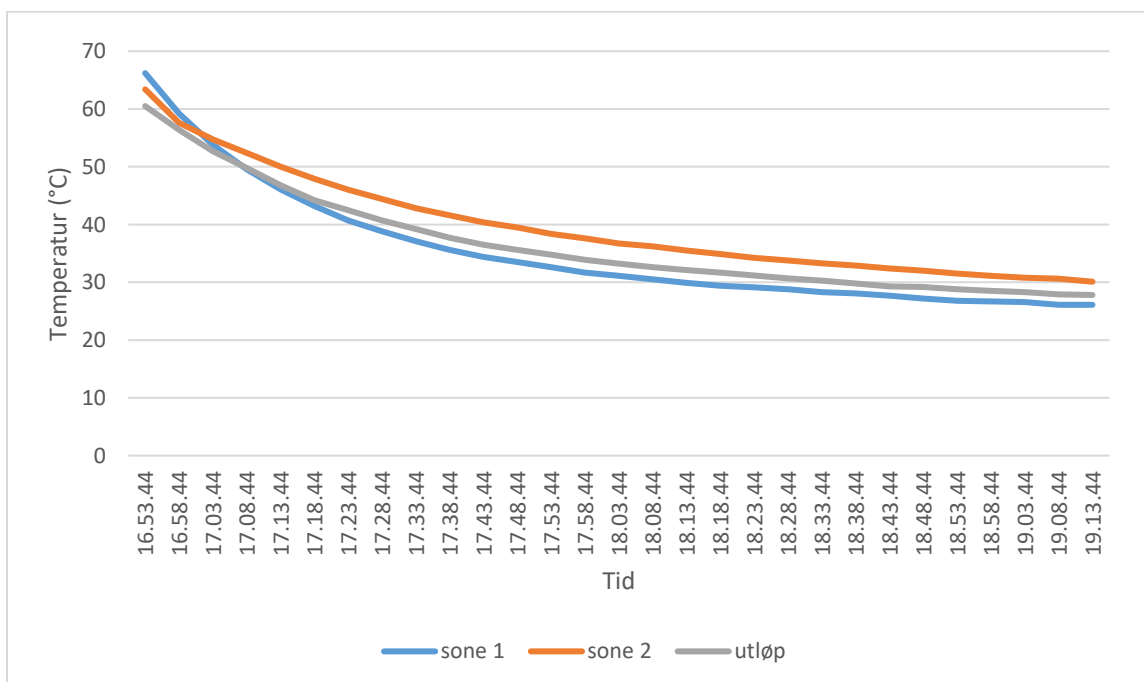
	Min. temp. (C°)	max.temp. (C°)	mean temp. (C°)
Sone 1	22,5	67,1	64,9
Sone 2	22,1	63,9	61,39
Utløp	22,3	61,1	58,85

Tabell 5 visualiseres i figur 28. Det kan observeres at temperaturen holder seg stabil etter å ha nådd maksimumstemperatur.



Figur 28: Test av PCM i Soltørkeren

Ved utladningen av PCM elementene ble det registrert at temperaturfallet avtar med tiden. Figur 29 illustrer at Soltørkeren holder en temperatur høyere enn 50°C i ca. 20 minutter etter at energitilførselen blir slått av. Tabell for figur 28 og figur 29, og visualisering fra dataloggeren kan sees i vedlegg 3.



Figur 29: Nedkjøling av Soltørkeren ved test av PCM

3.4.2.3 Evaluering for test av PCM

For å simulere en situasjon som er mest mulig lik virkeligheten, ble PCM-elementene testet i Soltørkeren. I Matouke skal det brukes en tørkeenhet med lignende form som Soltørkeren med varmluftvifte som varmetilførsel. Ettersom at Soltørkeren allerede var bygd, var det den enkleste måten å teste PCM-elementene på.

En mulig feilkilde ved forsøket er usikkerheten om PCM-elementene hadde en fullstendig faseovergang. Hvis faseovergangen ikke var fullstendig ville ikke elementene ha blitt oppladet og utladet fullstendig. De kunne ha gitt en høyere energimengde ved fullstendig faseovergang.

Ved nedkjøling ble det registrert at temperaturfallet avtar med tiden. Temperaturen sank med ca. 20°C i løpet av en periode på ca. 50 minutter. Det betyr at PCM-elementene ble ladet opp gjennom oppvarmingen og ladet ut over en periode på 50 minutter. Ettersom at forsøket kun inneholdt 11kg med PCM-elementer kan en større mengde med PCM-elementer øke utladningsperioden ytterligere, slik at Soltørkeren holdes varm over en lenger periode. Etter at varmluftsviften ble slått av sto PCM for varmetilførselen. Det ble observert at sone 2 var den sonen der nedkjølingen var mest langsom. Dette kan skyldes at sone 2 ligger nær PCM-elementene og vil av den grunn holde høy temperatur over lenger tid. Hypotesen om at PCM kan redusere energiforbruket til tørkeprosessen er sann siden PCM-elementene lagrer energi som kan benyttes til å tørke kakaobønner ved å redusere eller avslutte energitilførselen.

3.4.3 Energiberegning

En stor mengde PCM-elementer kan monteres inn i Soltørkeren. PCM-elementene kan settes inn i sideveggene utenom dørveggen, gulv og tak slik at det blir et areal på $1\text{m}^2 + 1\text{m}^2 + 2\text{m}^2 + 2\text{m}^2 + 2\text{m}^2 = 8\text{m}^2$. Per 1m^2 kan det settes inn ca. 11kg PCM, noe som tilsier at prototypen kan inneholde ca. 88kg PCM.

Energien som kan lagres i 88kg natriumacetattrihydrat-blanding ved gjennomsnittlig maksimumstemperatur kan beregnes ved:

$$Q_{PCM} = \left(88\text{kg} * 1,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}}\right) (328\text{K} - 298\text{K}) + \left(88\text{kg} * 240 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) + \left(88\text{kg} * 3,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}}\right) (337\text{K} - 328\text{K})$$

$$Q_{PCM} = 27456\text{kJ}$$

Det er ønskelig å vite hvor mye energi som brukes for å tørke kakaobønner for finne et forhold mellom hvor mye energi som trengs for å tørke kakaobønner og hvor mye energi som kan lagres i et termisk energilager. Det antas at Soltørkeren skal tørke 100kg kakaobønner per tørkesyklus. Det beregnes derfor på et eksempel der Soltørkeren skal tørke 100kg fermenterte kakaobønner med en fuktighet på 60% til et produkt med en fuktighet på 6%.

Tørrstoffet i kakaobønnene beregnes ved:

$$100kg * (1 - 0,6) = 40kg$$

Vannmengden i de fermenterte kakaobønnene:

$$100kg - 40kg = 60kg$$

Mengde sluttprodukt beregnes ved å skrive om på formel (2.5.3):

$$\frac{40kg}{x} = \frac{(1 - 0,06)}{1}, \quad x = 42,56kg$$

Mengde fordampet vann:

$$100kg - 42,56kg = 57,44kg$$

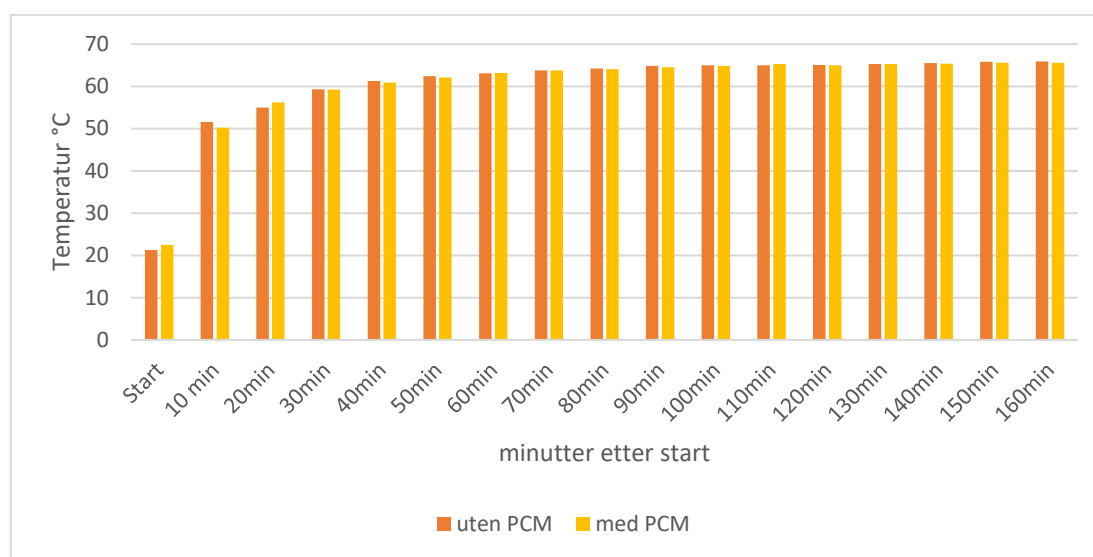
Nødvendig tilført energi til kakaobønnene beregnes ved å bruke formel (2.5.4), (2.5.5) og (2.5.6):

$$Q = \left(40kg * 1,83 \frac{kJ}{kg * K}\right) (337K - 298K) + \left(60kg * 4,18 \frac{kJ}{kg * K}\right) (337K - 298K) \\ + (57,44kg * 2256 \frac{kJ}{kg}) \\ Q = 142221kJ$$

Energien som kan lagres i 88kg natriumacetattrihydrat-blanding er dermed ca. 19% av energien som trengs for å tørke 100kg kakaobønner.

3.5 Sammenligning av temperaturstigning i Soltørkeren med og uten termisk energilagring

Figur 30 viser en sammenligning av resultatene fra ytelsestest og test av virkningen til natriumacetattrihydrat-blandingen i Soltørkeren, der sammenligningen kun ser på oppvarmingen av Soltørkeren i den varmeste sonen. Det kan observeres at Soltørkeren oppnår en temperatur nær tørketemperaturen relativt raskt selv om den inneholder PCM.



Figur 30: Sammenligning av oppvarmingen av Soltørkeren med og uten PCM

I figur 30 kan det observeres at temperaturene er relativt like i Soltørkeren med og uten PCM og dette kan tilsa at PCM trekker til seg en liten mengde energi per tidsenhet. Dermed vil ikke oppvarmingen av PCM være betydelig for temperaturen i Soltørkeren under tørkeprosessen og oppvarmingen av Soltørkeren vil skje ca. like raskt med og uten PCM.

3.6 Analyse av solkraftverk i Matouke (analyse av overskuddsstrøm)

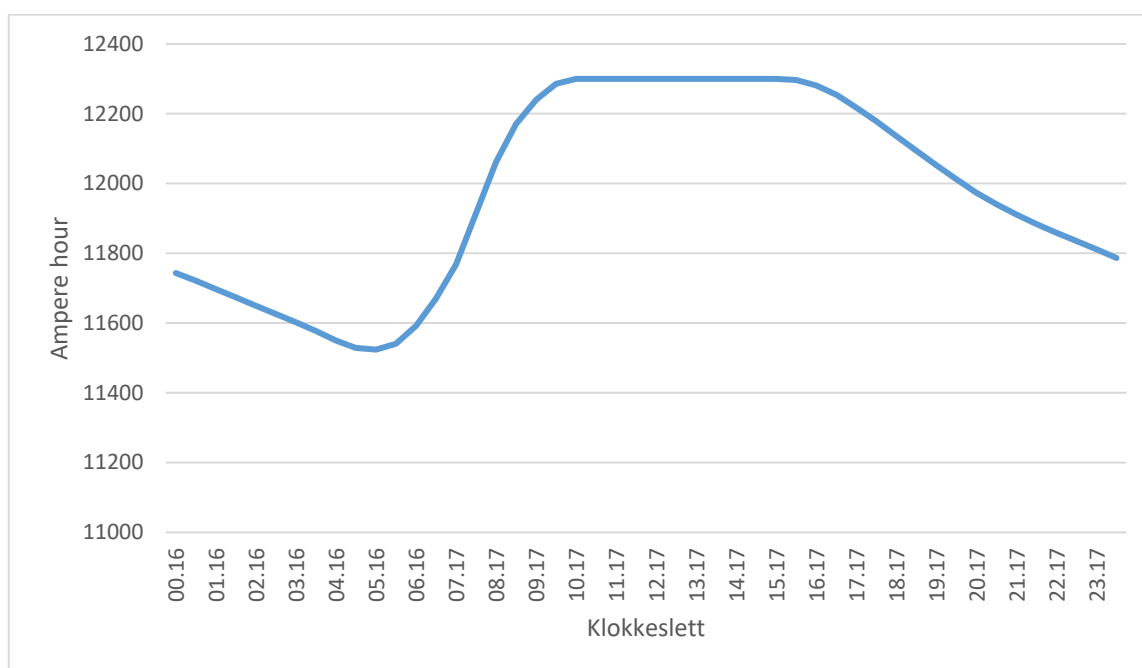
For å drifte tørkerenheten skal energien fra solkraftverket i Matouke brukes. En analyse av energiproduksjonen i solkraftverket og energibruket i Matouke kan hjelpe å planlegge driften av tørkerenheten og eventuelle termisk energilagring lokalt i tørkerenheten. Tilsendt data fra solkraftverket blir brukt i denne analysen. Tabell 6 viser et utdrag fra dataloggeren som logger ulike parametere som batterispenning, batteristrøm, effekt, PV-strøm, last strøm, kapasiteten på batteripakkene, og temperaturen på batteripakkene en gang i halvtimen hele døgnet.

Tabell 6: Utdrag fra dataloggen fra solkraftverket i Matouke den 01.02.2020 (Batt V = batterispenning i volt, Batt I = batteristrømmen i Ampere, Load I = laststrømmen i Ampere, solar I = strøm hentet inn fra solcellene i Ampere, Power = effekt i watt, Batt Temp = batteritemperatur i C og Batt.Rem Cap = batterikapasitet i AmpereHour)

Time	Batt V (v)	Batt I (A)	Load I (A)	Solar I (A)	Power (W)	Batt Temp(°C)	Batt.Rem Cap(Ah)	Batt temp(°C)	Batt.Rem Cap(Ah)
00:16	50.40	-44	48	0	2318	31	11743	31	11743
00:46	50.40	-44	44	0	2315	31	11721	31	11721
01:16	50.25	-48	48	0	2211	31	11698	31	11698
01:46	50.25	-48	48	0	2311	31	11674	31	11674
02:16	50.18	-46	46	0	2408	31	11650	31	11650
02:46	50.10	-48	48	0	2404	30	11626	30	11626
03:16	50.03	-50	48	0	2404	31	11602	31	11602
03:46	50.03	-53	53	0	2651	30	11577	30	11577
04:16	49.95	-53	53	0	2647	31	11550	31	11550
04:46	50.18	-29	38	9	1803	30	11529	30	11529
05:16	50.78	8	53	61	2691	31	11524	31	11524
05:46	52.45	73	75	148	3933	31	11541	31	11541
06:16	53.59	161	97	258	5198	30	11592	30	11592
06:46	53.74	164	105	269	5588	31	11670	31	11670
07:17	54.96	302	155	457	8298	32	11768	32	11768
07:47	56.09	368	213	581	11947	31	11914	31	11914
08:17	56.47	289	61	351	3327	32	12062	32	12062
08:47	56.40	191	0	119	0	32	12170	32	12170
09:17	56.47	126	0	0	0	33	12240	33	12240
09:47	56.55	77	0	0	0	34	12286	34	12286
10:17	56.47	45	0	0	0	34	12300	34	12300
10:47	56.40	25	0	0	0	34	12300	34	12300
11:17	56.40	19	0	0	0	35	12300	35	12300
11:47	56.32	15	0	0	0	35	12300	35	12300
12:17	56.32	13	0	0	0	35	12300	35	12300
12:47	56.32	15	0	0	0	36	12300	36	12300
13:17	56.32	15	0	0	0	36	12300	36	12300
13:47	56.25	15	0	0	0	36	12300	36	12300
14:17	56.40	15	0	0	0	35	12300	35	12300
14:47	56.09	13	2	16	224	35	12300	35	12300
15:17	55.87	13	69	82	3855	35	12300	35	12300
15:47	52.45	-16	32	15	1728	35	12297	35	12297
16:17	52.07	-39	39	0	2134	35	12281	35	12281
16:47	51.69	-74	74	0	3825	35	12255	35	12255
17:17	51.54	-76	78	0	4020	34	12218	34	12218
17:47	51.39	-83	83	0	4265	33	12178	33	12178
18:17	51.32	-85	85	0	4259	33	12136	33	12136
18:47	51.16	-85	85	0	4246	34	12094	34	12094
19:17	51.09	-81	78	0	4087	34	12053	34	12053
19:47	50.94	-78	78	0	3973	33	12012	33	12012
20:17	50.94	-69	69	0	3509	33	11974	33	11974
20:47	50.78	-65	65	0	3300	33	11941	33	11941
21:17	50.78	-55	55	0	2792	32	11911	32	11911
21:47	50.78	-53	53	0	2691	32	11884	32	11884
22:17	50.78	-48	48	0	2437	33	11859	33	11859
22:47	50.71	-48	48	0	2434	32	11835	32	11835
23:17	50.63	-48	48	0	2430	32	11811	32	11811
23:47	50.56	-48	48	0	2426	32	11787	32	11787

Solkraftverket i Matouke har to blybatteripakker med batterikapasitet på ca. 12300 Ah hver. Energi som blir produsert i solkraftverket lagres i batteripakkene og brukes til husholdningene i Matouke. Ut ifra tabell 6 kan det sees at energibruken i Matouke er betydelig mindre enn batterikapasiteten. Gjennomsnittlig blir det kun brukt 10% av batterikapasiteten, noe som gir et overskudd på 11800 Ah per batteripakke døgnet rundt. Denne energien kan brukes til å drifte

Soltørkeren. Tabell 6 viser også at det er solinnstrålingen i Matouke mellom klokken 04.00 og 17.00. Figur 31 viser en oversikt over når på dagen batterikapasiteten er oppnådd.



Figur 31: Oversikt over batterikapasitet i Matouke den 01.02.2020

Figur 31 viser at batterikapasiteten var oppnådd tidlig på dagtid og at batteripakken holdt seg fulladet over en viss periode. Batterikapasiteten var oppnådd klokken 10.17 på den aktuelle dagen og batteripakken var fulladet i en periode på 6 timer, fra 10.17 – 16.17. I denne perioden var produsert strøm (Solar I) lik null, det vil si at det ikke var energiproduksjonen fra solcellekraftverket. Det kan antas at det var mye sol på dette tidsrommet og solkraftverket kunne ha produsert mer energi enn batterikapasiteten. Det var også en periode der lasten trakk strøm (load I) uten at batterikapasiteten ble redusert. Det betyr at solkraftverket produserte mer strøm enn det kan lagres på batteripakkene. Disse dataene forteller at det kan hentes mye energi fra solkraftverket som kan lagres ved hjelp av termisk energilagring. PCM kan lades opp med overskuddsstrømmen som ikke kan lagres på batteripakkene. Denne energien kan frigjøres og benyttes på slutten av tørkeprosessen ved enten å redusere eller å avslutte varmetilførselen til tørkeenheten. Slik kan energibruken til tørkeprosessen i Matouke effektiviseres enda mer.

Den minste registrerte batteriladningen den aktuelle dagen er ca. 11500 Ah per batteripakke og batteripakken har en spenning på ca. 50V. Energimengden på batteripakken kan beregnes ved:

$$Wh = V * Ah$$

$$Wh = 50V * 11500Ah = 575kWh$$

Soltørkeren trekker 3,3kW. Det beregnes antall Soltørkere som kan kobles til solkraftverket i 24 timer den aktuelle dagen.

$$\frac{575kWh}{3,3kW} = 174,24h$$

$$\frac{174,24h}{24h} = 7,3$$

Det kan kobles 7 Soltørkere som kan tørke kakaobønner i 24 timer per batteripakke den aktuelle dagen dersom det antas at 100% av batterikapasiteten kan benyttes. Totalt kan 14 Soltørkere tørke kakaobønner i 24 timer på denne dagen. Dersom tørketiden til 100kg kakaobønner er 24 timer eller mindre er det mulig å tørke 1400kg kakaobønner på 24 timer ved å bruke batterikapasiteten fra solkraftverket.

4 Diskusjon

I dette kapitlet blir det diskutert hvorvidt energi fra solkraftverket sammen med termisk energilagring kan bidra til en energieffektiv tørkeprosess. Det skal diskuteres hvilke momenter som skulle ha blitt belyst i oppgaven, som uteble på grunn av Covid-19 situasjonen. Anbefalinger om videre arbeid blir også gitt.

Soltørkeren skal drives av energien som blir produsert av solkraftverket. Analysen av tilsendte data av energiproduksjonen i solkraftverket forteller at solkraftverket er i stand til å produsere mer energi enn energiforbruket i Matouke daglig. Selv om lasten trekker enda mer på grunn av Soltørkeren kan batteripakkene bli fulladet. Det vil si at når Soltørkeren trekker energi, kan solkraftverket produsere mer energi dersom det er tilstrekkelig med solinnstråling. I perioden uten solinnstråling tappes energi fra batteripakkene for å drive Soltørkeren.

Det ble gjennomført forsøk for å undersøke virkemåten til PCM, men forsøket ble ikke gjennomført med tanke på hvor mye energi som kan lagres i PCM. Det ble derfor utført beregninger der det kan sees at energien som kan lagres i 88kg PCM tilsvarer 19% av energien som trengs for å tørke 100kg kakaobønner. Den lagrede energien kan benyttes enten ved en kontrollert reduksjon av varmetilførselen eller ved at varmetilførselen blir avsluttet. På denne måten kan den termisk lagrede energien bidra til å effektivisere tørkeprosessen.

Dersom batterikapasiteten hadde vært større hadde det vært mulig å lagre overskuddsenergien fra solkraftverket og bruk av PCM hadde ikke vært nødvendig. Det har blitt valgt av Sunergy å ikke øke batterikapasiteten. Bruk av PCM materialet kan være en god løsning for å lagre overskuddsenergien med tanke på tørking av kakaobønner. PCM er også økonomisk gunstig i forhold til bruk av batteripakker. Ved skalering av energilagring kan det også vurderes andre systemer og materialer som for eksempel vann som er en billig løsning, men har lavere energitetthet.

Soltørkeren kan ved hjelp av solkraftverket stå for en energieffektiv tørkeprosess. Med denne løsningen vil tidsbruken, arbeidskraften og tap av innhøstede kakaobønner ved dagens tørkeprosess kunne minkes. Miljøpåvirkninger som for eksempel avskoging og klimagasser som kommer av vedfyring vil kunne utebli. HMS problemene knyttet til åpen ild og avhengigheten av klima ved direkte soltørking vil også kunne unngås. Den fossile energien som brukes i dagens tørkeprosess vil kunne utelukkes ettersom at Soltørkeren skal drives av en

fornybar energikilde. Kvaliteten på kakaobønnene vil også bedres som et resultat av en jevnere temperatur. Dermed vil Soltørkeren i sammenheng med solkraftverket og termisk energilagring forbedre dagens tørkeprosess.

Bruk av solenergi sammen med termisk energilagring er et godt alternativ for energieffektivisering av tørkeprosessen, men det er flere momenter som burde belyses i forhold til en bedre løsning. For eksempel ble ytelsestesten av Soltørkeren tatt over et mindre tidsrom enn testen med PCM. Det er derfor vanskelig å sammenligne gjennomsnittstemperaturene i Soltørkeren med og uten PCM. Det er også vanskelig å si om PCM gir variasjoner i tørketemperaturen gjennom tørkeprosessen. Etersom Soltørkeren kun har blitt testet med 11 kg PCM er det vanskelig å si om Soltørkeren klarer å oppnå en tilstrekkelig temperatur med 88kg PCM. Hvis Soltørkeren ikke oppnår en temperatur på 55°C eller over, vil heller ikke PCM gjennomgå en faseendring. Da vil heller ikke PCM bli ladet opp. Det har ikke blitt gjennomført forsøk for å teste nedkjølingen av Soltørkeren uten PCM og det er derfor vanskelig å sammenligne hvor stor påvirkning PCM gir ved nedkjøling. Det som kan sies er at nedkjøling med en større mengde PCM enn testet mengde vil gjøre nedkjølingen mer langtrukken og føre til at temperaturen i Soltørkeren holder seg lenger. I tillegg burde Soltørkerens totale energiforbruk for hver syklus belyses. Energien som brukes for å tørke kakaobønnene er en liten del av energiforbruket til Soltørkeren. Dette kan skyldes at Soltørkeren slipper ut luft med høy temperatur ut utløpet. Det kan derfor være gunstig å undersøke hvordan energiforbruket til Soltørkeren kan minskes ved for eksempel å gjenvinne den varme luften som slippes ut av utløpet ved bruk av kondensering og varmevekslere.

Videre vil det være fordelaktig å kunne kontrollere systemet, slik at temperaturen i Soltørkeren kan holdes jevn og konstant i ønsket temperatur. Ved å automatisere styring av inputenergien i forhold til temperaturen i Soltørkeren kan energibruken optimaliseres. Hvis varmetilførselen reguleres kan PCM holde temperaturen i Soltørkeren jevn, samtidig som at energibruken effektiviseres. Det kan derfor være av interesse å arbeide videre med regulering, sensorbruk og annen teknologi som motoriserte omrørere og interne vifter.

Det at varmetilførselen er montert på en side av Soltørkeren gjør det vanskelig å holde en jevn temperatur. Det vil oppstå soner nærmere varmluftviften der det er høyere temperaturer og soner lengst borte fra varmluftviften der det er lavere temperaturer. Det er mulig å bruke PCM for å gjøre temperaturen i Soltørkeren jevnere ved å plassere dem i de «kalde sonene». Dersom

temperaturen går under faseendringstemperaturen vil PCM gi fra seg varme og holde temperaturen jevn. Det kan også brukes vifter inne i Soltørkeren slik at den varme luften sirkuleres. Da vil temperaturen i hele Soltørkeren være jevn og temperaturforskjellen mellom de forskjellige sonene vil kunne minke. Ved høy luftsirkulasjon vil også PCM få en mer unison faseovergang slik at Soltørkeren kan holde optimal temperatur over en lenger periode.

Det kunne også vært mulig å ha tatt bruk av solen ytterligere ved å sette Soltørkeren i solen. Da kan PCM bli oppladet av varme fra solen i tillegg til overskuddsenergi fra solkraftverket. Slik kan direkte varme fra solen være med på å energieffektivisere tørkeprosessen. Alternative utforminger der PCM ligger i beholdere utenfor tørkekammeret og blir varmet opp av direkte sol kunne også ha blitt brukt, men på grunn av at PCM skulle festes inni Soltørkeren ble det valgt å se vekk ifra disse alternativene.

Videre i Agrisolar-prosjektet burde planlagte forsøk bli utført for å kunne undersøke virkningen av PCM i Soltørkeren og hvor effektivt kakaobønnene kan tørkes. Problemstillinger som omhandler tørketid, varmetap, og utladningstid på PCM burde besvares. Utførelse av kontrollerte forsøk vil kunne hjelpe å besvare nødvendige problemstillinger. Til slutt vil det være hensiktsmessig å teste tørkeprosessen med kakaobønner og PCM i Soltørkeren i et reelt tilfelle med energi fra solkraftverket med tanke på tørketid og soltimer i Matouke.

5 Konklusjon

I oppgaven ble det undersøkt om det er mulig å utvikle en energieffektiv tørkeprosess i Kamerun ved hjelp av overskuddsstrøm fra solkraftverk og termisk energilagring.

Analysen av tilsendt data fra Matouke viser at solkraftverket er i stand til å produsere tilstrekkelig energi daglig i løpet av solskinnsperioden, slik at batteripakken blir fulladet selv om forbruket blir høyere ved bruk av Soltørkeren. Den lagrede energien i batteripakkene bevares til bruk for perioden uten solinnstråling. Beregningene viser at den termiske energien som kan lagres i 88kg faseendringsmateriale tilsvarer ca. 19% av energien som trengs for å tørke 100kg kakaobønnene. Den termisk lagrede energien kan benyttes ved å redusere eller avslutte energitilførselen til Soltørkeren. På denne måten kan både solkraftverket og faseendringsmaterialet bidra til en energieffektiv tørkeprosess. Soltørkeren, solkraftverket og faseendringsmaterialet vil være en god erstatning for den tradisjonelle tørkemethoden ettersom at miljøpåvirkning, avhengighet av klima og kvaliteten på kakaobønnene forbedres.

6 Litteraturliste

AKSOY, U. (2015). *Agri-food supply chains in cross-border trade of nuts and dried fruit: dried figs, dried apricots* Tilgjengelig fra:

<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trade/agr/meetings/ge.02/2015/Presentations-DDP-Workshop/03July-Aksoy-1.pdf> (lest 12.04.2020).

Alva, G., Liu, L., Huang, X. & Fang, G. (2017). *Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Tilgjengelig fra:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116306700?fbclid=IwAR1MpAv_cQ_wI1646f6AXnPkD_4BRZ1f4QXOMX4jGcZM-ZY_YBDk_3hpr00s (lest 30.04.2020).

Bal, L. M., Satya, S., Naik, S. N. & Meda, V. (2011). *Review of solar dryers with latent heat storage systems for agricultural products*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Tilgjengelig fra:

https://www.academia.edu/17460439/Review_of_solar_dryers_with_latent_heat_storage_systems_for_agricultural_products (lest 27.04.2020).

Bales, C. (2005). *Thermal Properties of Materials for Thermo-chemical Storage of Solar Heat*. Tilgjengelig fra: https://www.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/task32-Thermal_Properties_of_Materials.pdf (lest 03.04.2020).

Bjånes, E. E. (2019). *Forbedring av tørkeprosessen til kakaobønner fra Sørvest-Kamerun ved bruk av solenergi*. Masteroppgave. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.

Tilgjengelig fra: https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/2647433/Bj%20a5nes_2019_Forbedring%20av%20t%20c%20b8rkeprosessen%20til%20kakaob%20c%20b8nner%20fra%20S%20c%20b8rvest-Kamerun%20ved%20bruk%20av%20solenergi.pdf?sequence=1&isAllowed=y (lest 30.04.2020).

Cabeza, L. F. (2017). *Advances in Thermal Energy Storage Systems*: Woodhead Publishing.

Tilgjengelig fra:

https://books.google.no/books?hl=no&lr=&id=590AwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Cabeza+L.+F.,+%E2%80%9CAdvances+in+Thermal+Energy+Storage+Systems%E2%80%9D,+2017&ots=suJAFkOYSH&sig=E8vXdrV8bWo6OxbRt0szVUCmVo&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (lest 16.03.2020).

Christensen, M. & Moskvil, N. H. (2017). *Bruk av termisk lagret energi i kontorbygg tilknyttet fjernvarmenettet til Hafslund Varme*. Masteroppgave. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Tilgjengelig fra: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/2465601> (lest 19.02.2020).

Dhingra, D., Agarwal, S. & Jain, S. (2019). *Episode IV: Role of phase changing materials in solar thermal storage system*. Tilgjengelig fra:

https://www.researchgate.net/publication/333103402_Episode_IV_ROLE_OF_PHASE_CHANGING_MATERIALS_IN_SOLAR_THERMAL_STORAGE_SYSTEM (lest 30.04.2020).

Dinaab, S. F., Ambaritab, H., H.Napitupulub, F. & Kawai, H. (2015). *Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans*. ScienceDirect. Tilgjengelig fra:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X14000410> (lest 26.02.2020).

Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K. & Al-Hallaj, S. (2004). *A review on phase change energy storage: materials and applications*. Energy Conversion and Management Tilgjengelig fra:

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0196890403002668?token=2960AA613ED680E49F3BC56A8C1E13F566876CF741DBF90EB71888C206942ABFBAA76615869357816593578CF35EB0DC> (lest 02.04.2020).

Fellows, P. J. (2009). *Food processing technology: Principles and Practice*. Food processing technology: Principles and Practice. Tilgjengelig fra:

https://books.google.no/books?hl=no&lr=&id=t4ykAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Food+Processing,+principles+and+practice.&ots=xfsooJgjYZ&sig=xTDzEukNzTgKz6YcEDkUWIreq88&redir_esc=y#v=onepage&q=Food%20Processing%2C%20principles%20and%20practice.&f=false (lest 19.02.2020).

FN-SAMBANDET. (2019). *FNs bærekraftsmål*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/Om-FN/FNs-baerekraftsmaal> (lest 04.02.2020).

Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A. & Sulaiman, M. Y. (2010). *Review of solar dryers for agricultural and marine products*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Tilgjengelig fra:

https://www.academia.edu/2593345/Review_of_solar_dryers_for_agricultural_and_marine_products (lest 27.04.2020).

Guda, P., Gadhe, S. & Jakkula, S. (2017). *Drying of Cocoa Beans by Using Different Techniques*. Tilgjengelig fra:

https://ijair.org/administrator/components/com_jresearch/files/publications/IJAIR_2330_FIN_AL.pdf (lest 19.02.2020).

International Cocoa Organization. (2013). *processing cocoa*. Tilgjengelig fra:

<https://www.icco.org/about-cocoa/processing-cocoa.html> (lest 27.03.2020).

Kant, K., A.Shukla, Sharma, A., Kumar, A. & Jain, A. (2016). *Thermal energy storage based solar drying systems: A review*. Innovative Food Science & Emerging Technologies.

Tilgjengelig fra:

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1466856416000126?token=FBC76CEC66B1FA7664FEE3ABD3D58FAD470BA8578B2703777209D95524B2A2771CFEF3D929B25C694F489EF0E6DB2539> (lest 24.02.2020).

Krosby, A. J. (1998). *Tørking av slam*. Tilgjengelig fra: https://vannforeningen.no/wp-content/uploads/2015/06/1998_30815.pdf (lest 12.04.2020).

Kvam, M. E. & Winge, N. K. (2018). *Energibrønner*. Tilgjengelig fra:

https://www.idunn.no/tidsskrift_for_eiendomsrett/2018/02/energibroenner (lest 19.02.2020).

Lamrani, B. & Draoui, A. (2020). *Thermal performance and economic analysis of an indirect solar dryer of wood integrated with packed-bed thermal energy storage system: A case study of solar thermal applications*. Drying Technology. Tilgjengelig fra:

<https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1750025> (lest 16.04.2020).

Mathlouthi, M. (2001). *Water content, water activity, water structure and the stability of foodstuffs*. Food Control. Tilgjengelig fra:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956713501000329#FIG1> (lest 12.04.2020).

Midthun, C. (2014). *Teknologier for sesonglagring av termisk energi*. Masteroppgave. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Tilgjengelig fra: <https://static02.nmbu.no/mina/studier/moppgaver/2015-Midthun.pdf> (lest 06.03.2020).

N'Tsoukpoe, K. E., Liu, H., Pierrès, N. L. & Luo, L. (2009). *A review on long-term sorption solar energy storage*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109001129> (lest 03.03.2020).

NIBE. (u.å.). *Hvordan fungerer en energibrønn?* Tilgjengelig fra: <https://www.nibe.no/nyheter-og-presse/nyheter/hvordan-fungerer-en-energibrønn/> (lest 19.02.2020).

Nicolas, G., Serge, K., Marcel, E., Alexis, K. & Belkacem, Z. (2019). *Pratice of Drying Cocoa in Humid Tropical Zone: Case of Southern Cameroon*. Tilgjengelig fra: <https://www.ijera.com/papers/vol9no7/Series-5/G0907055056.pdf> (lest 27.03.2020).

NSF. (2008). *Tørking av mat*. Tilgjengelig fra: <https://speiding.no/speiderprogram/speiderbasen/torking-av-mat> (lest 19.02.2020).

NVE. (2019). *Energilagring*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/energibruk-effektivisering-og-teknologier/teknologier/energilagring/?ref=mainmenu> (lest 23.01.2020).

Omberg, O. S. (2020). *Prosjektrapport –Agrisolar «Utvikling av soltørker for å sørge for mer effektiv og bærekraftig prosessering av kakao»*. Upublisert manuskript.

Ore, S. & Nesse, N. (2017). *Tørking - teknikk*. Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/t%C3%B8rking - teknikk> (lest 19.02.2020).

Pinel, P., A.Cruickshank, C., Beausoleil-Morrison, I. & Wills, A. (2011). *A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211100150X> (lest 12.04.2020).

R.Graven, A. (2011). *Sjokolade for perfeksjonister*. forskning.no. Tilgjengelig fra: <https://forskning.no/mat-okonomi/sjokolade-for-perfeksjonister/802210> (lest 12.04.2020).

Ramstad, R. K. (2017). *Energibrønner som varmekilde for varmepumper - Har kuldebransjen noe å lære her?* powerpoint presentasjon. Tilgjengelig fra: [https://energi.tekna.no/wp-content/uploads/2017/10/Energibr%C3%B8nner Norsk Kj%C3%B8leteknisk Forening 26.10.20171.pdf](https://energi.tekna.no/wp-content/uploads/2017/10/Energibr%C3%B8nner%20Norsk%20Kj%C3%B8leteknisk%20Forening%2026.10.20171.pdf) (lest 19.02.2020).

Reenaas, T. W., Marstein, E. S. & Foss, S. E. (2008). *Tredje generasjon solceller*. Tilgjengelig fra: <https://www.naturfag.no/artikkel/vis.html?tid=973782> (lest 07.04.2020).

Rosvold, K. A. (2019). *solkraftverk*. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/solkraftverk> (lest 07.04.2020).

- SAPVIA & PVGreenCard. (u.å.). *Solar PV Installation Guidelines*. Tilgjengelig fra: <https://www.pvgreencard.co.za/Solar%20PV%20Guidelines%20-%20Digital%20Spread%20High-res.pdf> (lest 25.02.2020).
- Sarbu, I. & Sebarchievici, C. (2018). *A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage*. Tilgjengelig fra: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/1/191/htm> (lest 17.03.2020).
- Seljeskog, M. (2012). *Status på utviklingen av vedovner*. Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/globalassets/upload/konsern/media/sintef-seminar-foredrag/foredrag-m-seljeskog-4-des-2012.pdf> (lest 08.04.2020).
- Sevault, A. (2018). *Hva er faseendringsmaterialer (PCM) og vil det slå an i Norge?* Blogg: Sintef. Tilgjengelig fra: <https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/energieffektivisering-cat/pcm-faseendringsmaterialer/> (lest 19.02.2020).
- Sevault, A. (2018). *What are Phase Change Materials? (Will they be the next big thing in Norway?)*. Tilgjengelig fra: <https://blog.sintef.com/sintefenergy/phase-change-materials-pcm/> (lest 15.01.2020).
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R. & Buddhi, D. (2009). *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032107001402> (lest 02.04.2020).
- Sintef. (u.å.). *Termisk energilagring*. Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/termisk-energilagring/> (lest 17.02.2020).
- Smets, A., Jæger, K., Isabella, O., Swaaij, R. v. & Zeman, M. (2016). *Solar energy*: UIT Cambridge Ltd.
- SNL. (2018). *Kakao*. Store Norske Leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/kakao> (lest 18.02.2020).
- Sokhansanj, S. & Jayas, D. S. (2006). Drying of Foodstuffs. I: Mujumdar, A. S. (red.) *Handbook of Industrial Drying*. Tilgjengelig fra: <https://www.china-sand-maker.com/propdf2/20151219032752993.pdf> (lest 27.04.2020).
- Stefanussen, S. (2017). *Energilagring er «det nye store»*. Blogg. Tilgjengelig fra: <https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/lagring-av-energi-det-nye-store/> (lest 19.02.2020).
- Sunergy. (2019). *The power to change lives*. Sunergypower.org: wordpress.com. Tilgjengelig fra: <https://sunergypower.org/> (lest 13.01.2020).
- The Engineering Toolbox. (2003). *Specific Heat of Food and Foodstuff*. Tilgjengelig fra: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-food-d_295.html (lest 23.03.2020).
- Unneberg, M. M. (2017). *Termisk energilagring ved Sarpsborg varmesentral*. Masteroppgave. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Tilgjengelig fra: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/2464656> (lest 19.02.2020).

Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Clavería, R. o., Quispe, I., Vergara, J., Uribe, E., Paez, H. & Scala, K. D. (2011). *Effect of air temperature on drying kinetics and quality characteristics of osmo-treated jumbo squid (Dosidicus gigas)*. LWT - Food Science and Technology.

Tilgjengelig fra:

https://www.academia.edu/6998597/Effect_of_air_temperature_on_drying_kinetics_and_quality_characteristics_of_osmo-treated_jumbo_squid_Dosidicus_gigas (lest 27.04.2020).

Yan, T., Wang, R. Z., Li, T. X., Wang, L. W. & T.Fred, I. (2015). *A review of promising candidate reactions for chemical heat storage*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114009460> (lest 03.04.2020).

Øygarden, O. (2011). *Evaluering av energieffektive tørkesystem i solrike område*.

Masteroppgave. Trondheim: Institutt for energi- og prosesssteknikk. Tilgjengelig fra:

<https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/234340> (lest 30.01.2020).

Vedlegg 1

Datablad til termiskenergilagringsmaterialet, PCM-blanding.



Shanghai Cloud Chemical Co., Ltd

TECHNICAL DATA SHEET

NAME : Phase change material (Organic&Inorganic)

Item	Data	
Crystallization temperature °C	55°C±1°C	
Density (g/cm ³)	Solid 1.40 liquid 1.42	
Thermodynamic Property	Crystallization enthalpy(KJ/kg)	240
	Specific heat capacity (KJ/Kg·°C)	1.5 solid 3 liquid
heat conductivity, w/m·°C	(solid)0.22	
	(liquid) 0.25	
Compatibility of packaging materials	PP	compatible
	Iron	compatible
	Passivation Aluminium	compatible
	304 stainless steel	compatible
	Aluminium	compatible
Copper	compatible	
combustion performance	Inflaming retarding	
Safety and environmental Performance	Safe and environmental	
Volatility	non-volatile	
Cycle times	>5000	

Vedlegg 2

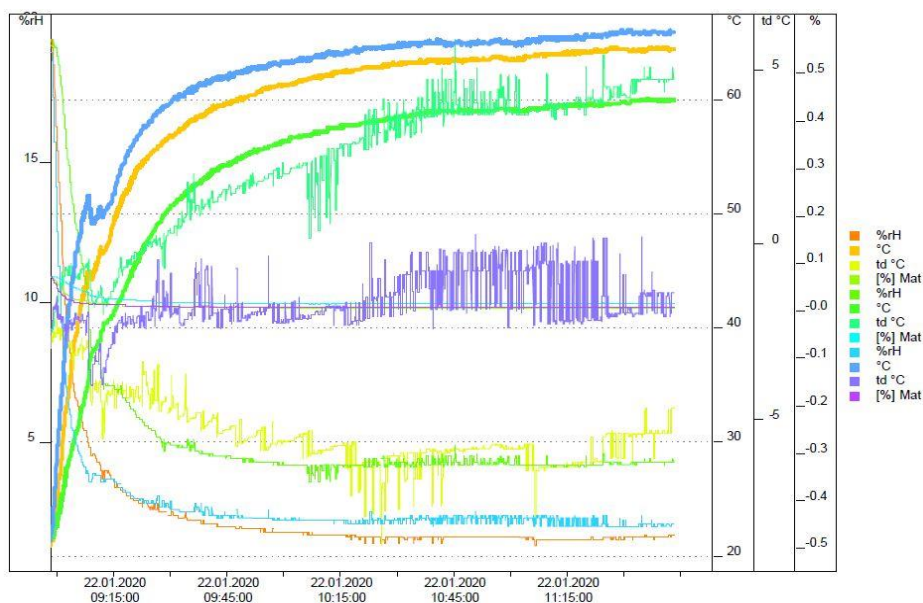
Resultat fra ytelsestest av Soltørkeren.

Tabell 1: målinger tatt hver 5. minutt

tid	sone 1 (°C)	sone 2 (°C)	Utløp (°C)
08:58:15	21,3	20,9	21,6
09:03:15	42	35,5	28,8
09:08:15	51,6	44,6	35,2
09:13:15	50,4	47,1	40,4
09:18:15	55	51,8	43,6
09:23:15	57,6	54,8	47,3
09:28:15	59,3	56,3	49,9
09:33:15	60,3	57,4	51,6
09:38:15	61,3	58,7	53
09:43:15	61,9	59,5	54
09:48:15	62,4	60,2	54,9
09:53:15	62,8	60,7	55,6
09:58:15	63,1	61,2	56,2
10:03:15	63,4	61,5	56,7
10:08:15	63,8	62,1	57,1
10:13:15	64,1	62,3	57,5

10:18:15	64,2	62,4	57,7
10:23:15	64,4	62,8	58,1
10:28:15	64,8	63,1	58,3
10:33:15	64,8	63,3	58,6
10:38:15	65	63,5	58,9
10:43:15	65	63,5	59
10:48:15	65	63,5	59,1
10:53:15	65,1	63,5	59
10:58:15	65,1	63,7	59,2
11:03:15	65,1	63,5	59
11:08:15	65,1	64	59,2
11:13:15	65,5	64	59,4
11:18:15	65,5	64,2	59,7
11:23:15	65,5	64,3	59,5
11:28:15	65,8	64,5	59,7
11:33:15	65,9	64,2	60
11:38:15	65,9	64,4	60
11:43:15	65,9	64,4	60

Visualisering fra dataloggprogrammet: der blå er sone 1, oransje er sone 2 og grønn er ved utløpet.



Figur 1: visualisering fra dataprogrammet

Vedlegg 3

Resultat fra test av natriumacetattrihydrat-blandingen.

Tabell 2: målinger tatt hvert 5. minutt

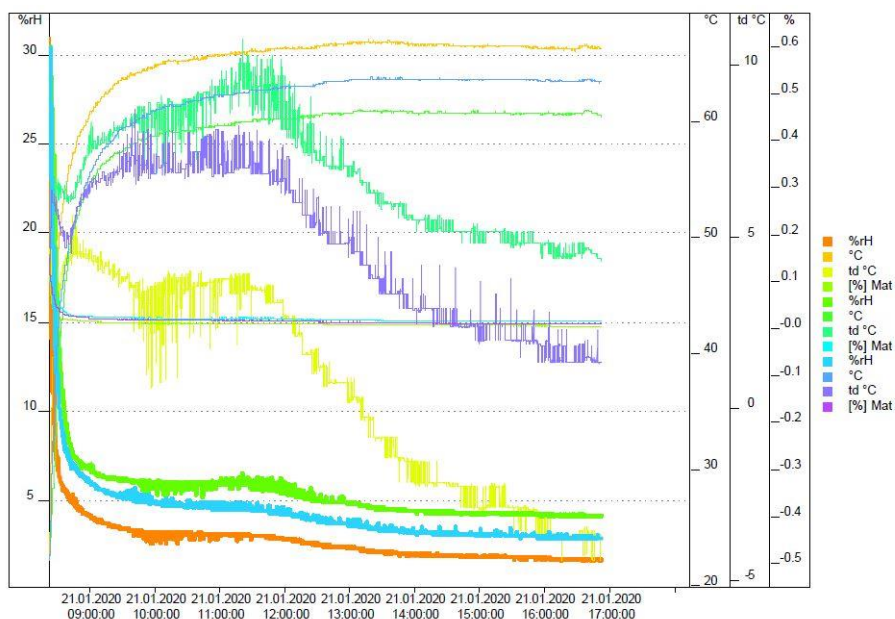
tid	sone 1	sone 2	utløp
08:22:21	22,5	22,1	22,3
08:27:21	42,5	35,5	30,1
08:32:21	50,2	43,7	40
08:37:21	54	47,3	45,9
08:42:21	56,2	50	49,3
08:47:21	57,7	51,7	51,3
08:52:21	59,2	53,4	52,7
08:57:21	60,1	54,7	54,1
09:02:21	60,9	56	54,9
09:07:21	61,6	56,8	55,7
09:12:21	62,1	57,6	56,4
09:17:21	62,6	58,1	56,7
09:22:21	63,1	58,6	57,2
09:27:21	63,5	59,2	57,2
09:32:21	63,8	59,6	57,5
09:37:21	64	59,8	57,9
09:42:21	64,1	60	58,2
09:47:21	64,3	60,3	58,5
09:52:21	64,5	60,4	58,6
09:57:21	64,5	60,8	58,7
10:02:21	64,8	61,1	58,7
10:07:21	65,1	61,3	59
10:12:21	65,3	61,3	59,1
10:17:21	65,1	61,3	59
10:22:21	65	61,3	59
10:27:21	65,1	61,5	59,2
10:32:21	65,3	61,7	59,2
10:37:21	65,6	61,8	59,3
10:42:21	65,4	61,9	59,4
10:47:21	65,5	62	59,5
10:52:21	65,6	62,1	59,6
10:57:21	65,6	62,3	59,9
11:02:21	65,6	62,2	59,7
11:07:21	65,8	62,3	59,7
11:12:21	65,8	62,3	59,9
11:17:21	65,8	62,5	60
11:22:21	66	62,6	60
11:27:21	66	62,6	60
11:32:21	66	62,7	60,2
11:37:21	66	62,7	60,2
11:42:21	66,1	62,7	60,2
11:47:21	66,2	62,7	60,2
11:52:21	66,2	62,9	60,2

11:57:21	66,2	62,9	60,2
12:02:21	66,2	63	60,2
12:07:21	66,3	63	60,2
12:12:21	66,4	63	60,2
12:17:21	66,2	63	60,4
12:22:21	66,2	63	60,3
12:27:21	66,3	63,1	60,4
12:32:21	66,4	63,2	60,5
12:37:21	66,5	63,3	60,7
12:42:21	66,8	63,4	60,7
12:47:21	66,7	63,4	60,7
12:52:21	66,7	63,4	60,5
12:57:21	66,7	63,4	60,7
13:02:21	66,9	63,7	60,7
13:07:21	66,9	63,7	60,9
13:12:21	66,9	63,7	60,9
13:17:21	66,9	63,7	60,9
13:22:21	66,9	63,7	61
13:27:21	66,9	63,8	60,8
13:32:21	66,9	63,7	60,9
13:37:21	66,9	63,7	60,9
13:42:21	66,8	63,8	60,9
13:47:21	66,9	63,9	61
13:52:21	66,7	63,7	60,9
13:57:21	66,7	63,7	60,8
14:02:21	66,7	63,7	60,7
14:07:21	66,7	63,7	60,7
14:12:21	66,7	63,7	60,8
14:17:21	66,7	63,6	60,7
14:22:21	66,7	63,7	60,8
14:27:21	66,7	63,7	60,7
14:32:21	66,5	63,7	60,7
14:37:21	66,5	63,7	60,7
14:42:21	66,5	63,7	60,7
14:47:21	66,4	63,6	60,7
14:52:21	66,5	63,6	60,7
14:57:21	66,5	63,7	60,9
15:02:21	66,4	63,5	60,7
15:07:21	66,5	63,7	60,7
15:12:21	66,6	63,7	60,7
15:17:21	66,4	63,7	60,7
15:22:21	66,6	63,7	60,8
15:27:21	66,5	63,7	60,7
15:32:21	66,5	63,7	60,6
15:37:21	66,5	63,6	60,6
15:42:21	66,5	63,7	60,7

15:47:21	66,3	63,6	60,7
15:52:21	66,3	63,7	60,7
15:57:21	66,3	63,4	60,5
16:02:21	66,2	63,6	60,7
16:07:21	66,3	63,4	60,6
16:12:21	66,3	63,4	60,6
16:17:21	66,2	63,4	60,5

16:22:21	66,2	63,4	60,7
16:27:21	66,1	63,4	60,6
16:32:21	66,5	63,5	60,7
16:37:21	66,5	63,6	60,9
16:42:21	66,4	63,5	60,8
16:47:21	66,2	63,4	60,6
16:52:21	66,2	63,4	60,4

Visualisering fra dataprogrammet: der oransj er sone 1, blå er sone 2 og grønn er ved utløpet



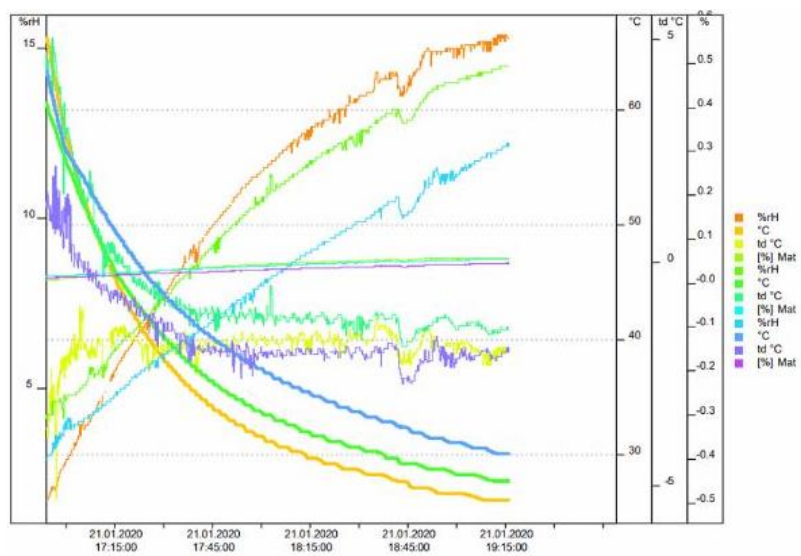
Figur 2: visualisering av oppvarming

Tabell 3: resultat fra nedkjøling av soltørkeren ved test av natriumacetattrihydrat-blanding, målinger tatt hvert 5.minutt.

tid	sone 1 (°C)	sone 2 (°C)	Utløp (°C)
16:53:44	66,2	63,4	60,5
16:58:44	59,2	57,6	56,4
17:03:44	53,8	54,7	52,7
17:08:44	49,6	52,4	49,8
17:13:44	46,1	50	46,8
17:18:44	43,2	47,9	44,2
17:23:44	40,7	46	42,5
17:28:44	38,8	44,4	40,7
17:33:44	37,1	42,8	39,2
17:38:44	35,6	41,6	37,7
17:43:44	34,4	40,4	36,5
17:48:44	33,5	39,5	35,6
17:53:44	32,6	38,4	34,8

17:58:44	31,7	37,6	33,9
18:03:44	31,1	36,7	33,2
18:08:44	30,5	36,2	32,6
18:13:44	29,9	35,5	32,1
18:18:44	29,4	34,9	31,7
18:23:44	29,1	34,2	31,2
18:28:44	28,8	33,8	30,7
18:33:44	28,3	33,3	30,3
18:38:44	28,1	32,9	29,8
18:43:44	27,7	32,4	29,3
18:48:44	27,2	32	29,2
18:53:44	26,8	31,5	28,8
18:58:44	26,7	31,1	28,5
19:03:44	26,6	30,8	28,3
19:08:44	26,1	30,6	27,9
19:13:44	26,1	30,1	27,8

Visualisering fra dataprogrammet. Der oransje er sone 1, blå er sone 2 og grønn er ved utløpet.



Figur 3: visualisering av nedkjølingen



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway