



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2019 30 stp

Fakultetet for realfag og teknologi - RealTek

Forbedring av tørkeprosessen til kakaobønner fra Sørvest-Kamerun ved bruk av solenergi

Improving the drying process for cocoa beans from
Southwest-Cameroon using solar energy

Emilia Eriksson Bjånes

Miljøfysikk og Fornybar Energi

Forord:

Denne oppgaven avslutter det femårige sivilingeniørstudiet Miljøfysikk og Fornybar Energi ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet (NMBU). Masteroppgaven tilsvarer 30 studiepoeng.

Studenttilværelsen har vært lærerik både faglig og sosialt. Jeg vil takke alle som har bidratt til en bra studietid og alle fine minnene jeg tar med videre i livet.

I anledning masteroppgaven vil jeg takke:

Espen Olsen for å ha introdusert meg til oppgaven, og viktig veiledning og oppfølging underveis.

Trude Wicklund og Andras Svarstad Flø for diskusjon og gjennomgang.

Maylinn Cecilie Dramstad for oppmuntring i perioden.

En spesiell stor takk til Thomas Haga Hamarsland for støtte og korrekturlesing.

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet

Desember 2019

Emilia Eriksson Bjånes

Sammendrag:

Oppgaven tar for seg tørking av kakaobønner i Sørvest-Kamerun hvor firmaet SunErgy har bygd off-grid solcelleanlegg til landsbyer. Kakaobønnene blir i dette området i dag tørket ved vedfyring noe som fører til et svinn på 20%. SunErgy har som visjon å hjelpe mennesker ut av fattigdom og ser at en forbedret tørkeprosess av kakaobønnen og dermed økt kvalitet kan gi større økonomisk gevinst for beboerne i landsbyene. Denne oppgaven undersøker hvordan tørkeprosessen i landsbyer i Sørvest-Kamerun kan forbedres ved bruk av solenergi. Det er mulig å bruke energi fra solcelleanlegget til å drive en forbedret tørkeprosess.

Tørkede kakaobønner av god kvalitet er ikke tørket så hurtig at overflaten tørker ut før fuktighet fra den indre delen er transportert ut til overflaten. Hurtig tørkeprosess vil oppstå ved tørketemperatur over 60 °C og høy hastighet på luftstrøm.

Oppgaven ser på tørking av kakaobønner fra et fuktighetsnivå på 50 til 7 %. Et fuktighetsnivå på 7% vil gi en vannaktivitet som hemmer uønsket aktivitet fra bakterier, gjærevekst, soppvekst og mikrobiologi. Dette er fordelaktig ved lagring.

Oppgaven gjør beregninger for tre ulike eksempler på tørkemetoder:

- Drivhustørking med naturlig- og kunstig ventilering. Samt kunstig ventilering og vifteovn med luftstrøm på 40°C. Det beregnes med drivhusdekke av hagebrukerglass, hardplast og plastfilm. I denne metoden brukes direkte solinnstråling som energikilde.
- Varmepumpe og drivhuskammer hvor det beregnes på luftstrøm fra varmpumpen på 1-3 m/s og en temperatur på 40 og 50 °C.
- Enkel trommeltørker hvor overflatetemperaturen er på 40, 50 og 60 °C.

Klimaet i Sørvest-Kamerun gjør at tørking av kakaobønner bør gjøres med en metode som øker temperaturen og reduserer den relative luftfuktigheten. Dette gjøres enklest i en avlukket tørkeprosess. En avlukket tørkeprosess vil i tillegg hindre forurensing. Drivhustørking er væravhengig og klimaet i Sørvest-Kamerun er ikke fordelaktig for denne metoden.

Tørketemperaturen ved drivhustørking kan økes hvis det settes inn apparater med kunstig varmeoverføring.

Tørkemetoden som består av systemet varmpumpe og tørkekammer er ikke væravhengig, og både tørketemperatur og hastighet på luftstrømmen kan kontrolleres. Ut ifra resultatene i oppgaven anbefales det å se videre på denne typen tørkemetode for tørking av kakaobønner fra Sørvest-Kamerun.

Abstract

This thesis examines drying of cocoa beans in Southwest-Cameroon where SunErgy has built off-grid solar power plants for communities. The cocoa beans in this area are dried by wood burning where 20% goes to waste. SunErgy's vision is to give people an opportunity to escape poverty and see that an improved drying process of cocoa bean can provide greater financial gain for the farmers. This paper examines how the drying process in communities in Southwest-Cameroon can be improved by using solar energy. It is possible to use energy from the solar power plant in an improved drying process.

Good quality dried cocoa beans are not dried so quickly that the surface dries out before moisture from the inner core is transported to the surface. Rapid drying process will occur at drying temperature above 60 ° C and air flow at high velocity.

The thesis looks at cocoa beans dried from a humidity level of 50 to 7%. A humidity level of 7% will provide a water activity that inhibits unwanted activity from bacteria, yeast growth, fungal growth and microbiology which is good for storage.

The thesis makes calculations for three different examples of drying methods:

- Greenhouse drying with natural and artificial ventilation. As well as artificial ventilation with a fan oven with air flow of 40 ° C. The greenhouse is covered with glass, hard plastic or plastic film. In this method direct solar radiation is used as an energy source.
- Heat pump and drying chamber where the calculation is base don an air flow from the heat pump of 1-3 m/s and a temperature of 40 and 50 °C.
- Singel-drum dryer where the surface temperature is 40, 50 and 60 ° C.

Because of the climate in Southwest-Cameroon the drying of cocoa beans should be done with a method that increases the temperature and reduces the relative humidity. This is easiest done in a closed drying process which also prevent contamination. Greenhouse drying is weather dependent and the climate in Southwest-Cameroon is not favourable for this method.

The drying method with heat pump and drying chamber is not weather dependent, and both drying temperature and air flow velocity can be controlled. Based on the results of the thesis it is recommended to look at this type of drying method for drying cocoa beans from Southwest-Cameroon.

Innholdsfortegnelse

Forord:	2
Sammendrag:	4
Abstract	6
1. Nomenklatur:	10
2. Introduksjon:	12
3. Teori:	14
3.1. Sørvestlige deler av Kamerun:	14
3.2. Klima i Kamerun:	14
3.3. Tørrking av kakaobønner:	17
3.4. Tørkemetoder:	24
3.5. Varmluftstørrking:	26
3.6. Drivhustørrking:	28
3.6.1. Tørrking gjennom varme overflater:	32
3.7. Tidligere forskning på tørkemetoder for kakaobønner	33
4. Metode:	36
4.1. Varmepumpe:	37
4.2. Drivhustørrking:	38
4.3. Enkel trommeltørrking:	40
5. Resultat:	42
5.1. Varmepumpe:	43
5.2. Drivhustørrking:	43
5.2.1. Naturlig ventilering	43
5.2.2. Kunstig ventilering	47
5.3. Trommeltørrking:	50
6. Diskusjon:	52
6.1. Tørkekvalitet:	52
6.2. Tørkemetoder:	53
6.2.1. Varmepumpe:	54
6.2.2. Drivhustørrking:	55
6.2.3. Enkel trommeltørker:	56
6.3. Tørketid:	57
6.4. Andre feilkilder:	57
6.5. Anbefalinger videre:	58
7. Konklusjon:	60
8. Litteraturliste:	62

1. Nomenklatur:

A_d	Arealet til drivhusdekket [m^2]
A_g	Arealet til drivhusgulvet [m^2]
A_k	Arealet til kakaobønnene [m^2]
A_T	Areal til trommel [m^2]
a_w	Vannaktivitet
C_{pa}	Spesifikke varmekapasiteten til luft [$J/kg\ K$]
C_{pd}	Spesifikk varmekapasitet til dekket [$J/kg\ K$]
C_{pk}	Spesifikk varmekapasitet til kakaobønnene [$J/kg\ K$]
F_k	Solinnstråling på kakaobønnene [W/m^2]
G	Ventilasjonsrate [m^3/s]
h	Varmeoverførings koeffisient [$W/m^2\ K$]
h_c	Konvektiv varmetransportkoeffisient til kakaobønnene [$W/m^2\ K$]
h_{gr}	Varmetransport koeffisient mellom drivhusgulvet og drivhusrommet [$W/m^2\ K$]
I_{effG}	Solintensitet på drivhusgulvet [W/m^2]
I_{effR}	Solintensitet på drivhusrommet [W/m^2]
I_i	Solintensitet på drivhusdekket [W/m^2]
K	Konduktiv varmeoverføringskoeffisient [$W/m^2\ K$]
L_v	Latent varme [J/kg]
M	Fuktighetsinnhold [$kg/[\%]$]
m_a	Massen til luft [kg]
m_v	Massen til vann [kg]
N	Antall luftendringer per time
η_t	Effektiviteten til tørkeprosessen
$P(T)$	Partial damptrykk ved temperatur T [N/m^2]
Q	Varmeoverføringsrate [J/s]
Q_t	Energi som kreves i tørkeprosessen [J]
R	Solinnstrålingen utenfor drivhuset [W/m^2]
R	Koeffisient for lineær regresjon av partialtrykket (i likning 26)
R^{net}	Netinnstråling [W/m^2]
t	Tid [s]
$T_{ y=0}$	Temperatur til drivhusgulvoverflaten [$^{\circ}C$]/[K]
T_a	Temperaturen til omgivelsene [$^{\circ}C$]/[K]
T_d	Temperaturen til dekket [$^{\circ}C$]/[K]
T_{el}	Temperatur fra elektrisk vifteovn [$^{\circ}C$]/[K]
T_k	Temperatur til kakaobønnene [$^{\circ}C$]/[K]
T_r	Temperaturen i drivhusrommet [$^{\circ}C$]/[K]
TR	Tørkerate [kg/s]
U_i	Varmetap gjennom drivhusdekket [$W/m^2\ K$]
v	Vindhastighet [m/s]

V	Volum til drivhus [m^3]
x	Tykkelse på kakaobønnelag [m]
X_{vk}	Masserelasjonen til vann
Y_a	Mengden fuktighet i omgivelsene [%]
Y_i	Mengden fuktighet i tørkerommet ved start [%]
α_g	Absorpsjon til drivhusgulvet
γ_r	Relativ luftfuktighet [%]
ε	Forholdet mellom latentvarmefluks og nettinnstråling
ρ_a	Tettheten til luft [kg/m^3]
ρ_d	Tettheten til dekket [kg/m^3]
ρ_k	Tettheten til kakaobønnene [kg/m^3]
τ	Transmisjonen til drivhusdekket

2. Introduksjon:

Kakaobønner er en viktig bestanddel i sjokolade, et produkt som er svært populært i store deler av verden. I 2017 ble det kjøpt 13-14 kg sjokolade per person i Norge. Kakaoplanten stammer fra Amerika, men ble på 1600-tallet tatt med til Afrika. I dag er det afrikanske land som står for største delen av produksjon. Vest-Afrika bidrar til 70 % av all kakaoproduksjon i verden, og Kamerun produserte i 2014 ca. 270 000 tonn kakaobønner [3-5].

Kakaobønner er frø fra frukten som vokser på kakaotreet, *Theobroma cacao*, og produseres hovedsakelig rundt ekvator og i tropene. Etter høsting av frukten blir kakaobønnene fjernet fra fruktmassene og pakket inn for anaerob fermentering. Deretter tørkes kakaobønnene ned fra et fuktighetsnivå på 50-80% til et nivå på 7-8%. Tørkeprosessen påvirker fargen og smaken til kakaobønnene, og bidrar til lengre holdbarhet. Oppgaven tar for seg denne tørkeprosessen av kakaobønner [3, 6, 7].

Kjøpere av kakaobønner betaler bøndene blant annet etter kvaliteten på kakaobønnene de leverer. I sørvestlige landsbyer i Kamerun i dag tørkes kakaobønnene ved bruk av vedfyring under tørkeplattform. Dette er en tørkemethode som kan føre til ugunstig røyksmak på kakaobønnene, og at 20 % av kakaobønnene regnes som svinn.

Firmaet SunErgy har i dag bygd flere små off-grid solcelle anlegg til landsbyer i Kamerun for å forsyne dem med elektrisitet, og har en visjon om å hjelpe mennesker ut av fattigdom. Denne oppgaven ser på hvordan solenergi og overskuddsenergi fra anleggene i landsbyene kan utnyttes for å forbedre tørkeprosessen til kakaobønnene og dermed øke kvaliteten. En ny og bedre tørkemethode vil forhåpentligvis bidra til større økonomisk gevinst for kakaobønbøndene [8].

For å besvare denne problemstillingen ser oppgaven på hva som er god kvalitet på tørkede kakaobønner, ulike typer tørkemetoder for kakaobønner og hvilke forskningsresultater som eksisterer innenfor de ulike metodene. På bakgrunn av det teoretiske grunnlaget og klimaet i Sørvest-Kamerun går oppgaven inn på tre ulike tørkemetoder og beregner en tenkt tørkeprosess. De tre tørkemethodene det går inn på er drivhustørking, varmlufts tørking med varmpumpe og overflatetørking med trommel.

3. Teori:

De tre eksemplene på tørkemetoder for kakaobønner som det beregnes på i oppgaven tar utgangspunkt i data fra Sørvest-Kamerun og tidligere utført forskning. Oppgaven ser på tørkemethodene ut ifra gjennomsnittsklimaet i løpet av et år.

3.1. Sørvestlige deler av Kamerun:

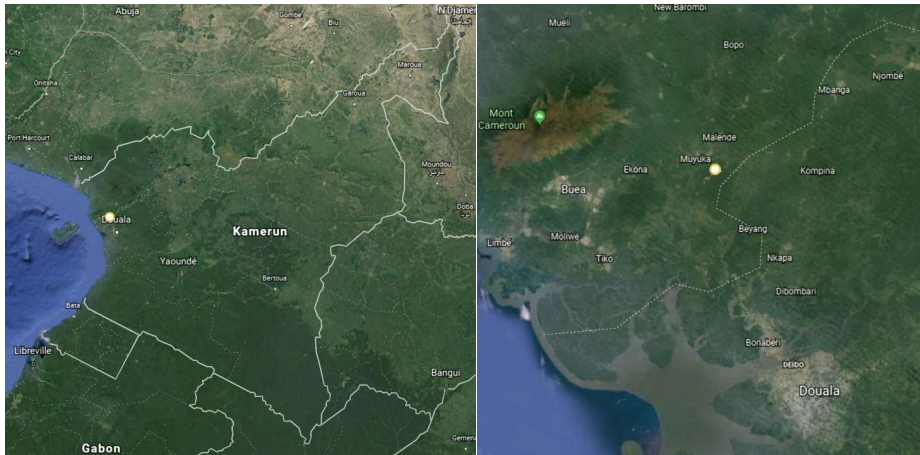
20. august 2019 åpnet SunErgy off-grid solcellesystem i den femte landsbyen i Kamerun, Matouke. Anlegget i denne landsbyen har solcellepanel med kapasitet til å produsere 650 kWh per dag. Batteriene tilkoblet systemet kan vare i 16 timer [8].

I Sørvest-Kamerun tørker bøndene kakaobønnene med vedfyring fordi det er slik det tradisjonelt alltid er blitt gjort ettersom ved er lett tilgjengelig brensel. Denne tørkemethoden er illustrert i figur 8. Kakaobøndene i området mangler kunnskap om alternative tørkemethoder. 500 kg kakaobønner tørkes av gangen på en tørkeplattform over en vedovn. Kakaobønner tørkes i Sørvestlige deler av Kamerun omtrent hele året (april til februar), dette er fordi kakaobøndene i området har en økende variasjon av kakaobønnetyper. Bøndene oppgir at de bruker lengre tid på å tørke kakaobønner mellom mars og august enn mellom oktober og februar.

Kakaobønnene blir etter tørking solgt og kvaliteten er med på å bestemme pris. For kjøpere i Sørvest-Kamerun er faktorene som påvirker kvaliteten til de tørkede kakaobønnene: fuktighet, skadedyr og sykdomsangrep, modningen av kakaofrukten, antall dager med fermentering, verktøy som anvendes for å åpne kakaofrukten, tørkeprosess, bruk av plantevernmiddel, kvaliteten på kakaoplanten og håndtering av skadedyr og sykdommer.

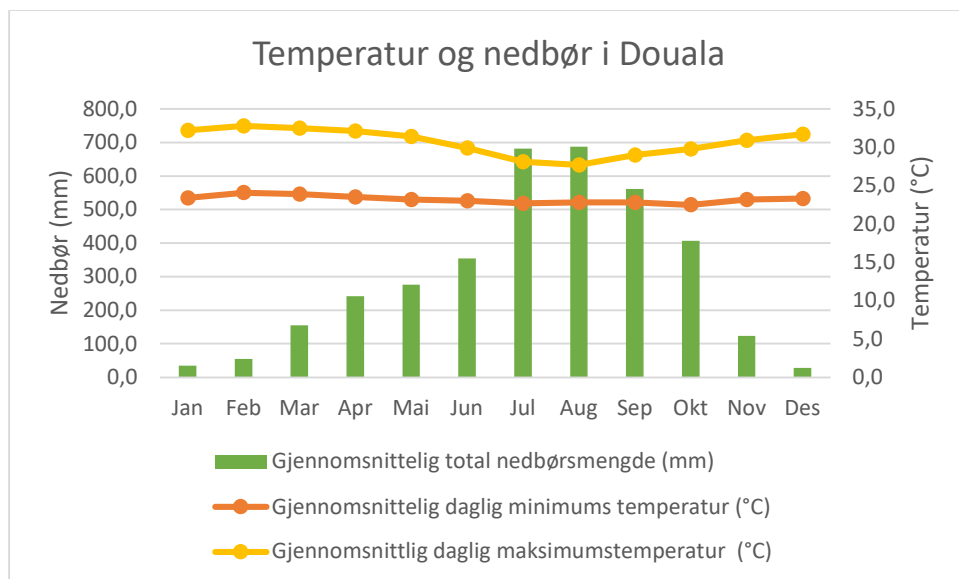
3.2. Klima i Kamerun:

Oppgaven tar utgangspunkt i klimaet i landsbyen Matouke i Kamerun, hvor SunErgy har off-grid solcellesystem. Matouke ligger i Sørvest-Kamerun, ca. 4 km sørøst for Muyuka, ca. 26 km sørvest for Mbanga og ca. 43 km nord for Douala. Klimadata som er gitt i oppgavene er de tilgjengelige klimadataen nærmest Matouke [9].



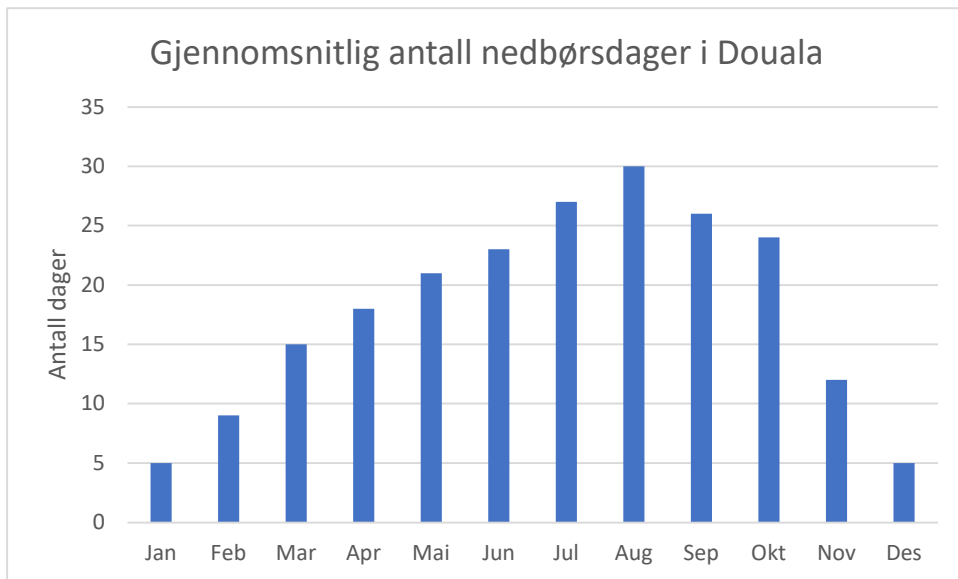
Figur 1: Plassering av landsbyen Matouke i Kamerun hentet fra Google Maps [9].

Gjennomsnittlig minimumstemperatur (GDT(min)) i Douala ligger mellom 22.4°C i oktober og 24.1 °C i februar. Gjennomsnittlig maksimumstemperatur (GDT(maks)) ligger mellom 27.7 °C i august og 32.8 °C i februar. Månedlig temperaturoversikt er presentert i figur 2 [10].

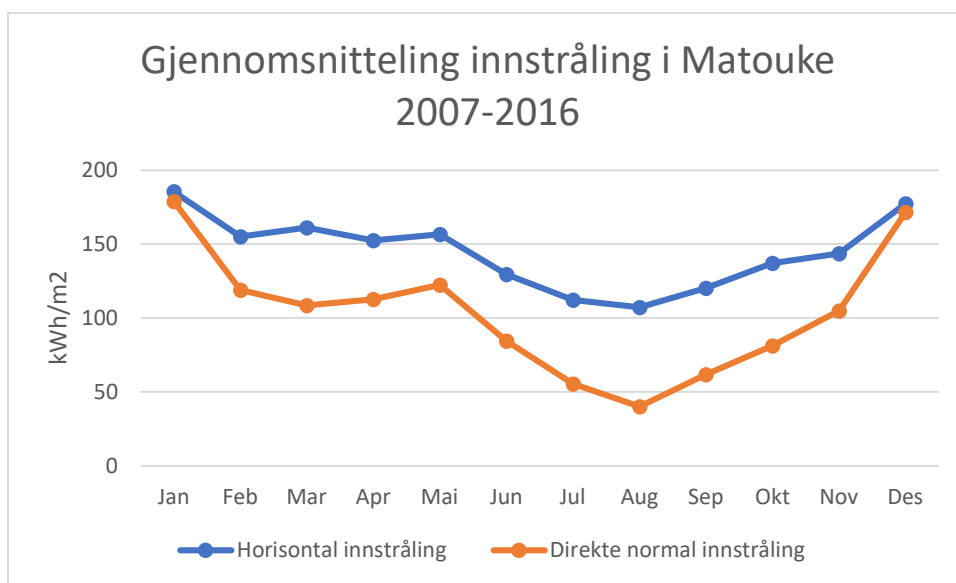


Figur 2: Gjennomsnittlig daglig maksimum- og minimumstemperatur i Douala, samt gjennomsnittlig total nedbørsmengde. Data er hentet fra en 30års periode (1961-1990). Figuren er konstruert ut ifra data hentet fra World Meteorological Organization [10].

Mellom juni og oktober faller det mest nedbør i Douala, mellom 354.1 mm og 687.5 mm gjennomsnittlig per måned, se figur 3. Det regner da i gjennomsnitt mellom 23 og 30 dager i måneden. Dette antas å være regntiden i området i denne perioden. Ellers i året, fra og med november til og med mai, regner det i gjennomsnitt mellom 5 og 21 dager i måneden [10].

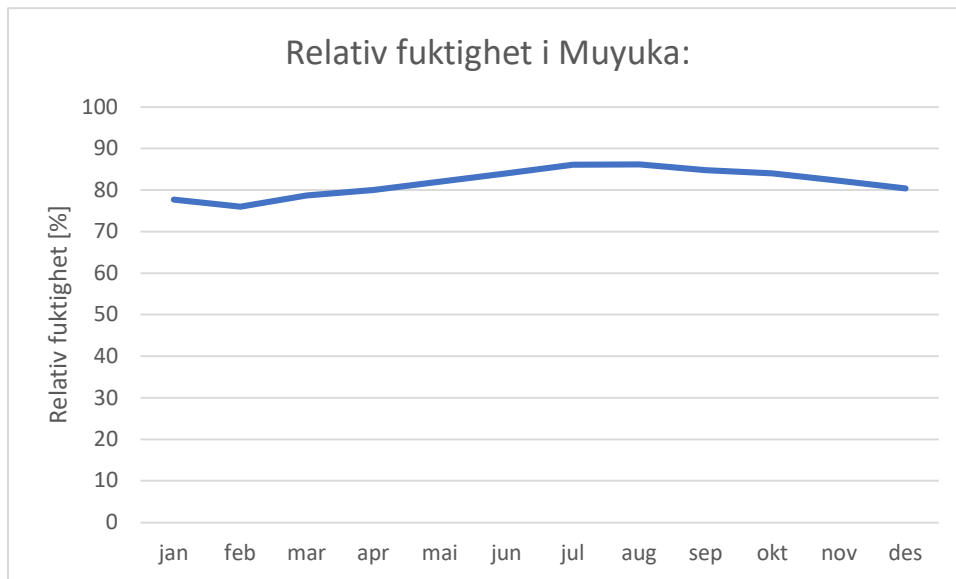


Figur 3: Antall nedbørsdager i gjennomsnitt per måned i Douala. Figuren er konstruert ut ifra data hentet fra World Meteorological Organization. Data er hentet fra en periode over 30 år (1961-1990) [10].



Figur 4: Gjennomsnittlig global horisontal og direkte normal solinnstråling i Matouke mellom 2007 og 2016. Innstrålingen er beregnet ut ifra en kalkulert horisont. Figuren er konstruert ut i fra data hentet fra Photovoltaic Geographical Information System [11].

Figur 4 viser den gjennomsnittlige solinnstrålingen beregnet for Matouke mellom 2007 og 2016. I global horisontal solinnstråling inngår både direkte- og diffus solinnstråling. Den høyeste innstrålingen er mellom november og mai, hvor horisontale innstråling ligger i gjennomsnitt mellom 144 og 186 kWh/m². I Matouke er det solinnstråling mellom kl. 04:00 og 17:00 hver dag hele året. Dette gir 13 soltimer per dag [11].



Figur 5: Viser den relative luftfuktigheten i Muyuka i Kamerun [12].

Muyuka har en relativ luftfuktigheten på rundt 80% hele året som vist i figur 5 [12] og vindhastigheten er i gjennomsnittlig 1 m/s [13].

3.3. Tørking av kakaobønner:

Tørking eller dehydrering er fjerning av vann fra et produkt gjennom fordamping.

Kakaobønnene tørkes for å forlenge holdbarheten ved at det hemmer mikrobiologisk vekst og enzymaktivitet ved lagring [14]. Under tørkeprosessen skal det i tillegg til å fjernes vann fullføres kjemiske prosesser som er satt i gang under fermenteringen og dannes ønsket smak og farge. Kakaobønnene tørkes ned til 7-8% fuktighet fordi dette gir god holdbarhet, lite mugg og god sensorisk kvalitet [15]. Tørking til lavere nivåer (6%) gir skjørere kakaobønne som lettere ødelegges og sorteres ut [16]. [16-18]. Bøndene vil i tillegg få mindre betalt for produktet på grunn av mindre vekt [7].

Holdbarheten påvirkes av hvor tilgjengelig vann er i kakaobønnene for mikrobiologisk, enzyms- og kjemisk aktivitet. Denne tilgjengeligheten til vann måles i vannaktivitet eller som det relative vandamptrykket. Vannaktiviteten a_w er gitt ved [14]:

$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad (1)$$

hvor P [Pa] er damptrykket i kakaobønnen og P_0 [Pa] er damptrykket til vann ved samme temperatur. Vannet i kakaobønnen har et damptrykk som er avhengig av vannmengden som er til stede, temperaturen i kakaobønnen og konsentrasjonen av oppløste løsemidler (f.eks. sukker og salt).

Sammenhengen mellom vannaktiviteten og fuktighetsinnholdet er gitt ved [14]:

$$\frac{a_w}{M(1-a_w)} = \frac{1}{M_1 C} + \frac{C-1}{M_1 C} a_w \quad (2)$$

hvor M er fuktighetsinnholdet (tørr basis), M_1 er fuktighetsinnholdet (tørr basis) ved monomolekylært lag og C er en konstant.

Vannaktiviteten til kakaobønner er estimert fra eksperimenter til å kunne uttrykkes [19]:

$$a_w = 1 - e^{-100.16784 X_{vk}^{1.93938}} \quad (3)$$

hvor X_{vk} [kg/kg] er masserelasjonen for vann i kakaobønnene.

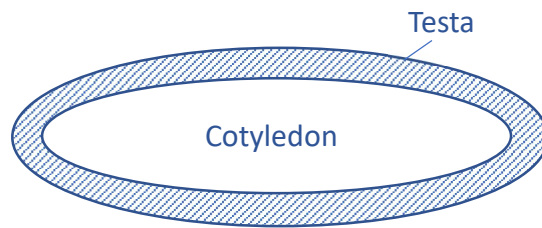
Tabell 1: Viser ved hvilke vannaktiviteter ulike aktiviteter i produktet blir hemmet [14].

Vannaktivitet a_w	
< 0.9	Nesten alle bakterier er hemmet
< 0.8	Nesten all gjærvekst er hemmet
< 0.7	Nesten all soppvekst er hemmet
< 0.6	Nesten all mikrobiologiskaktivitet er hemmet

Tilgjengeligheten av vann i kakaobønnene vil som nevnt over påvirke aktiviteten i kakaobønnene. Tabell 1 angir hvordan ulike nivåer av vannaktivitet påvirker ulike aktiviteter i produkter som tørkes. Hemming av slike aktiviteter bidrar til lengre holdbarhet. Faktorer som pH-verdi, oksygeninnhold, karbondioksidinnhold og kjemiske konserveringsmidler er i tillegg til vannaktiviteten med på å påvirke for holdbarheten [14].

Fuktighetsnivået hvor et produkt er mest stabilt kalles BET (Brunauer-Emmett-Teller) enkellagsverdi. Nivåer over denne verdien gir Maillard bruning og større enzym- og mikrobiologisk aktivitet og nivåer under gir mer lipid oksidering. BET enkellagsverdi for kakaobønner er estimert til å ligge på omtrent 7%. Verdien vil avhenge av temperatur og vannaktivitet [14, 20].

Kakaobønnen består etter fermentering (som vist i figur 6) av to lag: et ytterlag, testa, og en indre kjerne, cotyledon. Testa-skallet virker beskyttende mot insekter og dyr under lagring. Før tørking har testa laget et høyt fuktighetsinnhold på grunn av rester etter degenerasjon av fruktmasse som er på overflaten [2].



Figur 6: Viser lagdelingen av kakaobønnen etter fermentering fritt gjengitt fra figur fra Hii, C.L. et al. (2012) [2].

Vanndampens bevegelse fra kakaobønnen til luften i omgivelsene er avhengig av kakaobønnenes fuktighetsinnhold og sammensetning, i tillegg til temperatur og fuktighetsinnhold i omgivelsesluften. Ved konstant temperatur i kakaobønnen og omgivelsesluften vil fuktighetsnivået i kakaobønnen endre seg til den er i likevekt med fuktighetsinnholdet til omgivessluften. Fuktighetsnivåets utvikling mot likevekt kan grovt fordeles inn i tre faser. Først vil lett tilgjengelig vann i kakaobønnens kapillærstruktur og celler fjernes (det er dette vannet som er tilgjengelig for mikrobiologisk vekst og enzymaktivitet). Deretter vann i flere lag av kakaobønnen og løsninger med løselige komponenter. Til slutt vil vann i enkeltlag fjernes, dette er veldig stabilt og kan ikke tørkes eller fryses [14].

Hvordan spredningsevnen til vann $D_{w\beta}$ [m²/s] og syre $D_{a\beta}$ [m²/s] er i kakaobønnen kan beregnes ved:

$$D_{w\beta} = e^{\frac{(-10.24-41.024)}{T_r}} e^{(-53.64+0.31813 T-0.000438 T_r^2) X_{vk}} \quad (4)$$

$$D_{a\beta} = D_{w\beta} (e^{-2.5 X_{vk}}) \quad (5)$$

hvor X_{vk} [kg/kg] er masserelasjonen for vann i kakaobønnene og T_r [K] er tørketemperaturen.

Omgivelsesluftens kapasitet til å fjerne fuktighet fra kakaobønnene påvirkes av mengden vanndamp i luften, temperaturen til luften og luftstrømmen over kakaobønnene. Mengden vanndamp i luften uttrykkes som absolutt- (AH) eller relativfuktighet (RH) [14].

Relativ fuktighet er vanninnholdet i luften i forhold til den maksimale mengden som er mulig (metning) ved en bestemt temperatur og oppgis vanligvis i prosent. Ved temperaturendring vil relativ fuktighet endres. Dersom den relative fuktigheten er 80% ved 25°C og temperaturen øker til 30°C vil den relative fuktigheten synke til 60%. Vanndampinnholdet vil derimot være konstant på 19g/m³ tørrluft [21].

Relativ fuktighet RH kan beregnes ved [21]:

$$RH = \frac{v}{v_{sat}} = \frac{P_v}{P_g} \quad (6)$$

hvor v er vanndampinnholdet [g/m³], v_{sat} er metningsinnholdet [g/m³], P_v er partialtrykket til vanndampen [Pa] og P_g er metningstrykket til vanndampen [Pa]. Alle verdiene gis ved samme temperatur.

Absolutt fuktighet beregnes ved [14]:

$$W = \frac{m_w}{m_a} \quad (7)$$

hvor m_w er massen til vannet i luften og m_a er massen til tørrluft.

Økt temperatur eller redusert relativ fuktighet fører til hurtigere fordamping av vann fra kakaobønnene og dermed hurtigere tørking.

Luftstrømmen påvirker luftens evne til å ta opp fuktighet fra kakaobønnene. Når luft strømmer over kakaobønnene diffunderer fuktighet fra kakaobønnenes overflate gjennom en grensebarriere og blir tatt med av luftstrømmen. Denne grensebarrieren består av et luftlag og er en barriere for varmetransport og fukt fjerning. Tykkelsen til denne grensebarrieren påvirkes av hastigheten til luftstrømmen som strømmer rundt kakaobønnen. En lavere lufthastighet vil gi en tykkere grensebarriere. «Drivkraften» for fjerning av vann fra den indre delen av kakaobønnen og ut til omgivelsesluften kan gis som vanndampens trykkgradient. Når vann fordampes fra kakaobønnens overflate vil fuktigheten i luften i grensebarrieren øke. Dette vil minske vanndampens trykkgradient og tørkehastigheten. For å oppsummere vil en høy hastighet på luftstrømmen gi en tynnere grensebarriere og større trykkgradient. Dette vil føre til hurtigere fjerning av fukt fra kakaobønnene og dermed økt tørkehastighet [14].

Hvor lang tid en tørkeprosess tar gis ved [14]:

$$t = \frac{\text{massen til vannet som skal fjernes}}{\text{tørkeraten til prosessen}} \quad (8)$$

hvor tørkeraten ved tørking på brett og hvor fordamping er begrenset til overflaten til produktet er gitt ved [14]:

$$TR = \frac{h_c}{\rho_k \lambda x} (T_r - T_a) \quad (9)$$

og tørkeraten til en tørkeprosess ved konduksjon er gitt ved [14]:

$$TR = \frac{Q}{L_v} \quad (10)$$

hvor Q [J/s] er varmeoverføringsraten og L_v [J/kg] er den latente varmen ved fordampning av vann.

Tørkeprosessen kan hovedsakelig deles inn i to hovedperioder som påvirker tørketiden. Først i tørkeprosessen vil det være en periode med konstant tørkehastighet og deretter en periode med fallende tørkehastighet. Perioden med fallende tørkehastighet oppstår mellom kritisk fuktighetsnivå og likevekt. Vannet som beveger seg fra den indre delen av tørkeproduktet til overflaten vil her gå saktere enn fordampningen av vann fra overflaten til omgivelsesluften. Denne kan føre til uttørring av produktets overflate. Overflatetemperaturen til produktet vil øke til det er i likevekt med omgivelsestemperaturen, og det er dermed i denne siste perioden at tørkeproduktet er mest utsatt for varmeskade. For å minske mengden varmeskade som blir påført er det viktig å kontrollere omgivelsestemperaturen slik at den er i balanse med hastigheten til fukttransporten fra den indre delen av tørkeproduktet til overflaten [14].

Når væskemengden i et produkt reduseres ved tørking vil vevsmateriellet minske i volum. Ved optimal tørking vil dette føre til at cellene i produktet faller sammen. Ved hurtig tørking kan produktets overflate tørke ut. Videre tørking og minskning av volum i indre del kan potensielt føre til en porøs struktur med rifter og lufthull. Dette er en varmeskade som medfører et skjørt produkt som lett rehydreres [22].

Væske fra den indre delen av tørkeproduktet kan bevege seg til overflaten på ulike måter. Spesielt i porøse produkter vil væske transporteres av kapillære krefter. Væske kan diffunderes som årsak av forskjell i konsentrasjonen av ulike løsninger inni produktet og ved overflaten. Luftrom inni tørkeproduktet kan inneholde vanndamp som diffunderes ut på grunn av damptrykk gradienten. Væske som er absorbert av faste komponenter i overflatelaget på produktet vil også diffunderes [14].

I perioden med fallende tørkehastighet vil ikke tørkeprosessen påvirkes av luftstrømmen og mengden vanndamp i luften. Her vil omgivelsestemperaturen og størrelsen på produktet være viktigst. Størrelsen til produktet påvirker ved at et lite produkt gir kortere distanse for bevegelse av varme og fuktighet gjennom produktet [14].

Hvor lang tid det tar å tørke et produkt vil i tillegg til de faktorene som er nevnt over påvirkes av innholdet av ulike løsninger som for eksempel sukker, salt og stivelse. Høye

konsentrasjoner av slike løsninger vil øke viskositeten og redusere hastigheten til bevegelsen av fuktighet gjennom produktet. Hvor mye produkt som er i tørkeren i forhold til kapasiteten til tørkeren vil påvirke ved at en mindre mengde produkt gir økt tørkehastighet [14].

Tørking har en effekt på produktet og mikroorganismene. Blant sensoriske egenskaper forekommer de største forandringene på tekstur og smak/aroma. Teksturen blir mer viskøs ved tørking og rask tørking ved høye temperaturer fører til større teksturforandringer. Lipid oksidasjon ved lagring av produktet etter tørking fører til utvikling av uønsket smak, harskning og tap av fettløselige vitaminer og pigmenter. Faktorer som påvirker denne oksideringen er [14]:

- fuktinnhold i produktet
- hvilke typer fettsyrer produktet inneholder
- hvor porøst produktet er og dermed hvilken oksygenmengde det har
- hvilken temperatur produktet lagres ved
- om produktet eksponeres for ultrafiolett lys
- hvor mye antioksidanter det er tilstede
- lipase aktiviteten

Tørking av produkter fører i tillegg til tap av flyktige komponenter i produktet. Dette tapet fører til at produktet får mindre smak enn originalt. Hvor stort tapet av flyktige komponenter er påvirkes av tørketemperaturen, fuktighetsinnholdet i produktet og damptrykket til de flyktige komponentene. Flyktige komponenter med et høyt damptrykk og diffusivitet går tapt tidlig i tørkeprosessen. Hvis disse komponentene er viktig for produktets smak bør produktet tørkes ved lav temperatur [14].

Ved tørking vil produktets overflate endres. Dette fører til at refleksjon fra produktet og at fargen endres. Kjemiske forandringer under tørkeprosessen, pigmenttap og varmen som tilføres er i tillegg med på denne fargeendringen. Enzymreaksjon av phenolases kan gi bruning ved eksponering av produktet til luft. Denne bruningsreaksjonen kalles Maillard bruning og øker ved høy temperatur og lang tørketid [14].

Det kommer frem fra forskning at kakaobønner med god kvalitet har en pH-verdi på rundt 5.5 [23], en brun (evt. brunlilla) farge og lavt polyfenolinnhold. Polyfenolet i kakaobønnene er oksidert for å redusere den bitre og snerpende smaken, samt gi den karakteristiske brunfargen [24, 25]. Under tørking blir kvaliteten påvirket av temperatur, luftstrøm, dybde med kakaobønner og luftfuktigheten [26, 27].

Rehydrering er betegnelsen på prosessen hvor et tørket produkt tar til seg vann igjen. Vannet som fjernes ved dehydrering/tørking kan erstattes på samme måte ved rehydrering. Men rehydrering er ikke det motsatte av dehydrering på grunn av ulike forandringer i cellene og strukturen til produktet under dehydrering. Ved tørking påføres produktet en irreversibel teksturforandring og produkter som er rehydrert vil ikke ha samme smak eller farge som det råe produktet hadde før dehydrering. Rehydrering er en kombinasjon av tre prosesser som foregår samtidig. Disse prosessene er opptak av vann i det tørkede produktet, hevelse og at løselige materialer «lekker» ut. Omfanget av rehydrering er avhengig av mengden skader på cellestrukturen og kjemiske forandringer forårsaket av tørking. Produkter som er tørket under optimale forhold rehydrerer raskere [14].

I tillegg til kvalitet er faktorer som pålitelighet, sikkerhet, kapital, vedlikehold, energiforbruk og forurensing med på å påvirke valget av tørkemetode. Det er i tillegg viktig å kunne kontrollere forholdene i tørkeren for å få en mest mulig uniform tørking og fuktighetsinnhold. Faktorer som kontrolleres er lufttemperatur, hastigheten til luftstrømmen, tørkemengde og tørketid. Det er i tillegg vanlig å ha kontroll på energibruk [14].

I en tørkeprosess er mengden vann som skal tørkes avgjørende for hvor lang tid prosessen tar og hvor mye energi denne krever. Mengden vann som fjernes fra kakaobønnene, M_v [kg], beregnes ved [28]:

$$M_v = \frac{M_i - M_f}{100} \times M_t \quad (11)$$

hvor M_t er mengden tørt materiale [kg], M_i er det opprinnelige fuktighetsinnholdet etter fermentering [%] og M_f er fuktighetsinnholdet etter tørking [%].

Hvor mye energi som kreves under tørkeprosessen, Q_t [J], for å tørke kakaobønnene til ønsket fuktighetsnivå beregnes ved:

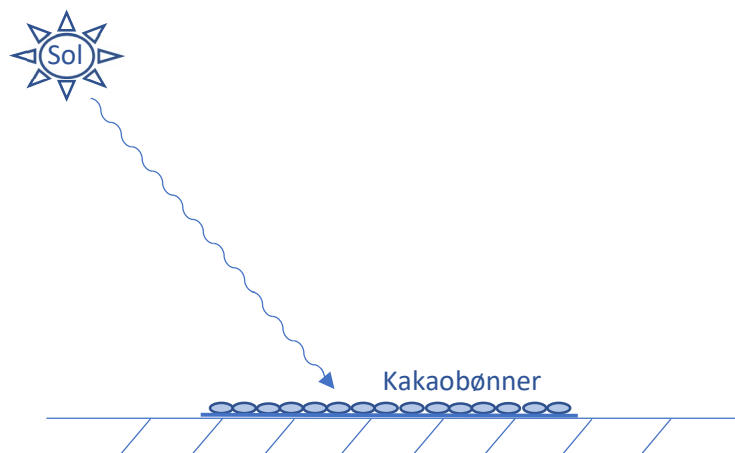
$$Q_t = M_t C_k (T_2 - T_1) + M_i C_v (T_2 - T_1) + M_v \lambda \quad (12)$$

hvor M_t , M_i og M_v er som oppgitt ved likning 11. C_k er den spesifikke varmekapasiteten til kakaobønner [J/kg K], C_v er den spesifikke varmekapasiteten til vann [kJ/kg K], T_1 er omgivelsestemperaturen [°C], T_2 er lufttemperaturen inni tørkerommet [°C], og λ er latent varme for fordamping av vann [J/kg] [28].

3.4. Tørkemetoder:

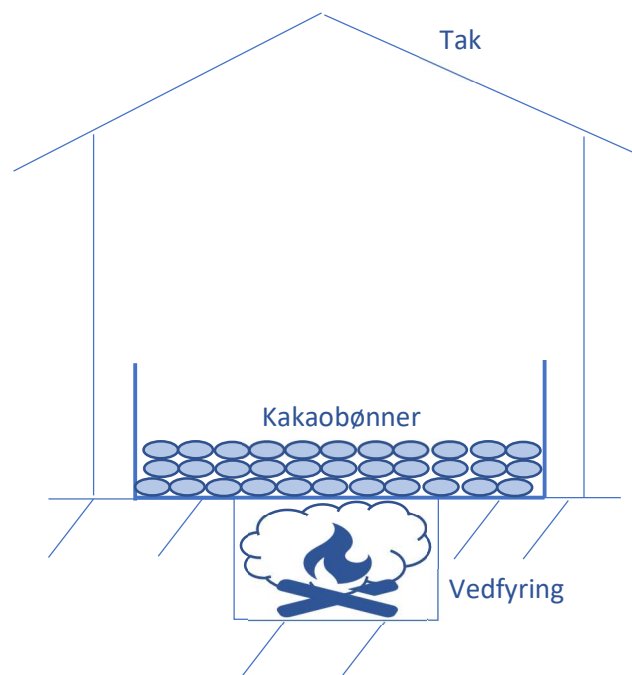
Varme kan transporteres til produktet på ulike måter. Konveksjon er varmeoverføring ved at et medium strømmer over et annet og brukes i varmluftstørkere. Stråling er transmisjon av varme via elektromagnetiske bølger og brukes i mikrobølgetørkere. Konduksjon er varmeutveksling mellom molekyler og øker ved temperaturdifferanse mellom mediene varmetransporten skal gjøres mellom og er avhengig av mediets evne til konduksjon. Denne formen for varmeoverføring brukes i tørking gjennom varme overflater [29].

Tørking av kakaobønner deles inn i hovedgruppene naturlig og kunstig. Under naturlig tørking tørkes kakaobønnene ved hjelp av solenergi [30]. Disse metodene er miljøvennlige, men har behov for store mengder solinnstråling [31]. En av metodene i denne hovedgruppe, omtalt som åpen direkte tørking ute, er en svært utbredt metode spesielt blant mindre produsenter på grunn av produksjonsmengde og økonomiske ressurser [32]. Kakaobønner som er soltørket med denne metoden er assosiert med god kvalitet på grunn av de milde tørkeforhold som ofte gir høyt kakaosmak og lavt syreinnhold [33]. Ulempen er varierende vær, produktsvinn og krav til arbeidskraft [34].



Figur 7: Illustrere tørkemetoden "åpen direkte tørking ute" av kakaobønner. En naturlig tørkemetode hvor kakaobønnene tørkes direkte ved hjelp av solenergi.

Ved kunstig tørking anvendes andre energiformer. Fordelen med slike metoder er at risikoen for mugg reduseres ved at fuktighet fjernes hurtigere og partiet med tørkede kakaobønner får en homogen kvalitet [26, 35]. Ulempen med denne typen tørking er at det er kostbart og røyk som produseres kan komme i kontakt med kakaobønnene og påvirke smaken slik at de får lavere verdi [16, 34]. Eksempel på ulike tørkemetoder som blir brukt eller har vært utprøvd til å tørke kakaobønner er fremstilt i tabell 2.



Figur 8: Illustrerer tørkemethoden "vedfyring" av kakaobønner. En kunstig tørkemethode der kakaobønnene tørkes ved å fyre under tørkeplattformen. Denne metoden brukes i landsbyer i Sørvest-Kamerun.

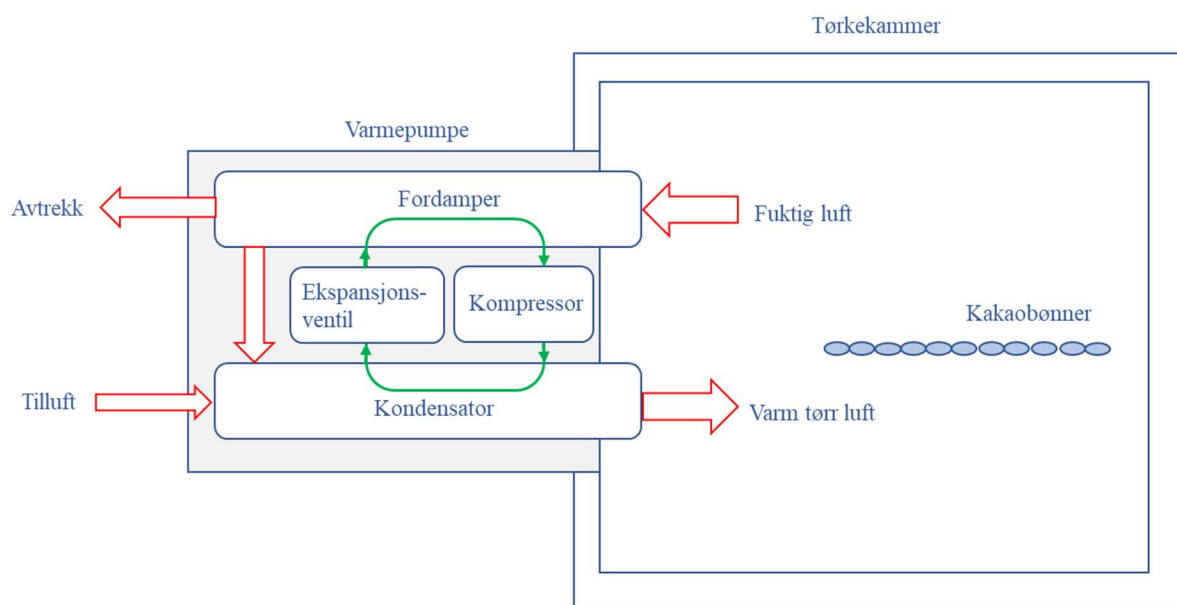
Tabell 2: Eksempel på tørkemethoder som blir brukt eller er utprøvd til å tørke kakaobønner.

Naturlig	Åpen direkte tørking ute	Kakaobønnene ligger på et tre eller stålbrett og eksponeres for solstråling og varme fra omgivelsene. Tykkelsen på kakaobønnelaget varierer. Ved denne metoden tas kakaobønnen ofte inn eller under tak om natten eller ved ugunstig vær. Kakaobønnene kan blandes underveis i tørkingen for jevnere varme.
	Under dekket rammeverk («drivhustørking»)	Tørking under et rammeverk med plasttak og -vegger vil øke effektiviteten av solinnstrålingen og beskytte mot regn og insekter [15]. Denne metoden vil fungere likende som et drivhus [36].
	Solfanger (direkte)	Flatplatesolfanger hvor kakaobønnene er eksponert for sollys. Solfangere som anvendes til tørking kan komponeres med ulikt antall glassplater, med forskjellige plasseringer av kollektorplaten og kollektorplater av ulike typer. Disse variasjonene vil påvirke den termiske ytelsen.
	Solfanger (indirekte)	Flatplatesolfanger hvor kakaobønnene er totalt skjermet fra solinnstråling
Kunstig	Varmluftsovn	Varmluftsovn assosieres ofte med høye energikostnader, lav termisk effekt og lavere kvalitet [33].
	Varmepumpe	Kakaobønnene legges i et tørkekammer og et varmepumpesystem (fordamper, kondensator, kompressor og ekspansjonsventil) gir en varm luftstrøm.

		Varmepumpe har den fordel at den kan tørke i avfuktede forhold som virker positivt på produktets kvalitet [33].
	Vedfyring	Fyrer med ved under tørkeplattform. Dette fører til uønsket røyksmak på kakaobønnene og er en metode som er lite kontrollert og har høy temperatur. Dette påvirker kakaobønne kvaliteten negativt [36]. Tørkemethoden er vis i figur 8.

3.5. Varmluftstørking:

Flere tørkere bruker varmluft og varmeoverføring ved konveksjon for å tørke produkter. Dette gjøres ved at luft varmes opp av solenergi eller andre energiformer og en vifte får denne varme luften til tørkeproduktet. Den oppvarmede luften kan både strømme over og gjennom produktet vertikalt eller horisontalt. Noen tørkere blåser gjennom et lag med produkt slik at det blir hengende i luften, for eksempel fluidisert sengtørker eller impigment tørker. Dette eksponerer en stor overflate for den varme luften, men dette krever at produktet er lite og har egenskaper som gjør at det kan fluidiseres. Ved store vindhastigheter er grensebarriere nesten fjernet ved slike tørkere. Roterende tørkere som blåser luft gjennom produktet med eller mot rotasjonen gir samme fordel med stor eksponert overflate i tillegg til at rotasjonen er egnet for produkter som har en tendens til å klistre seg sammen. I andre tørkere legges produktet på belter som går gjennom tørkeren. Her kan tørkeren enkelt deles inn i flere faser med ulike parameterverdier. Denne typen tørker brukes ofte til storproduksjon. Industrietørkere brukes ofte ved behov for høye temperaturer, for eksempel har impigment tørker en temperatur på 100-350°C. Bin-tørker er en type tørker som brukes til ettertørking. Produktet tas da fra en annen type tørker (gjerne med høyere temperatur og luftstrømning) til etterbehandling i denne tørkeren under den fallende tørketid perioden. Tørkeforholdene i denne tørkeren er gjerne varmluft med 40-45 °C og 0.5 m/s. Ulempen er at produktet må tåle høy kompresjon. En annen type tørker som kategoriseres som varmeluftstørker er soltørker. Her varmes luften opp av solinnstråling. Dette gir mindre kontrollerbare tørkeforhold og en lavere temperatur som gir lengre tørketid. Som nevnt tidligere er tørkemethoder ved bruk av solenergi avhengig av tid på døgnet og været. Det kan i tillegg forkomme perioder uten tørking som gir en risiko for bakteriell vekst [14].



Figur 9: Illustrerer forenklet tørkeprosessen i et varmepumpe-tørkekammersystem [1].

Tørking ved bruk av varmepumpe er en form for kontrollerbar varmluftstørking. Utviklingen av varmepumper gir mulighet for et stort spekter med mulige temperaturer. Dette gjør at temperaturen på tørkingen kan stilles inn etter ønskede tørkeforhold. Et tørkesystem med varmepumpe består (som vist i figur 9) av et isolert tørkekammer og en varmepumpe med fordamper, kompressor, kondensator og ekspansjonsventil. Enkelt forklart utnytter varmepumpen varme fra den fuktige luften i tørkekammeret og varme fra omgivelsene til å holde en vedvarende høy temperatur på den tørre luften som frigis som i tørkekammeret. I varmepumpen sirkulerer et medium mellom fordamperen, kompressoren, kondensatoren og ekspansjonsventilen, illustrert i grønt i figur 9. Dette mediet tar opp og gir fra seg varme. Til kompressoren kommer mediet i gassform med lav temperatur og trykk, her komprimeres den adiabatisk slik at temperatur og trykk øker. I kondensatoren kondenseres denne gassen til væske og gir fra seg varme til tilluften fra omgivelsene og den dehydrerte luften fra fordamperen. Væsken ekspanderes i ekspansjonsventilen som gir lavt trykk og temperatur. Varmen til den fuktige luften fra tørkekammeret gjør at mediet som er i væskeform i fordamperen vil fordampe. På grunn av det lave trykket vil mediet fordampe ved lav temperatur. Den fuktige luften fra tørkekammeret vil kondensere når den gir fra seg varme i fordamperen og kondensen vil gå ut gjennom avtrekket [1].

Energibalansen i luften i tørkekammeret er gitt ved:

$$m_a C_{pa}(T_r - T_a) = m_{ai} \left((C_{pa} T_a) + (Y_i(2500.9 + 1.82 T_a)) \right) - m_{a0} \left((C_{pa} T_r) + (Y_a(2500.9 + 1.82 T_r)) \right) + m_v C_{pd} T_r - A_k h_{c1}(T_r - T_k) - A_d h_{c2}(T_r - T_d) \quad (13)$$

Energibalansen til kakaobønnene:

$$m_k C_{pk}(T_r - T_k) = -m_v L_{v+} + A_k h_{c1}(T_r - T_k) \quad (14)$$

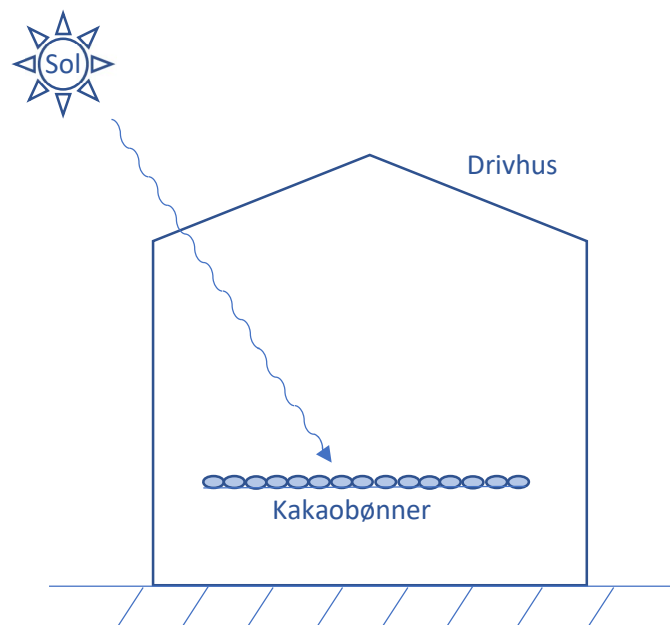
Energibalansen til veggen i tørkekammeret:

$$\rho_d C_{pd}(T_r - T_d) = h_{c2} A_d (T_r - T_d) - K A_d (T_d - T_a) \quad (15)$$

Temperaturen med varmepumpe har tidligere blitt oppgitt til å ligge mellom 10 og 55 °C, og kan få den relative fuktigheten i tørkekammeret til å ligge mellom 10 og 50 % [2].

3.6. Drivhustørking:

Tørking under dekket rammeverk kalles ofte for drivhustørking og gjøres ved at det settes opp et rammeverk som dekkes med plastfilm, plast eller glass. Dette rammeverket kan ha ulike utforming og størrelse som er tilpasset hvor mye og hva som tørkes. For luftsirkulasjon er det ventil eller åpning i konstruksjonen. Luftsirkulasjonen kan være naturlig eller kunstig med vifte. Produktet som tørkes legges på brett eller gitter inni drivhuset [37].



Figur 10: Illustrerer tørking av kakaobønner i drivhus. Dette er en naturlig tørkemetode hvor kakaobønnene tørkes ved hjelp av solenergi og drivhuseffekten. Drivhuset beskytter i tillegg kakaobønnene mot forurensing.

Dette er en metode som brukes for å tørke flere ulike typer produkter. Sammenliknet med åpen direkte tørking ute fremgår det i flere artikler at denne metoden gir en tørkeprosess av bedre kvalitet og som er hurtigere. Den tildekkede rammekonstruksjonen vil gi både økt temperatur og beskyttelse mot dyr, støv og klima. Metoden har fått navnet drivhustørking fordi det utnytter drivhuseffekten gjennom å slippe inn den kortbølgedestrålingen fra solen og reflektere tilbake den langbølgede strålingen fra produktene og underlaget [28, 38, 39].

Metoden kan utføres passivt ved naturlig luftsirkulasjon gjennom ventilen på grunn av trykkforskjeller ved økt temperatur og luftfuktighet (illustrert i figur 10), eller aktivt ved å benytte en vifte som drives elektrisk av for eksempel solceller (illustrert i figur 11) [28]. Ved å tørke i et drivhus med tvungen ventilering vil den relative fuktigheten i drivhuset minske på grunn av økt temperatur og større forskjell i damptrykket. Dette fører til at fuktighet fjernes fortere [40].

Flere forskere ser på hvordan de kan øke effekten av denne type metode ved for eksempel å ha absorberende gulvbelegg/solfanger, isolerende vegg mot nord eller et UV-filter for dekket på rammeverket [28] [37].

Energibalanse ved naturlig ventilering av drivhus:

$$Q_{sol} = Q_{dekke} + Q_{ventilering} + Q_{fordamping} + Q_{lagring} \quad (16)$$

hvor Q_{sol} er solinnstrålingen, Q_{dekke} er varmeoverføringen fra dekket til drivhuset i form av konvektive- og strålingstap, $Q_{ventilering}$ er tapene ved naturlig ventilering, $Q_{fordamping}$ er varmetap ved fordamping og $Q_{lagring}$ er varmen som lagres i drivhuset.

Komponentene i energibalansen beregnes ved [41]:

$$Q_{sol} = \tau R \quad (17)$$

$$Q_{dekket} = \frac{A_d h}{A_g} (T_r - T_a) \quad (18)$$

$$Q_{ventilering} = \frac{\rho C_a G}{A_g} (T_r - T_a) \quad (19)$$

$$Q_{fordamping} = \varepsilon R^{nett} \quad (20)$$

Ved å sette inn likning (17)-(20) i energibalansen i likning (16), anta at $Q_{lagring}$ er så liten sammenlignet med de andre verdiene at den kan ses bort i fra og at $R^{nett} \approx Q_{sol}$ fås:

$$\tau R (1 - \varepsilon) - \frac{A_d h}{A_g} (T_r - T_a) - \frac{\rho C_a G}{A_g} (T_r - T_a) = 0 \quad (21)$$

Likning (21) forenkles videre for å kunne estimere temperaturen inne drivhusrommet (se vedlegg 1) [41]:

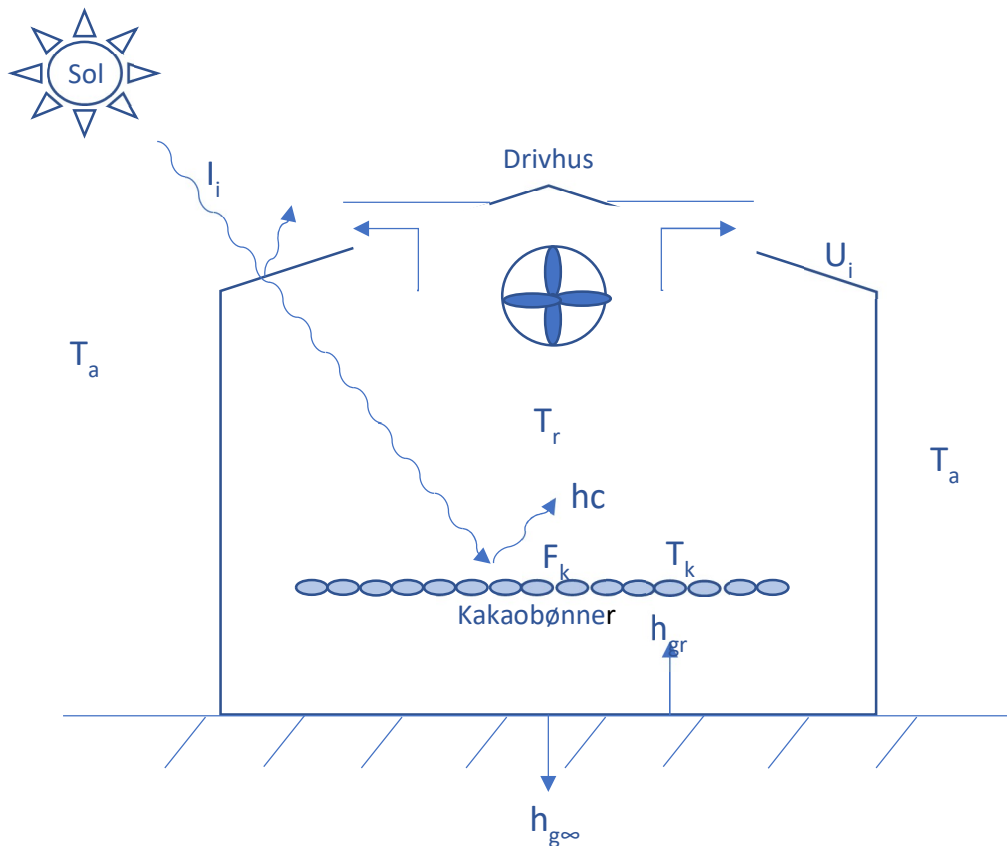
$$T_r = T_a + \frac{\tau R \alpha}{\beta v + \gamma} \quad (22)$$

hvor α , β og γ er parametere som Mesmoudi, K. et al. (2010) har beregnet og kalibrert til være; $\alpha = 0.043 \pm 0.003$, $\beta = 0,612 \pm 0,06$ og $\gamma = 0,091 \pm 0,002$ [41].

For beregning av temperatur i drivhusrom ved tvungen ventilering/konveksjon brukes energibalanse. Energibalansen til drivhusrommet er gitt ved [40]:

$$Q_{sol} + Q_{k, konveksjon} + Q_{k, fordamping} + Q_{gulv} = Q_{kunstigventilering} + Q_{dekke} \quad (23)$$

hvor Q_{sol} er solinnstrålingen mottatt av drivhusrommet, $Q_{k, konveksjon}$ er konveksjonstapet fra kakaobønnene som drivhusrommet mottar, $Q_{fordamping}$ er varmetap fra kakaobønnene ved fordamping, Q_{gulv} er varmetap fra drivhusgulvet i form av konveksjon og stråling, $Q_{kunstig ventilering}$ er varmetap til omgivelsene ved kunstig ventilering, og Q_{dekke} er varmetap gjennom drivhusdekket til omgivelsene.



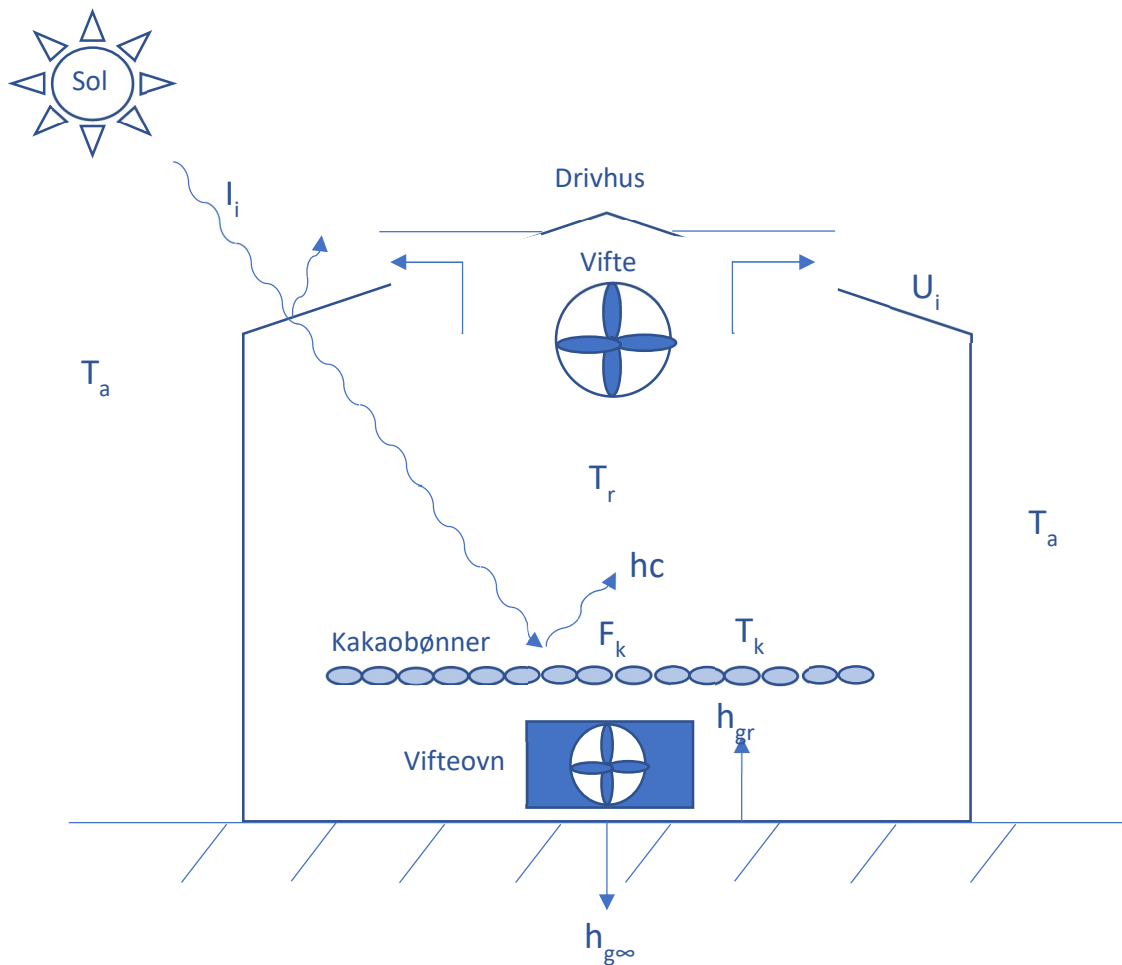
Figur 11: Illustrerer energibalansen ved drivhustørking med tvungen konveksjon gitt ved formel (11). Figuren er basert på figur fra Jain & Tiwari (2004) [40].

Med innsatte uttrykk er denne energibalansen illustrert i figur 11 gitt ved [40]:

$$(1 - F_k)(1 - \alpha_g) \sum I_i A_i \tau_i + h_c(T_k - T_r)A_k + 0.016h_c[P(T_k) - \gamma_r P(T_r)]A_k + h_{gr}(T|_{y=0} - T_r)(A_g - A_k) = 0.33NV(T_r - T_a) + \sum U_i A_i (T_r - T_a) \quad (24)$$

For beregning av drivhusromtemperatur T_r ved tvungen ventilering/konveksjon forenkles denne energibalansen til (ved hjelp av likninger i vedlegg 2) [40]:

$$T_r = \frac{I_{effR} + h_c A_k T_k + 0.016(R_1 T_k + R_2 - \gamma_r R_2) + H_g I_{effG} + [0.33NV \sum U_i A_i + (UA)_{g\infty}] T_a}{h_c A_k + 0.016 h_{gr} R_1 + (UA)_{g\infty} + 0.33NV + \sum U_i A_i} \quad (25)$$



Figur 12: Illustrerer energibalansen i drivhusrommet ved kunstig ventilering og vifteovn.

For å øke temperaturen i drivhusrommet kan det settes inn bidrag fra kunstig tørkemethode (illustrert i figur 12). Likning (27) gir beregning av temperatur i drivhusrommet ved kunstig ventilering og elektrisk vifteovn:

$$T_r = \frac{I_{effR} + hcA_k T_k + 0.016(R_1 T_k + R_2 - \gamma_r R_2) + H_g I_{effG} + [0.33NV + \sum U_i A_i + (UA)_{g\infty}] T_a + m_a c_{pa} (T_{el} - T_{r1})}{hcA_k + 0.016hc_r R_1 + (UA)_{g\infty} + 0.33NV + \sum U_i A_i} \quad (26)$$

hvor T_{r1} er temperaturen i drivhusrommet beregnet ved likning (25).

3.6.1. Tørking gjennom varme overflater:

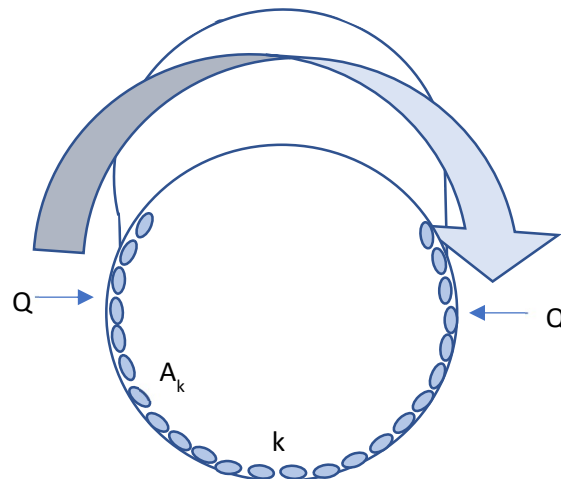
Tørking gjennom varme overflater bruker konduksjon som varmeoverføring fra overflaten til tørkeproduktet. Den største motstanden til denne typen varmeoverføring er tørkeproduktets evne til konduksjon. Det vil i tillegg oppstå motstand hvis et delvis tørket produkt blir «løftet» over varmeoverflaten av grensebarrieren. Hvilken tykkelse laget av produkt som skal tørkes bør ha, er avhengig av hvilke egenskaper produktet har og hvordan den forandrer seg i tørkeprosessen. Fordelene med slike tørkere sammenlignet med de som tørker med varmluft

og konveksjon er at man får høyere termisk effekt og at metoden enkelt kan gjøres i vakuum hvis dette er et behov. Eksempel på tørking gjennom varme overflater [14]:

- Balltørker som har oppvarmede baller som beveges sakte rundt i tørkekammeret.
- Trommeltørker hvor kondensert damp varmer opp sakte roterende tromler som igjen overfører varme til tørkeproduktet. Denne krever et tynt lag med produkt for å unngå varmeskade. Ulempen med denne typen er at det er et lite areal tilgjengelig for tørking og at den har en høy kostnad.
- Vertikalrørende tørker består av en oppvarmet beholder med en vertikal rører. Røreren gir en konstant blanding av produktet og fjerner produkt fra veggene for å hindre overopphetning.

Enkel trommeltørker (illustrert i figur 13) har høy tørkerate og høy energieffektivitet, men brukes oftest til produkter med en slamkonsistens. Tørkeraten til denne tørkemethoden er gitt ved likning (10) hvor varmoverføringsraten Q [J/s] i en trommeltørker er gitt ved [14]:

$$Q = -KA_T \frac{(T_a - T_k)}{x} \quad (27)$$



Figur 13: Illustrerer en enkel trommeltørker til tørking av kakaobønner.

3.7. Tidligere forskning på tørkemethoder for kakaobønner

Guehi et. al. (2010) oppnår samme kvalitet som ved åpen direkte tørking ute, hvis kakaobønnene først tørkes åpent direkte ute en uke, for så at den resterende tørkeprosessen

utføres i en tørkeovn på 60 °C. Begge metodene resulterte i bedre kvalitet i form av syreinnhold enn konstant tørking i ovn ved 60 °C [42].

Bonaparte et al. (1998) oppnår bedre kvalitet på kakaobønner tørket ved hjelp av solfanger, direkte og indirekte, enn ved åpen direkte tørking ute. Kakaobønnene som var tørket indirekte av en solfanger hadde best kvalitet, men ikke signifikant. Kvaliteten var i forsøket målt ved å se på mugg, farge, kutt-test, pH og titrerbar surhet [17].

Flere artikler oppgir at kunstig tørking av kakaobønner ved høye temperaturer (over 60°C) utvikler en dårlig smak, et høyt syreinnhold og mindre oksidering av polyfenol sammenlignet med soltørkede kakaobønner når de har samme fermenteringsnivå [17, 23-25, 33, 42, 43]. Hii et. al. (2009) underbygger dette gjennom forsøk der kakaobønner tørkes i varmluftsovn ved 60, 70 og 80 °C med innlagt tempereringsperioder. Produktene som tørkes ved 60 °C gav høyest kvalitet [23]. Dette fordi testaskallet som nevnt vil tørke raskere enn cotyledonkjernen ved høye temperaturer og skape en barriere for kondensering av syren fra cotyledon [2, 19, 23, 24, 33, 44]. Det er rapportert at et vanninnhold fra 0.3 g H₂O/g tørrstoff og nedover i testeaen gir for lite fuktighet mellom de to delene av kakaobønnen til gjennomtrengning og fjerning av syre [24].

Hii et. al. (2013) observerer at overflaten til testeaen i tillegg ble tørr som årsak av konstant luftstrøm. Det er viktig å fjerne fukt fra overflaten raskt for å forhindre muggvekst, men dette kan som nevnt føre til en hard testea som hindrer fukttransport fra cotyledon [33]. Hurtig tørking, som vil forekomme ved høye temperaturer, er ikke anbefalt fordi det medfører at oksidasjonen inni kakaobønnen ikke får tid til å oppstå og de kjemiske prosessene som starter under fermenteringen ikke fullføres. Oksideringen i kakaobønnen medvirker til den brune fargen [24].

Herman et al. (2018) oppgir at økning i tørketemperatur vil påvirke den indre fukttransporten mer enn den eksterne. Ved 60°C økte fukttransporten fra overflaten på kakaobønnen til omgivelsene med 50% når lufthastigheten økte fra 0,3 m/s til 1 m/s. Tørkehastigheten påvirkes likevel hovedsakelig av temperaturen og mindre av luftstrømmen [27, 30, 35].

Dina et al. (2015) observerte at tørking ved solfanger med termisk lagring gjennom tørkemiddel fører til en mer effektiv tørkeprosess i form av kortere tørketid og lavere spesifikt energiforbruk. Ved bruk av termisk lagring på nattestid var temperaturen i tørkekammeret lavere enn under solstråling, men likevel høyere enn omgivelsestemperaturen. Det ble ikke sett på kvalitet av kakaobønnen i dette forsøket. Termisk lagring forhindrer reabsorpsjon av

fuktighet nattestid og utvikling av mugg [25]. Mugg er et resultat av høy fuktighet, lav luftgjennomstrømning og tørking over lang tid ved lav temperatur. Tørking på treoverflater gir mer mugg enn på ståloverflater [17, 23, 24].

Faborode et al. (1995) observerer at ved tørking i varmluftsovn med en luftstrøm på 0.2 m/s oppnås det best kvalitet på kakaobønnene ved tørking på lave temperaturer (40°C) eller ved periodisk hvile av kakaobønnene som tørkes på høye temperaturer (60°C). Under åpen direkte tørking ute vil kakaobønnene få hvile nattestid, noe som virker positivt for den biokjemiske nedbrytingen og bruningsreaksjonen under tørking. Hvile øker tørkehastigheten ved at det gir fuktigheten inni kakaobønnen mulighet til å bevege seg til testaen og overflaten hvor det lettere kan fordampe [23, 32, 43]

Hii et al. (2011) sammenlignet tørking ved hjelp av varmpumpe (med konstant, stigende og synkende temperatur) med tørking ved hjelp av varmluftsovn og kommersielle kakaobønner fra Ghana, Malaysia og Indonesia. Kakaobønnene tørket med varmpumpe og stigende temperatur gav den beste kvaliteten. Kvaliteten er målt ved hjelp av pH, farge og kutt-test. Alle de varmpumpetørkede prøvene gav et høyere resultat på sensorisk test enn de som var tørket med varmluftsovn [24].

Herman et al. (2018) konkluderte med at kakaobønner fra Amazonas bør tørkes ved 30-40 °C. Eksperimentet er her utført med varmluftsovn, og sensorisk- og organiskkvalitet ligger til grunn for konklusjonen [35].

Bonaparte et al. (1998) undersøkte tørking av ulike lastefrekvenser, dvs. mengden kakaobønner, som tørkes med bruk av solfangere og åpen direkte tørking ute. Lav lastefrekvens (13.0 kg/m²) gav fin farge med høy titerbar surhet, mens høy lastefrekvens (40.4 kg/m²) gav motsatt resultat [17]. Mengde kakaobønner i dybden som tørkes av gangen påvirker kvaliteten ved at når dybden øker, økes konsentrasjonen av syre. Stor dybde forhindrer varmen i å spre seg jevnt og begrenser tilgangen til oksygen. Ved større dybder vil i tillegg tørketiden øke [26].

4. Metode:

Oppgaven er basert på et litteraturstudium hvor det er kartlagt viktige faktorer i tørkeprosessen til kakaobønner og ulike tørkemetoder. Det ble i oppgaven hovedsakelig brukt søkemotoren Web of Science. Hvis det ikke oppstod ønsket treff i denne ble det søkt videre i Google Scholar. Det er i tillegg bruk flere undervisningsbøker. For å finne klima for ønsket område i Kamerun ble det brukt ulike nettsider i mangel på treff i overnevnte søkemotorer og databaser.

Det er ikke gjort noe forsøk i forbindelse med oppgaven, og alle parametere og verdier er hentet fra litteratur og tidligere forskning. Karakteristikken til en kakaobønne som er brukt i oppgaven er en diameter på 1 cm, vekt på m_t omtrent 1.1 g og en spesifikk varmekapasitet C_p på 1.7 kJ/kg K [45]. Spredningsevnene til vann og syre i kakaobønningen er beregnet ved likning (4) og (5), hvor masserelasjonen X_{vk} er for vann i kakaobønnene er antatt å være 0.07527 kg/kg beregnet fra antatte fuktighetsnivå til kakaobønningen. Vannaktiviteten til en tørket kakaobønne med % fuktighet (våtbasis) er beregnet ved formel (3) og samme antatte masserelasjon til vann.

Solinnstrålingen som brukes til beregningene er oppgitt i figur 4 som gjennomsnittlig global horisontal innstråling, denne består både av direkte- og diffusinnstråling. Det antas en vindhastighet på 1 m/s fra omgivelsene og en relativ fuktighet i omgivelsene som oppgitt i figur 5. Omgivelsestemperaturen T_a som er brukt i beregningene er gjennomsnittlig minimums- og maksimumstemperatur per dag i Douala som er oppgitt i figur 2 og tabell 3.

Tabell 3: Gjennomsnittlig daglig minimums- og maksimumstemperatur i Douala [10].

	Gjennomsnittlig daglig minimumstemperatur (°C)	Gjennomsnittlig daglig maksimumstemperatur (°C)
Jan	23,4	32,2
Feb	24,1	32,8
Mar	23,9	32,5
Apr	23,5	32,1
Mai	23,2	31,4
Jun	23,0	29,9
Jul	22,7	28,1
Aug	22,8	27,7
Sep	22,8	29,0
Okt	22,5	29,8
Nov	23,2	30,9
Des	23,3	31,7

Den relative fuktigheten beregnes i oppgaven ved hjelp av likning (6) og figur 16.1 i *Food processing technology* (se vedlegg 3) og Tabell B.1 i *Fundamentals of Thermodynamics* (se vedlegg 4). Den absolutte fuktigheten og våttemperaturen er gitt ved å lese av fra figur 16.1 i *Food processing technology*. Det antas en feilmargin på 0.001 kg/kg tørr luft og 0.5 °C ved denne avlesningen. Det er ikke beregnet økning i fuktighet som årsak av fordampning fra kakaobønnen i noen av tørkemethodene [14, 29].

Tørkeraten TR til de konvektive tørkemethodene er beregnet ved bruk av formel (9). Varmeoverføringskoeffisienten h_c som er bruk er 3.95 W/m² K for naturlig drivhustørking, 5.7 W/m² K for kunstig ventilering og 69-167 W/m² for varmepumpe ved ulike lufthastigheter. Våttemperatur brukt i beregningene er hentet fra 16.1 i *Food processing technology* (se vedlegg 3). Tørketiden er beregnet ved likning (8) ut ifra denne tørkeraten og mengden kakaobønner det er antatt i tørkeren.

Energien som kreves i de ulike tørkeprosessene beregnes ved bruk av likning (11) og (12) og varierer dermed med mengden kakaobønner som oppgis å tørkes ved de ulike metodene.

4.1. Varmepumpe:

Systemet det er beregnet på har et tørkekammer med en veggoverflate på 3 m² som er 0.2 m tykke og isolerte. Kakaomassen i tørkekammeret er satt til 10 kg og dekker 0.5 m².

Produktlaget har en diameter på 0.05 m. Det beregnes på tre ulike lufthastigheter 1, 2 og 3 m/s og to temperaturer 50 °C og 40 °C. Verdier brukt til beregning er som gitt i tabell 4.

Det antas at kakaobønnene har et fuktighetsnivå på 50% (våtbasis) og skal tørkes ned til 7% (våtbasis). Det antas at varmepumpen settes til en temperatur oppgitt temperatur og at dette er temperaturen i tørkekammeret T_r . Det antas mindre sirkulasjon av luft med omgivelsen og at varmepumpen står for sirkulasjon av luft i tørkekammeret.

Tabell 4: Verdier brukt til beregning ved tørking av kakaobønner i systemet varmepumpe og drivhuskammer [1, 45].

ν	$1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	Kinetisk viskositet for luft
ρ_a	$1.06 \text{ kg}/\text{m}^3$	Tetthet til luft
ρ_d	$2700 \text{ kg}/\text{m}^3$	Tetthet til den isolerte veggen
λ_a	$0.022 \text{ W}/\text{m K}$	Konduktiviteten til den isolerte veggen
C_{pd}	$860 \text{ J}/\text{kg K}$	Spesifikk varme til den isolerte veggen
C_{pv}	$2020 \text{ J}/\text{kg K}$	Spesifikk varmekapasitet til vann
C_{pk}	$1700 \text{ J}/\text{kg K}$	Spesifikk varmekapasitet til kakaobønner

C_{pa}	1005 J/kg K	Spesifikk varmekapasitet til luft
X_p	0.5	Fuktighet i kakaobønnene
L_v	2257 J/kg K	Latent varmeoverføring
K	0.11 W/m ² K	Konduktiv varmeoverførings koeffisient

Temperaturen til kakaobønnene T_k i tørkekammeret og temperaturen til veggen i tørkekammeret T_d beregnes ved hjelp av likning (14) og (15).

4.2. Drivhustørking:

I eksempelet med drivhustørking blir det sett på scenario med naturlig ventilering, kunstig ventilering og kunstig ventilering med vifteovn.

I scenarioet med drivhustørking ved naturlig ventilering beregnes det hvilken temperatur som kan oppnås i drivhuset for å tørke kakaobønner ved hjelp av energibalanse gitt ved likning (22). Beregningene tar utgangspunkt i Mesmoudi, K. et al. (2013) sin metode og et drivhus av like dimensjoner. Det antas i beregningene at $Q_{lagring}$ er neglisjerbar og at netto innstråling R^{nett} er lik solinnstrålingen Q_{sol} . Drivhuset har en grunnflate på 4 x 8 m², en takhøyde på 3.2 m på det laveste og 3.6 m på det høyeste. Sideventiler på drivhuset antas kontinuerlig åpne for naturlig ventilering. Beregning av temperatur inni drivhuset er gjort ved tre ulike dekkmateriale; hagebrukerglass ($\tau = 0.83$), hardplast ($\tau = 0.72$) og plastfilm ($\tau = 0.68$).

I senarioet med tvungen ventilering i form av vifte beregnes temperaturen inni drivhusrommet gitt ved likning (25). Beregningene tar utgangspunkt i et drivhus som er dimensjonert likt som drivhuset som brukes av Tiwari et. al. (2004) sine forsøk. Drivhuset har en grunnflate på 1.2 x 0.8 m², har langvegger på 0.4 m og kortvegger som er 0.6 m på det høyeste. Taket er skråstilt og hver side har et areal på 1.2 x 0.45 m². På taket er det plassert en ventil på 0.043 m².

Vegger og tak er dekket av plastfilm. På en av kortsidene er det en vifte på 0.225 m i diameter og som produserer en vindhastighet på 5 m/s. Inni drivhuset er det et nettingbrett på 0.7 x 0.6 m² hvor det plasseres et tynt lag med kakaobønner ca. 1.5 kg. På grunn av Kameruns beliggenhet ved ekvator er drivhuset plassert slik at langsiden er vendt mot vest og øst [40].

Verdier brukt til å beregne temperaturen i drivhusrommet ved kunstig ventilering er oppgitt i tabell 5. Verdiene som ikke er oppgitt er basert på beregninger gitt ved likninger i vedlegg 2.

Tabell 5: Gir verdier brukt til beregning av temperaturen i drivhusrom ved kunstigventilering [40].

A_d	2,84 m ²
A_g	0,96 m ²
A_k	0,42 m ²
C_a	1700 J/kg K
F_k	0,43
M_k	1,5 kg
h_c	79,696 W/m K
h_{gr}	8,0 W/m ² K
h_w	9,5 W/m ² K
$UA_{g\infty}$	0,789 W/K
N	30
R_1	397,52
R_2	-7926,9
v	1 m/s
V	0,48 m ³
α_g	0,6
γ_r	0,6
ε	0,9
τ	0,9

Ved beregning av temperatur til drivhusrommet ved kunstig ventilering er det antatt at:

- temperaturen til kakaobønnene T_k er lik omgivelsestemperaturen
- kakaobønnene tørkes i et tynt og enkeltvis lag
- varmekapasiteten til drivhusdekket kan ses bort i fra
- luften i drivhusrommet ikke er lagdelt
- luftens absorpsjon kan neglisjeres

Det er i tillegg gjort forenklinger ved at:

- Det ikke er sett på hvordan solinnstrålingen fordeler seg på de ulike drivhussidene i løpet av dagen.
- h_g er beregnet ved 25°C og det er antatt at grunnen består av betong og jord.
- F_c er beregnet ut ifra hvilken prosent kakaobønnene dekker av gulvoverflaten

Ved beregning av temperaturen i drivhusrommet til scenarioet med kunstig ventilering og elektrisk vifteovn er det brukt de samme verdiene og gjort de samme forenklingene og antakelsene som ved beregning av kunstig ventilering uten elektrisk vifte ovn. Den elektriske

vifteovnen det er beregnet med er en ThermoSafe EVB-S 306-2 med en effekt på 9kW en luftstrøm på 1300 m³/h og et volum på 495x380x305 mm³. Temperaturen i drivhusrommet er ved dette scenarioet beregnet ved hjelp av likning (26).

4.3. Enkel trommeltørking:

Til beregning er det brukt en trommel som har en diameter på 0.7 m og er 0.85 m lang. Det antas et 0.01 m tynt lag med kakaobønner som dekker 75 % av trommelen. Andre verdier som er brukt til beregning av denne tørkemethoden er listet i tabell 6. Det er beregnet tørkerate TR ved denne tørkemethoden når trommelveggene har en temperatur på 40, 50 og 60 °C ved bruk av likning (10) og (27). Temperaturen til kakaobønneren antas ved starten av prosessen å være lik omgivelsestemperaturen T_a . Det er ikke tatt hensyn til rotasjonshastighet i beregningene og det antas at trommelen holder en hastighet som gjør at kakaobønnene får kontakt med trommelveggen og blir naturlig rotert for en jevn tørking [14].

Tabell 6: Gir verdier brukt til beregning ved enkel trommeltørking [14, 45].

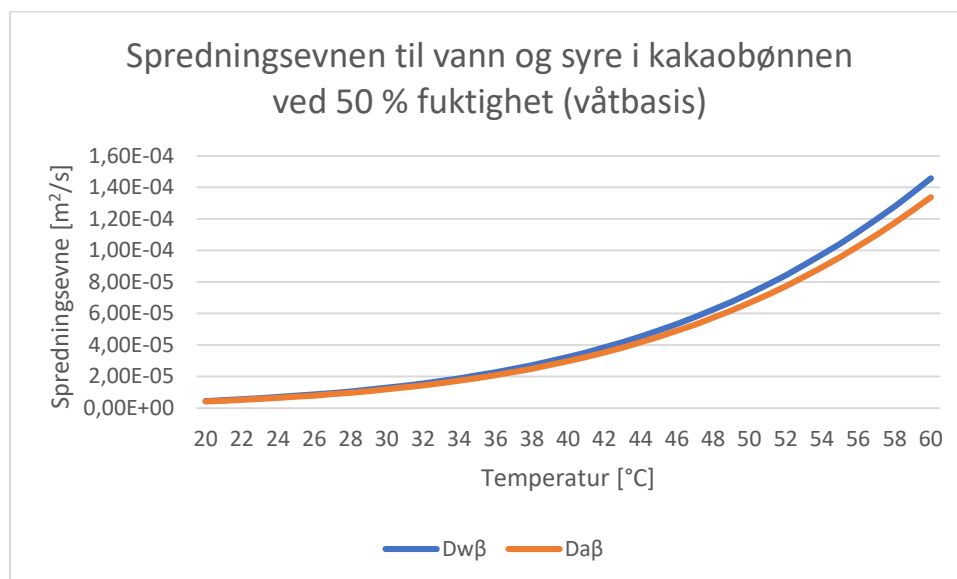
A_T	1.87 m ²	Areal til trommel
m_k	14.73 kg	Masse til kakaobønner
m_v	6.33 kg	Masse med vann som skal fjernes
k	0.3 W/m K	Varmekonduktivitet til kakaobønner
ρ_k	1015 kg/m ³	Tettheten til kakaobønner
L_v	2257 J/kg	Latent varme ved fordamping av vann
x	0.01 m	Tykkelsen på kakaobønnelaget

5. Resultat:

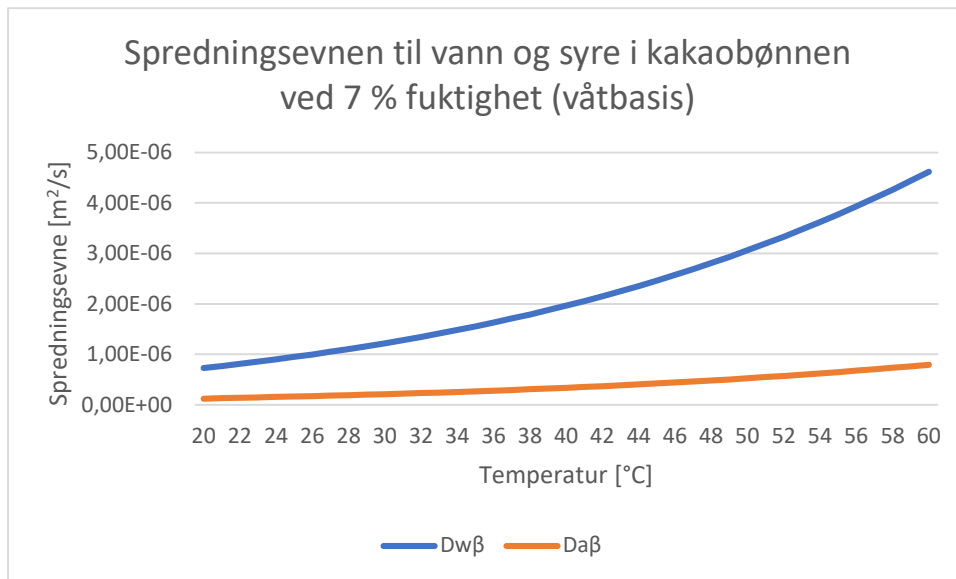
Fra ett gram kakaobønne må det fjernes 0,473 g vann ved tørking fra 50 til 7 % fuktighet beregnet ved likning (11). I landsbyene i Kamerun tørkes det vanligvis 500 kg kakaobønner av gangen og det må da fjernes omtrent 215 kg fuktighet. For å tørke denne mengden fuktighet beregnes et energibehov på 1207 J for en kakaobønne og 525.4 MJ for 500 kg kakaobønner. Ved å velge en gjennomsnittsverdi fra Bonapartes et al. (1998) sine vurderte lastefrekvenser for kakaobønner, 26.9 kg/m², trengs det omtrent 17 m² for å tørke 500 kg kakaobønner. Vannaktiviteten til kakaobønnene etter fermentering er beregnet til å være 1 ved et fuktighetsnivå på 50 % (våtbasis). Etter tørking ned til 7 % (våtbasis) er vannaktiviteten beregnet til 0.49.

Den relative fuktigheten gitt av klimadata fra Muyuka gir sammen med den gjennomsnittlige omgivelsestemperaturen i Douala en absolutt fuktighet på 0.0147-0.0231 kg/kg tørr luft. Månedlig oversikt over relativ fuktighet ved de ulike tørkemetodene er gikk ved vedlegg 5.

Kakaobønnens spredningsevne av vann og syre ved et fuktighetsinnhold på 50 % (som er antatt fuktighetsinnholdet etter fermentering) og 7 % (som er ønsket fuktighetsinnhold etter tørking) er vist i figur 14 og 15.



Figur 14: Gir spredningsevnen til vann og syre når kakaobønnen har et fuktighetsnivå på 50 % (våt basis).



Figur 15: Gir spredningsevnen til vann og syre når kakaobønnen har et fuktighetsnivå på 7 % (våt basis).

5.1. Varmepumpe:

Ved tørkemethoden der det brukes systemet varmpumpe og tørkekammer er temperaturen til kakaobønnelaget T_k , temperaturen til veggen i tørkekammeret T_d , gjennomsnittlig relativ fuktighet RH og gjennomsnittlig absolutt fuktighet AH gitt ved tabell 7.

Tabell 7: Gir temperaturen til kakaobønnelaget T_k fra likning (14), temperaturen til veggen i tørkekammeret T_d fra likning (15), gjennomsnittlig relativ fuktighet RH fra likning (4), gjennomsnittlig absolutt fuktighet AH ved tørking av varmpumpe i et tørkekammer, tørkerate og tørketid.

Luftstrøm	40°C			50°C		
	1 m/s	2 m/s	3 m/s	1 m/s	2 m/s	3 m/s
T_k	38.6 °C	37.5 °C	36.5 °C	48.6 °C	47.5 °C	46.5 °C
T_d	40.0 °C	40.0 °C	40.0 °C	50.0 °C	50.0 °C	50.0 °C
RH	40%	40%	40%	24 %	24 %	24 %
AH	0.0188 kg/kg	0.0188 kg/kg	0.0188 kg/kg	0.0188 kg/kg	0.0188 kg/kg	0.0188 kg/kg
TR	0.00599 kg/s	0.0104 kg/s	0.0144 kg/s	0.0129 kg/s	0.0225 kg/s	0.0311 kg/s
t	12 min	7 min	5 min	6 min	3 min	2 min

Denne tørkeprosessen krever en gjennomsnittlig energimengde på 83 kJ (GDT(max)) og 123 kJ (GDT(min)) når varmpumpen er stilt inn på 40 °C, og 159 kJ (GDT(max)) og 253 kJ (GDT(min)).

5.2. Drivhustørking

5.2.1. Naturlig ventilering

Verdiene for temperaturen inne i drivhusrommet ved naturlig ventilering gir en gjennomsnittlig økning på 15.25 °C til 18.61 °C avhengig av dekkmateriale.

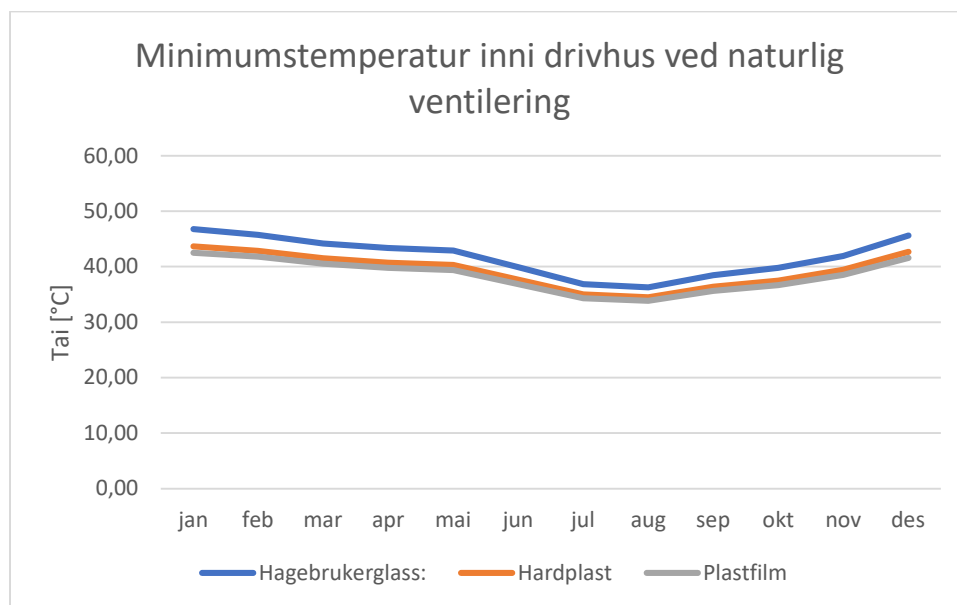
Gjennomsnittsverdien for de ulike dekkmaterialene det er beregnet for er fremstilt i tabell 8.

Hagebrukerglass gir den største temperaturøkningen på 18.61 °C og dermed den høyeste temperaturen i drivhusrommet.

Tabell 8: Gjennomsnittlig temperaturøkning mellom omgivelsene og drivhusrommet ved ulike dekkmateriale og naturlig ventilering.

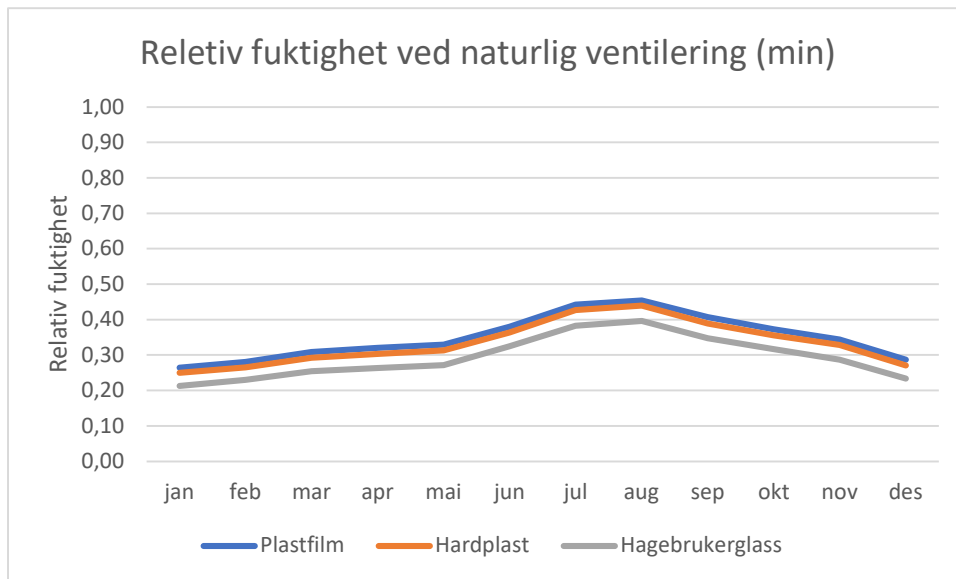
Dekkmateriale	$T_r - T_a$ [°C]
Hagebrukerglass	18.61
Hardplast	16.15
Plastfilm	15.25

Dette gir en temperatur i drivhusrommet på mellom 33.87 °C og 46.77 °C basert på den GDT(min) vist i figur 16.



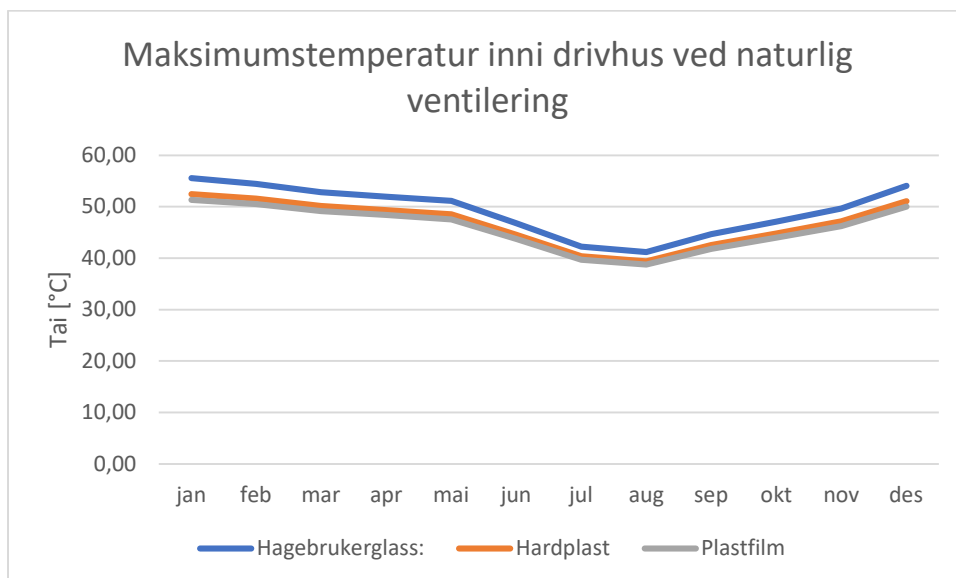
Figur 16: Viser beregnet minimumstemperatur inni drivhusrommet ved bruk av formel (9) og tre ulike dekkmaterialer. Drivhuset er naturlig ventilert.

Den relative fuktigheten i drivhusrommet ved naturlig ventilering ligger basert på GDT (min) mellom 21 og 45 %, vist i figur 17. Hvor de høyeste verdiene er for plastfilm og de laveste for hagebrukerglass. Det er en nedgang i relativ fuktighet for drivhus med hagebrukerglass på gjennomsnittlig 53 % basert på GDT(min). Den absolutte fuktigheten ved GTD(min) er i gjennomsnitt på 0.0147 kg/kg tørr luft for hagebrukerglass, 0.15 kg/kg tørr luft for hardplast og 0.0146 kg/kg tørr luft for plastfilm.



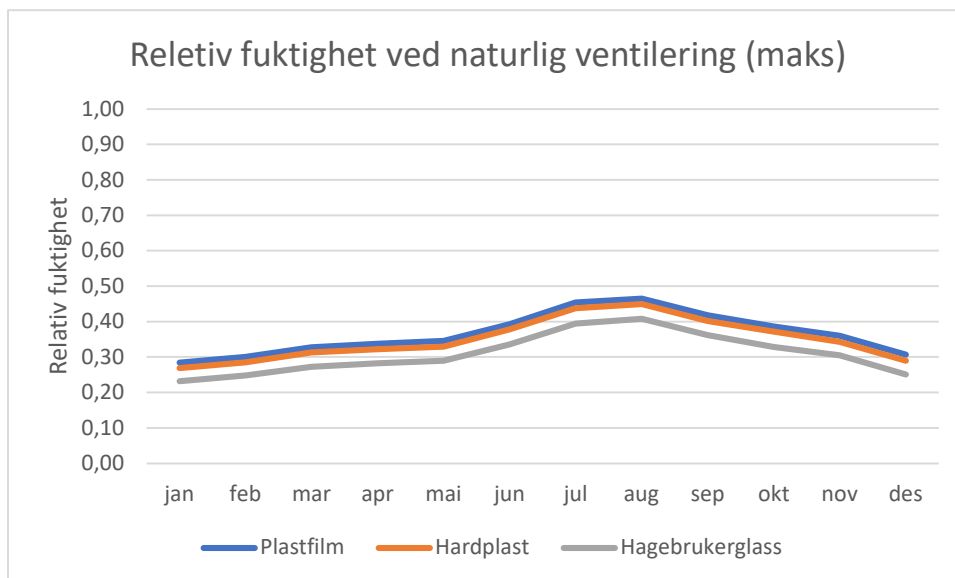
Figur 17: Gir den relative fuktigheten ved naturligventilert drivhus beregnet fra likning (4).

Temperaturen i drivhusrommet ved naturlig ventilering basert på GDT(maks) ligger mellom 38,77 °C og 55,57 °C og er vist i figur 18.



Figur 18: Viser beregnet maksimumstemperatur inni drivhusrommet ved bruk av formel (9) og tre ulike dekkmaterialer. Drivhuset er naturlig ventilert.

Den relative fuktigheten i drivhusrommet basert på GDT(maks) er vist i figur 19 og gir en relativ fuktighet på mellom 23 og 47 %. Den laveste relative fuktigheten er i januar. Den absolutte fuktigheten ved GDT (maks) er 0.0229 kg/kg tørr luft ved hagebrukerglass, 0.0227 kg/kg tørr luft ved hardplast og 0.0231 kg/kg tørr luft ved plastfilm

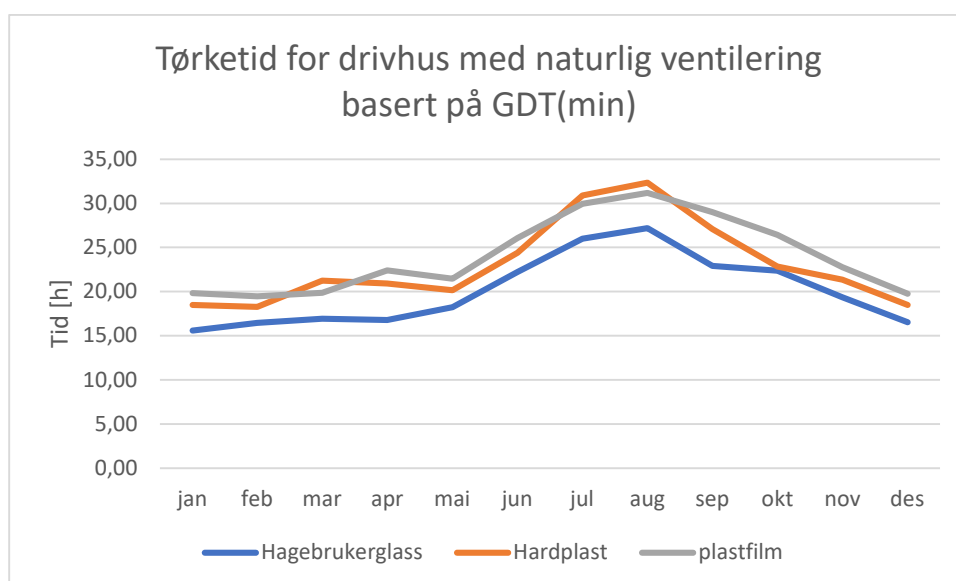


Figur 19: Viser den relative fuktigheten ved naturlig ventilering basert på GDT (maks) ved tre ulike dekkglass..

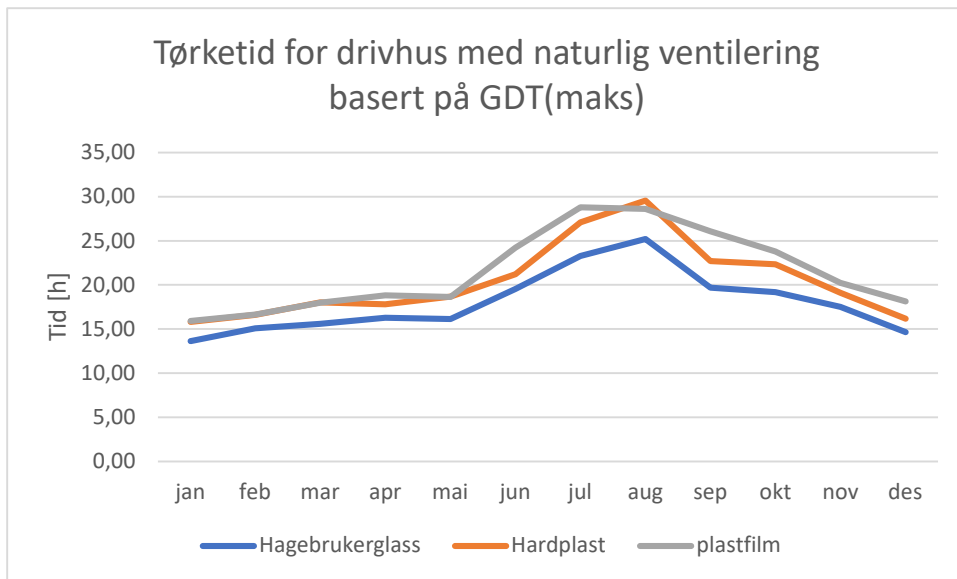
Tørketiden ved naturlig ventilering er fremstilt i figur 20 og 21, og baserer seg på tørkeraten som er presentert i gjennomsnittlig verdi i løpet av året i tabell 9 og en mengde kakaobønner som skal tørkes på 430 kg.

Tabell 9: Gir gjennomsnittlig tørkerate i løpet av et år for naturlig ventilert drivhus.

Basert på	Hagebrukerglass	Hardplast	Plastfilm
GDT (maks)	0.0030 kg/s	0.0026 kg/s	0.0025 kg/s
GDT (min)	0.0026 kg/s	0.0023 kg/s	0.0022 kg/s



Figur 20: Viser tørketiden beregnet for naturlig ventilert drivhus med tre ulike dekkmaterialer.

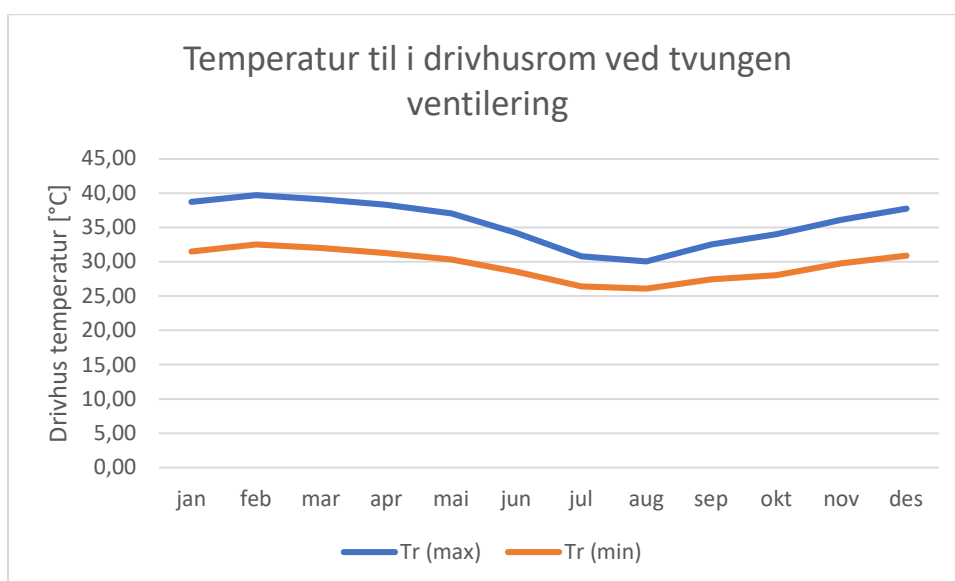


Figur 21: Viser tørketiden beregnet for naturlig ventilert drivhus med tre ulike dekkmaterialer.

Energi i tørkeprosessen er beregnet til å ha en gjennomsnittsverdi i løpet av året på 24 MJ for hagebrukerglass, 21 MJ for hardplast og 20 MJ for plastfilm. Månedlig oversikt er gitt i vedlegg 7.

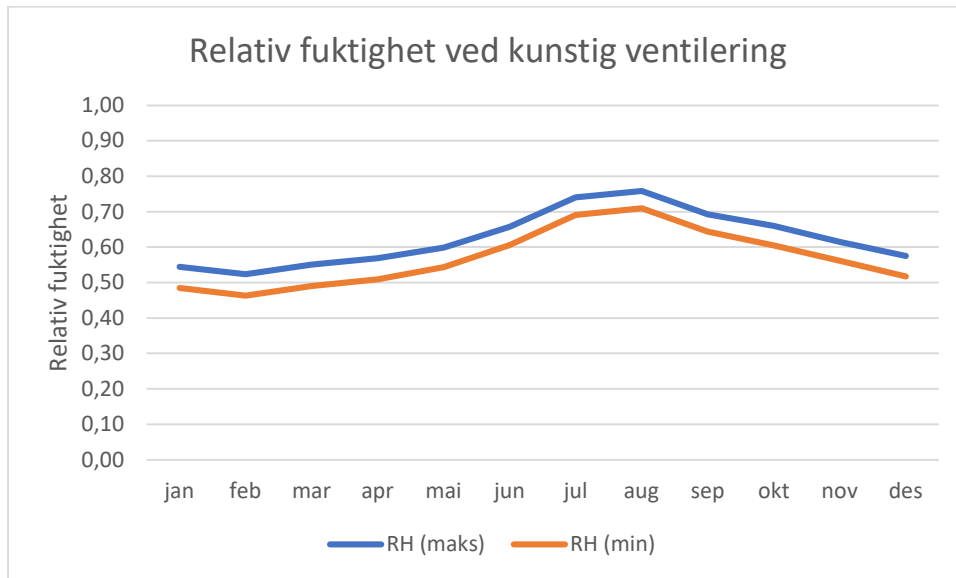
5.2.2. Kunstig ventilering

Temperaturen i drivhusrommet ved kunstig ventilering er vist i figur 22 og ligger mellom 30.05 °C og 39.72 °C basert på den GDT(maks) og mellom 26.08 °C og 31.48 °C basert på den GDT(min). Dette gir en gjennomsnittlig temperaturøkning på 5.68 °C.



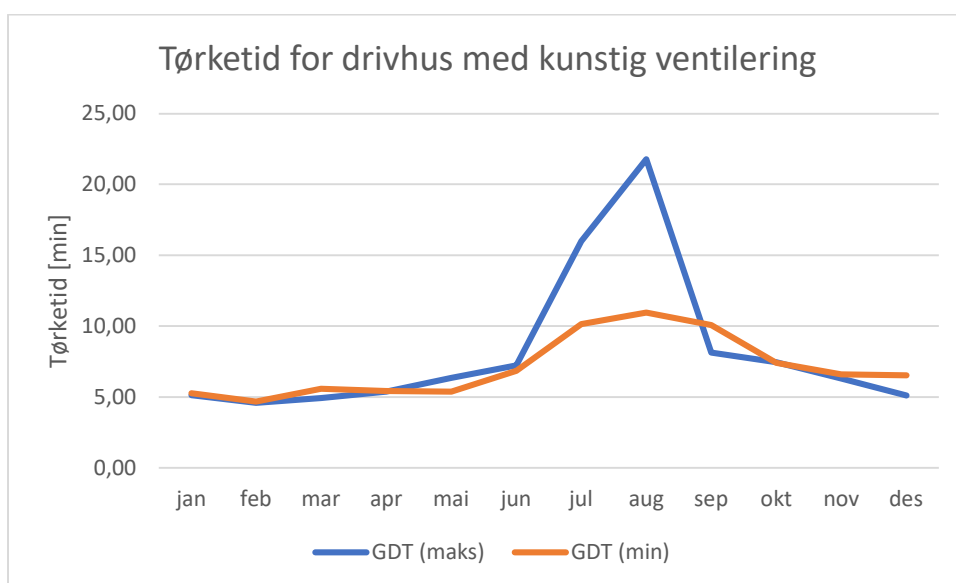
Figur 22: Viser beregnet temperatur i drivhusrommet ved kunstig ventilering med vifte som gir 5 m/s luftstrøm.

Den relative fuktigheten i drivhusrommet ved tvungen ventilering er redusert med 10-30 % sammenlignet med den relative fuktigheten i omgivelsene. Figur 23 viser utviklingen til den relative fuktigheten i drivhusrommet ved tvungen ventilering basert på GDT (min) og GDT(maks). Den absolute fuktigheten ved denne tørkemethoden er mellom 0.014 og 0.024 kg/kg tørr luft.



Figur 23: Viser den relative fuktigheten i drivhusrommet ved tvungen ventilering.

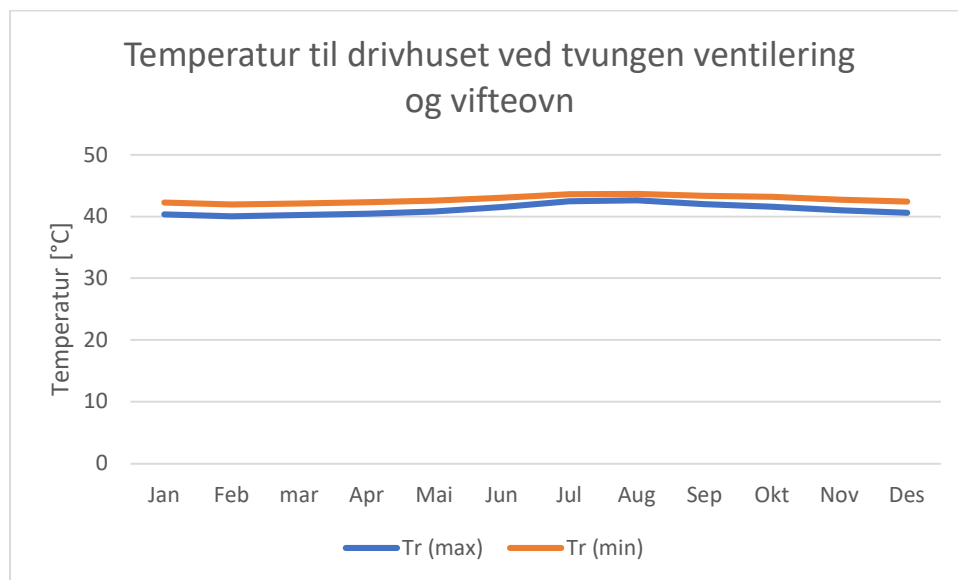
Den beregnede tørketiden til kakaobønner fra et fuktighetsnivå på 50 % til 7 % i drivhus med kunstig ventilering er vist i figur 24. Denne er beregnet fra en gjennomsnittlig årlig tørkerate på 0.00163 kg/s basert på GDT (maks) og 0.00164 kg/s basert på GDT (min) og en antagelse om 1.5 kg kakaobønner som skal tørkes.



Figur 24: Tørketid oppgitt i minutter for drivhus med kunstig ventilering.

Denne tørkemethoden krever en energimengde på gjennomsnittlig 66 kJ (GDT(maks)) og 68 (GDT(min)). Månedlig oversikt er gitt ved vedlegg 7.

Temperaturen i drivhusrommet ved kunstig ventilering og en 9 kW vifteovn (vist i figur 25) har en økning på 7.2-14.9 °C basert på daglig maksimumstemperatur og 17.8-20.9 °C basert på daglig minimumstemperatur sammenlignet med omgivelsestemperaturen. Med en elektrisk vifteovn som blåser varmluft på 40 °C inn i drivhusrommet vil temperaturen ikke gå under 40 °C. Ut ifra beregningene vil temperaturen ikke overstige 60 °C.



Figur 25: Viser temperatur i drivhuset ved tvunget ventilering og vifteovn beregnet fra formel (26).

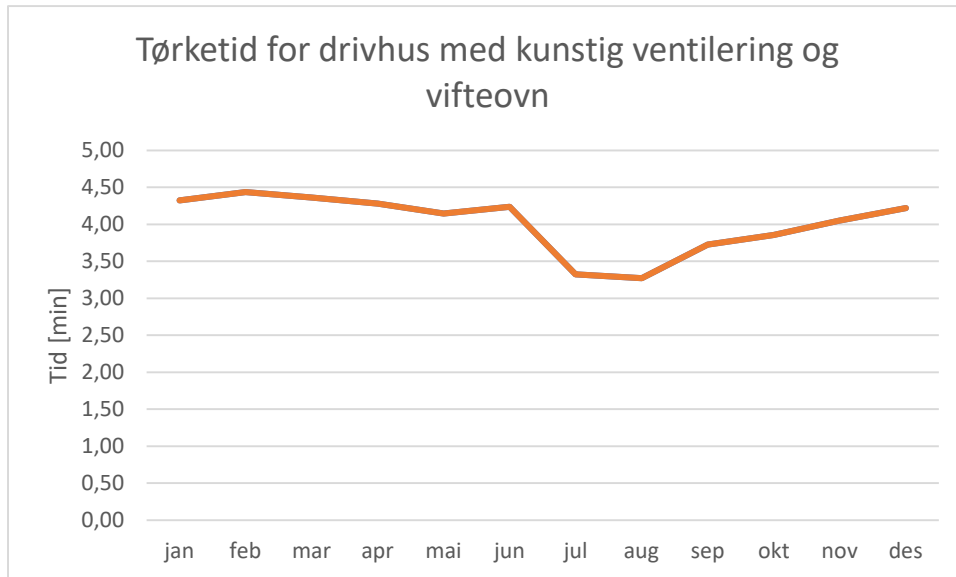
Fuktighet ved drivhustørking med kunstig ventilering og vifteovn er gitt i gjennomsnittsverdi i tabell 10. Månedlig oversikt over relativ fuktighet er gitt i vedlegg 5.

Tabell 10: Gir den gjennomsnittlige relative- (RH) og absolutte fuktigheten (AH) ved tørking i drivhus med tvungen ventilering og vifteovn.

Basert på	RH	AH
GDT (maks)	46 %	27%
GDT (min)	0.0226 kg/kg tørr luft	0.0152 kg/kg tørrluft

Denne metoden for drivhustørking har en beregnet tørkerate på gjennomsnittlig 0.0027 kg/s (GDT(maks)) og 0.0040 kg/s (GDT(MIN)). Tørketiden basert på den beregnede tørkeraten og

mengden kakaobønner antatt til 1.5 kg som skal tørkes er gitt ved figur 26. Det er beregnet at metoden krever en energimengde på 65 kJ (GDT(maks)) og 77 kJ (GDT(min)).



Figur 26: viser beregnet tørketid for kakaobønner i drivhus med kunstig ventilering og varmluftsovn.

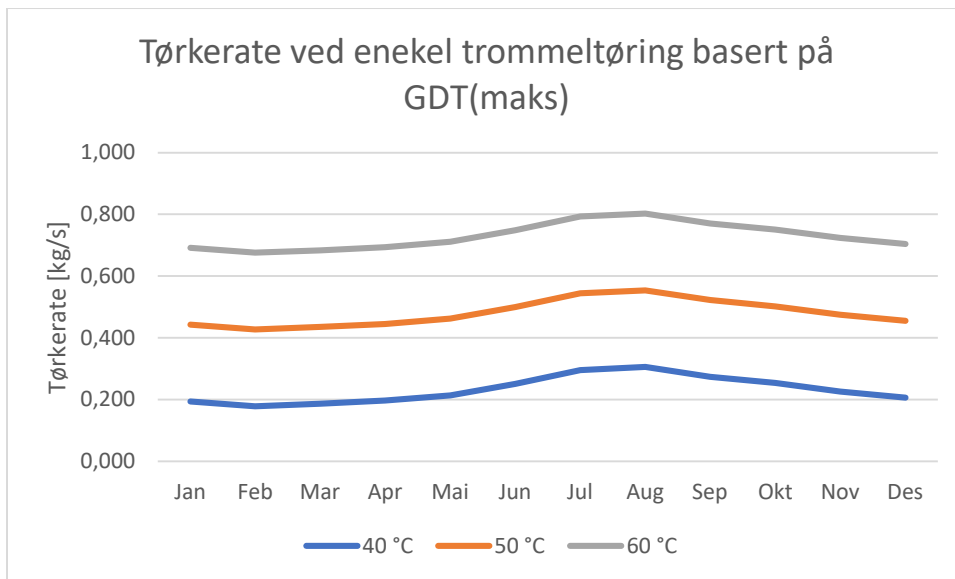
5.3. Trommeltørking

Resultatene fra beregningene av enkel trommeltørking av kakaobønner ved de tre ulike overflatetemperaturene er presentert i tabell 11 og figur 27 og 28. Den høyeste tørkeraten (opp mot 0.8 kg/s) og den korteste tiden (7-9 s) er beregnet ved en overflatetemperatur på 60 °C.

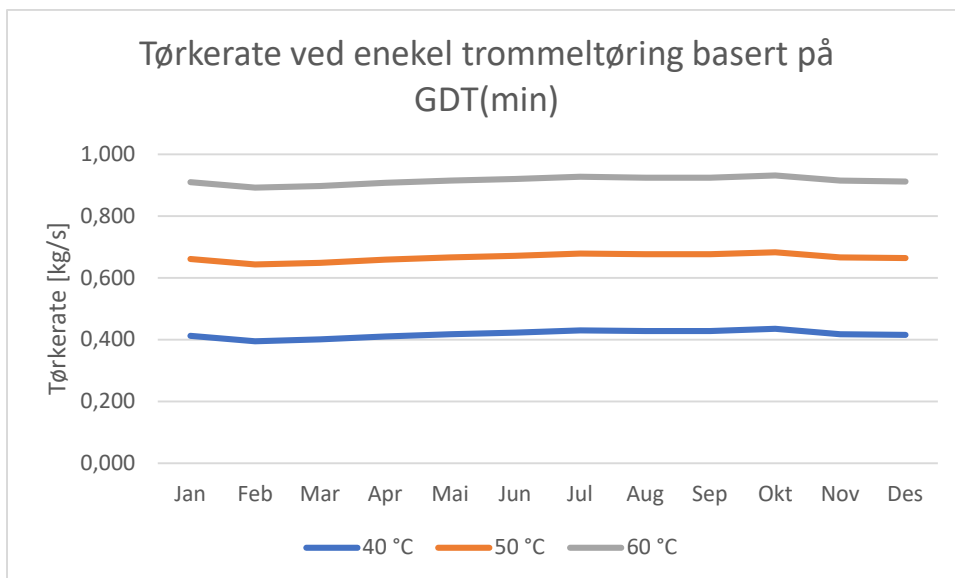
Denne tørketiden er beregnet ut ifra en vannmasse på 6.3 kg som skal tørkes.

Tabell 11: Gir varmeoverføringsrate Q , tørkerate TR og tørketid t ved enkel trommeltørking av kakaobønner.

	40°C	50°C	60°C
Q (GDT (maks))	523.1 J/s	1084.1 J/s	1645.1 J/s
Q (GDT(min))	942.5 J/s	1503.5 J/s	2064.5 J/s
TR (GDT (maks))	0.232 kg/s	0.480 kg/s	0.729 kg/s
TR (GDT (maks))	0.418 kg/s	0.666 kg/s	0.915 kg/s
t (GDT (maks))	28 s	13 s	9 s
t (GDT(min))	15 s	10 s	7 s



Figur 27: Gir tørkeraten ved enkel trommeltøring av kakaobønner ved tre ulike overflatetemperaturer.



Figur 28: Gir tørkeraten ved enkel trommeltøring av kakaobønner ved tre ulike overflatetemperaturer.

6. Diskusjon:

Oppgaven har fokus på hvordan de klimatiske forholdene i Sørvest-Kamerun (nærmer bestemt Matouke) påvirker tørkeprosessen. Det er valgt å se på gjennomsnittlig månedlige verdier og hvordan disse vil påvirke forholdene i tørkeprosessen. I tillegg er det vært et fokus på ulike tørkemetoder, og det er derfor valgt å ta både konduktive og konvektive tørkemetoder som eksempler.

6.1. Tørkekvalitet:

De faktorene som kommer frem i litteraturen som viktige for de tørkede kakaobønnenes kvalitet stemmer godt med de faktorene som kjøperne av kakaobønner i Kamerun oppgir. Det som påvirker disse faktorene er hovedsakelig temperatur, og oppgaven har derfor størst fokus på dette. Ut ifra tidligere forsøk det er sett på i oppgaven vil en temperatur mellom 40 og 50 °C gi en god kvalitet. Tørkemethodene som beregnes på som eksempler tar derfor utgangspunkt i dette. Det er tydelig i litteraturen av kakaobønnene ikke bør tørkes på mer enn 60 °C.

Det fremkommer ikke tydelig hvor lang tørketid som gir god kvalitet på kakaobønnene. Dette er fordi tiden vil variere med fuktighetsinnholdet. Fuktighetsinnholdet til kakaobønnene påvirkes av fermenteringsprosessen og behandlingen fra høsting til tørking. Det er likevel valgt å regne på dette for eksemplene på tørkemetoder.

Vannaktiviteten ble i oppgaven beregnet til å være 1 etter fermentering når fuktighetsinnholdet er antatt å være 50 % (våtbasis). For å unngå uønsket aktivitet på kakaobønnene vil det være fordelaktig å starte tørkeprosessen raskt etter fermenteringsprosessen er ferdig. Etter tørking skal kakaobønnene ha et fuktighetsnivå på omtrent 7 % (våt basis). Det er beregnet til at de da vil ha en vannaktivitet på 0.49. Dette er på et nivå hvor bakterier, gjærevekst, soppvekst og mikrobiologisk aktivitet blir hemmet. Dette aktivitetsnivået stemmer godt med annen forskning som er gjort hvor vannaktivitetsnivået er bestemt til mellom 0.465 og 0.569 ved 40-60 °C [46]. Det kan antas at ved tørking ned til 7 % tørkes det kun i periode for konstant tørkehastighet. Dette med bakgrunn i en BET enlagsverdi på omtrent 7 %.

Spredningsevnen til vann og syre i kakaobønnen ved 50 % fuktighet (våt basis) er tilnærmet like gitt ved figur 14. Mens spredningsevnen for vann og syre ved 7 % fuktighet gitt ved figur 15 har en forskjell på mellom 6.04×10^{-7} og 3.83×10^{-6} m²/s. Denne forskjellen øker med økt temperatur.

Det var vanskelig å finne klimadata fra ønsket område i Kamerun fra forskningsbaserte kilder. Klimadata som er oppgitt i oppgaven er hentet fra nettsider, og hvor korrekt denne dataen er noe usikkert. Det er derfor gjort en jobb med å sammenligne data fra flere ulike kilder for å sikre troverdighet. Klimadataene kan likevel gi en feilkilde i beregninger basert på disse. I mangel på klimadata fra Matouke er det brukt data fra Muyuka og Douala. Douala ligger 43 km unna Matouke og det kan derfor være en variasjon i klima, spesielt med tanke på at Douala ligger ved kysten.

Det er oppgitt fra bøndene at det tar lenger tid å tørke kakaobønnene mellom mars og august. Dette kan ha en sammenheng med at perioden inneholder måneder med mye nedbør og høy luftfuktighet. Med en relativ luftfuktighet på rundt 80 % i Sørvest-Kamerun hele året er det ønskelig å få ned denne i en tørkeprosess. Ved å stenge av tørkeprosessen vil det være mulig å øke metningsnivået for damptrykket og dermed senke den relative fuktigheten. Når det regnes på luftfuktighet i tørkerommene i oppgaven er det sett bort i fra den fuktigheten som tilføres luften fra kakaobønnene. Ved stor luftsirkulasjon i tørkerommet vil fuktigheten blir sirkulert ut til omgivelsene. Ved bruk av varmpumpe vil luften i tørkerommet avfuktes i fordampere. For naturlig ventilering vil fuktighetsnivået i tørkerommet være høyere enn beregnet i oppgaven som følge av tilført fuktighet fra kakaobønnene..

I beregning med kunstig ventilering fra vifte er det beregnet med en stor luftsirkulasjon på 5 m/s. Dette fører til at grensebarrieren mellom kakaobønneoverflaten og omgivelsene minsker, og tørkeraten øker. I figur 22 fremkommer det at temperaturen i drivhusrommet minsker med omtrent 10 °C. Denne nedgangen i temperaturen vil minske tørkeraten som kan ses ved sammenligning av beregningene mellom naturlig- og ventilert luftsirkulasjon. Den høye luftsirkulasjonen påvirker nedgangen.

6.2. Tørkemetoder:

I dag brukes vedfyring som tørkemetode i landsbyene i Sørvest-Kamerun. Dette er en kunstig tørkemetode som fører til produktsvinn. Det er derimot mulig å anvende andre kunstige tørkemetoder og bruke strømmen fra solcelleanlegget til SunErgy og dermed unngå røykforurensing av kakaobønnene som ved vedfyring eller fossilt brensel. Dette ville sannsynligvis i tillegg gi en jevnere og mer kontrollerbar temperatur. Ulempen med kunstig tørking er at den ofte er mer kostbar, noe som vil være lite gunstig for å hjelpe bøndene ut av fattigdom. Forskning viser at denne typen metoder ofte gir for høy temperatur og for hurtig tørking.

Tørking av kakaobønnene ved hjelp av solenergi er en miljøvennlig og relativ rimelig tørkemetode. Åpen tørking ute kan føre til forurensing fra miljøet rundt og dermed produktsvinn. Det er i tillegg en væravhengig metode og dataene figur 3 viser at det regner fra 5 til 30 dager i måneden i Douala i Kamerun. Temperaturen i dette området ligger fra figur 2 i gjennomsnitt på mellom 23 og 30°C, noe som er lavere enn den ønskede temperaturen for tørking av kakaobønner. Figur 4 gir en varierende solinnstråling for Matouke, mellom 107.3 og 185.5 kWh/m². Dette gir mellom 386 og 668 MJ/m². Ved tørking av 500 kg kakaobønner er behov for et område på 17 m² og en energimengde på 525.4 MJ. Ved solinnstrålingen i Matouke vil et areal på 17 m² gi en energimengde på omtrent 7174 MJ. For å kunne benytte denne solenergien, men unngå produktsvinn og øke temperaturen tar oppgaven for seg tørking i drivhus, tørking med varmepumpe og enkel trommeltørker. De to sistnevnte får energi fra solcelleanlegget i landsbyen. Ved tørking i lukkede tørkerom blir kakaobønnene beskyttet mot vær og ulike typer forurensing. På grunn av drivhuseffektem vil det i tillegg ved drivhustørking oppnås en høyere temperatur inne i drivhuset enn omgivelsene.

6.2.1. Varmepumpe:

I det teoretiske grunnlaget kommer det frem at det regner minimum 5 og maksimum 30 dager i måneden i Sørvest-Kamerun. Dette gjør at en tørkemetode som er uavhengig av været er gunstig. Tørkekammeret i denne tørkemethoden er isolert og fra beregningene er det svært lite varmetap gjennom veggene sammenlignet med drivhus. Dette gjør det mulig å holde en stabil temperatur i tørkekammeret uavhengig av vær. Varmepumpe gjør det i tillegg mulig å kontrollere temperatur og luftstrøm. En annen fordel er at den fjerner fuktighet gjennom å sirkulere luften inn igjen i varmepumpen. Tabell 7 gir en relativ luftfuktighet i rommet på 40 % ved 40 °C og 24 % ved 50 °C. Det er ikke medregnet fuktfjerning fra varmepumpen i disse verdiene. Men den relative fuktigheten er allerede på et nivå som er ønskelig i en tørkeprosess.

I eksempelet er det antatt en mengde med kakaobønner på 10 kg. Dette sammen med en lufthastighet på 1-3 m/s gjør at det beregnes en relativ kort tørketid. Tørketiden er fra tabell 7 beregnet til 5-12 minutter ved 40 °C og 2-6 minutter ved 50 °C. Ved å minske lufthastigheten og tørke av større mengder vil tørketiden øke. Problemer som kan oppstå ved hurtig tørking som uttørket overflate på kakaobønnene, høyt syreinnhold og porøsitet vil da unngås. Lav relativ fuktighet og kontrollerbar temperatur og vindhastighet gir et godt utgangspunkt for å oppnå optimale tørkeforhold. Siden tørkemethoden ikke utnytter solenergi direkte, vil den ha et eksternt energibehov. Ved tørking av 10 kg kakaobønner kreves det

gjennomsnittlig 123-153 kJ, dette energibehovet kan dekkes av solcelleanlegget i Matouke som er oppgitt å produsere 650 kWh per dag. Det er ikke gitt informasjon om forbruket til landsbyen og dermed tilgjengelig overskuddsenergi fra dette solcelleanlegget.

6.2.2. Drivhustørking:

Drivhus med hagebrukerglass gir størst temperaturøkning til drivhusrommet. Ved naturlig ventilering er temperaturen i drivhusrommet basert på den GDT(maks) gitt av figur 18 beregnet til å ligge over 40 °C hele året. Temperaturen er her ikke beregnet til å overstige 60 °C. Temperaturen i drivhusrommet basert på den GDT(min) gitt ved figur 16 er bare beregnet til å ligge over 40 °C fra og med november til og med mai. Kakaobønnene tørkes som nevnt i den teoretiske bakgrunnen fra april til februar. Temperaturen her overstiger heller ikke 60 °C. For drivhus dekket med plastfilm, som har minst temperaturøkning mellom omgivelsestemperaturen og drivhusrommet, er det beregnet at temperaturen til drivhusrommet basert på den GDT(min) bare er over 40 °C i fire av månedene i året.

Den GDT(min) antas å være temperatur nattetid. Ved åpen tørking ute får kakaobønnene en naturlig hvile nattetid der fuktigheten i cotyledon kan transporteres ut til testaen for lettere fordamping. Temperaturen må likevel ikke være så lav at det oppstår rehydrering av fuktighet fra omgivelsene. Spesielt siden omgivelsene har en høy relativ luftfuktighet er det viktig å kontrollere forholdene for å unngå rehydrering. Det er ønskelig med en så optimal tørkemetode som mulig og dette vil medføre at kakaobønnene vil rehydrere raskere. Forskning viser at varierende fuktighet ikke har noen negativ innvirkning på kvaliteten til de tørkede kakaobønnene. I drivhus med naturlig ventilering blir ikke luftsirkulasjonen påvirket og ved dårlig sirkulasjon kan den fordampede fuktigheten fra kakaobønnene bli værende i drivhusrommet og som nevnt tidligere i diskusjonen øke den relative fuktigheten. Økt relativ fuktighet fører til at fuktigheten fjernes tregere fra kakaobønnene.

Den beregnede temperaturen i drivhusrommet ved kunstig ventilering er beregnet med plastfilm, som nevnt tidligere gav dette dekkmaterialet minst temperaturøkning av de beregnede dekkmaterialene. Ved kunstig ventilering har den beregnede temperaturen i drivhusrommet en økning på 5.68 °C, som er lavere enn økningen på 15.25 °C som ble beregnet ved plastfilm som dekkmateriale og naturlig ventilering. Ved kunstig ventilering er den beregnede temperaturen til drivhusrommet gitt ved figur 22 under 40 °C hele året, både temperaturen beregnet basert på den GDT(min) og GDT(maks). Selv med denne lave temperaturøkningen er den relative fuktigheten ved de laveste temperaturene redusert med 10-

30 %. Det kan i tillegg antas at fuktigheten fordampet fra kakaobønnene transporteres ut av drivhuset av viften.

Ved å sette inn en vifteovn som blåser varmluft på 40 °C, forhindrer man at temperaturen går under 40 °C som vises i figur 25. Flere artikler konkluderer med tørking av kakaobønner på temperaturer rundt 40 °C gir en god kvalitet på de tørkede kakaobønnene [35, 43]. Den GDT(min) øker med 17.8-20.9 °C i drivhusrommet og hindrer rehydrering nattestid.

Det er ikke beregnet på drivhusdekket med isolerende og/eller reflekterende nordvegg. Kamerun ligger nærme ekvator som medfører at solen er høyt på himmelen og at sidene av drivhuset som er vendt mot nord og sør blir belyst like mye. Man kan tenke seg at det hadde vært mulig å isolere både sør- og nordveggen, men ville da mistet diffusstråling gjennom disse. Det er ikke sett nærmere eller beregnet på om dette lønner seg i oppgaven.

Relativ luftfuktighet ved drivhustørking og kunstig ventilering er beregnet til å ligge mellom 48 og 76 %. Dette er den av de beregnede tørkemethodene som gir høyest verdi på relativ luftfuktighet i tørkerommet, og tørkeluften vil ha en dårligere kapasitet til å fjerne fuktighet fra kakaobønnene. Denne høye verdien kommer av den lave drivhustemperaturen som igjen kommer av den høye lufthastigheten og sirkulering med omgivelsesluften. Den høye relative fuktigheten til omgivelsen vil i tillegg påvirke den relative fuktigheten i drivhusrommet ved høy sirkulasjon mellom seg.

Den relative luftfuktigheten ved naturlig ventilert drivhus er lavere (21-47 %), men her er det som nevnt tidligere ikke medregnet fuktigheten tilført fra fordamping av kakaobønnene. Ved naturlig ventilering kan det derfor tenkes at det hadde vært mulig å sette inn en avfukter for å forhindre for høy relativ fuktighet. Dette er det ikke beregnet på i oppgaven.

6.2.3. Enkel trommeltørker:

Dette er en tørkemethode som nevnt i det teoretiske grunnlaget oftest brukes til produkter med slam konsistent. Kakaobønnene har ikke denne konsistensen, men de kan være klistrete etter fermenteringen på grunn av rester fra fruktmassen rundt kakaobønnene og konstant blanding vil være nyttig her. Blandingen kan derimot føre til skade på kakaobønnene, spesielt ved høye temperaturer hvor kakaobønnene kan bli skjøre. Det er ikke beregnet på relativ fuktighet i denne tørkemethoden eller temperaturen inni trommelen siden det er en konduksjonsmetode hvor fokuset i tørkeprosessen er varmeoverføring gjennom varmeoverflaten. Det kan antas at temperaturen i trommelen vil øke ved konduksjon mellom trommeloverflaten og luften inni trommelen fordi det er antatt at kun 75 % av trommelens overflate dekkes av kakaobønner.

Samt varmeoverføring fra kakaobønnene til luften inni trommelen. Økt temperatur i trommelrommet vil gi en lavere relativ fuktighet.

6.3. Tørketid:

Tørketiden til de ulike tørkemethodene er beregnet ut ifra tørkerate og mengde kakaobønner i tørkeren. Det er antatt ulike mengder kakaobønner ved de ulike metodene med bakgrunn i ulik antatt kapasitet til tørkerene. Ved sammenligning av den beregnede tørketiden må derfor dette hensyntas. Dette er med på å forklare hvorfor drivhus med naturlig ventilering gir en tørketid på 13-30 timer mens drivhus med kunstig ventilering gir en tørketid på 5-20 minutter. Det er beregnet en tørkemengde på 430 kg ved naturlig ventilering og en tørkemengde på 1.5 kg ved kunstig ventilering. Andre forsøk oppgir en tørketid på 6-19 timer ved ulike tørkemethoder som soltørking, ovnstørking og tørking på elektrisk brett på 40-80 °C. Det oppgir i tillegg en tørkerate på 0.079-0.005 g/h [47, 48], som er svært lav sammenlignet med tørkeratene beregnet i oppgaven.

Ved beregning av tørkerate og tørketiden til kunstig ventilering gir verdiene for august spesielt store avvik, se figur 24. Dette skyldes at grafen som brukes for å lese av våttemperatur er svært vanskelig å lese av ved lave temperaturer og høy relativ luftfuktighet. Dette har ført til at tørr- og våttemperaturer ligger svært nære hverandre. Det bør ses bort i fra denne verdien.

Tørkeraten ved enkel trommeltørking er beregnet til å være ekstremt høy, noe som gir en usannsynlig lav tørketid. Ut ifra den beregnede spredningsevnen til vann og syre vil ikke væsken fra den indre delen av kakaobønner rekke å bevege seg ut til overflaten på den beregnede tiden. Som nevnt brukes denne metoden ofte til å tørke produkter med slam lignende konsistens og det er ikke tatt hensyn til bevegelse av væske gjennom kakaobønner ved beregning. Det vil derfor antas at denne tørketiden er mye høyere i virkeligheten.

6.4. Andre feilkilder:

Det er ikke gjort forsøk i forbindelse med oppgaven. Til beregninger er alle verdier hentet fra litteratur. Dette er bakgrunnen til at det er betydelig størrelsesforskjell på drivhusene det er beregnet på når det gjelder naturlig og kunstig ventilering. Disse størrelsesforskjellene kan føre til en mulig feilkilde når drivhusene sammenlignes. Flere av verdiene som inngår i beregningene har vært svært vanskelig å finne fra litteratur. Dette medfører at verdiene som er brukt ikke alltid er helt nøyaktig eller oppgitt for kakaobønner spesifikt. Dette ses på som en mulig feilkilde.

Siden det ikke er gjort noe forsøk i forbindelse med oppgaven er det ikke mulig å si hvordan farge og smak vil bli påvirket av eksemplene på tørkeprosesser.

6.5. Anbefalinger videre:

Videre i prosjektet kan det ses på flere tørkeprosesser. Det finnes mange varianter av de samme tørkeprosessene og variabler man kan variere på. Det er i tillegg mulig å gjøre forsøk på tørking av kakaobønner basert på teorigrunlaget som fremkommer i oppgaven. Dette vil gjøre at man får verdier som er spesifisert for nøyaktig den prosessen man ser på og feilmarginen vil dermed minske. Det er vanskelig å beregne nøyaktig når man henter alle verdier fra tidligere forsøk.

7. Konklusjon:

Tørking av kakaobønner ned til et fuktighetsnivå på 7 % gir en vannaktivitet på 0.49 som hemmer uønsket aktivitet fra bakterier, gjærevekst, soppvekst og mikrobiologi. For en optimal tørkeprosess bør man kunne kontrollere tørketemperaturen, luftstrømmens hastighet og relativ fuktighet. Det er ikke ønskelig med for hurtig tørking som oppstår ved høy lufthastighet og temperatur. Dette vil føre til at overflaten tørker ut før den indre delen og gir en skjør kakaobønne med høyt syreinnhold. Etter hvert som fuktighetsinnholdet synker, vil syren i kakaobønnen få en dårligere spredningsevne.

Klimaet i Sørvest-Kamerun gjør at tørking av kakaobønner bør gjøres med en metode som øker temperaturen og reduserer den relative luftfuktigheten. Dette gjøres enklest i en avlukket tørkeprosess. En avlukket tørkeprosess vil i tillegg hindre forurensing. Drivhustørking med naturlig ventilering gir en ønsket tørketemperatur, men ved lite luftsirkulasjon kan det oppstå høy relativ luftfuktighet på grunn av fordamping av vann fra kakaobønner. Ved bruk av denne tørkemethoden bør det brukes hagebrukerglass som dekkmateriale. Drivhustørking med kunstig ventilering gir temperatur under ønsket tørketemperatur og en høy relativ fuktighet. Vifteovn med en kontrollerbar temperatur kan settes inn for å øke tørketemperaturen. Drivhustørking er væravhengig og med den store nedbørsmengden er det ikke fordelaktig for denne metoden. Tørketemperaturen ved drivhustørking kan bare påvirkes hvis det settes inn apparater med kunstig varmeoverføring.

Enkel trommeltørker gir kontrollerbar overflatetemperatur, men kan lett ødelegge kakaobønnen spesielt hvis de får porøs tekstur ved hurtig tørking. Dette er en tørkemethode som ikke blir omtalt mye i tidligere forskning, og på grunn av spredningsevnen til vann og syre i kakaobønnen vil passe bedre til tørking av andre produkter.

Tørkemethoden som består av systemet varmepumpe og tørkekammer er ikke væravhengig, og både tørketemperatur og hastighet på luftstrømmen kan kontrolleres og justeres etter ønske. Ut ifra resultatene i oppgaven bør lufthastigheten ved denne tørkemethoden settes til under 1 m/s og temperaturen til 40 °C. Ved bruk av et større tørkekammer enn antatt i oppgaven kan mengde kakaobønner som tørkes økes. Ut ifra tørkemethodene det er sett på i oppgaven anbefales det å se videre på denne typen tørkemethode for tørking av kakaobønner fra Sørvest-Kamerun.

8. Litteraturliste:

1. Houhou, H., W. Yuan, and G. Wang, *Simulation of Solar Heat Pump Dryer Directly Driven by Photovoltaic Panels*. Earth and Environmental Science, 2017. **63**.
2. Hii, C.L., C.L. Law, and S. Suzannah, *Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying*. Journal of Food Engineering, 2012. **108**: p. 276-282.
3. Kakao. 2018 24.06 [cited 2019 23.09.19.]; Available from: <https://snl.no/kakao>.
4. Sjokolade. 2018: Store norske leksikon.
5. NOU 2019:8, *Særvgifter på sjokolade- og sukkervarer og alkoholfrie drikkevarer*. 2019; Available from: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2019-8/id2640964/sec12>.
6. Kyi, T.M., et al., *The kinetics of polyphenol degradation during the drying of Malaysian cocoa beans*. International Journal of Food Science & Technology, 2005. **40**: p. 323-331.
7. Chinenye, N.M., A.S. Ogunlowo, and O.J. Olukunle, *COCOA BEAN (Theobroma cacao L.) DRYING KINETICS*. CHILEAN JOURNAL OF AGRICULTURAL RESEARCH, 2010. **70**(4): p. 633-639.
8. SunErgy. 2019 23.09.19.]; Available from: <https://sunergypower.org/>.
9. GoogleMaps. *Matouke*. 2019 07.10.19.]; Available from: https://earth.google.com/web/@4.28716516,9.46715856,41.99994711a,46505.79600577d,35y_332.34336323h,0t,0r.
10. WMO. *Douala*. 2019 07.10.19.]; Available from: <http://worldweather.wmo.int/en/city.html?cityId=1513>.
11. *Matouke*. 2017, Photovoltaic Geographical Information System.
12. Weatherbase. *Muyuka, Cameroon*. 2019 07.12.19.]; Available from: <https://www.weatherbase.com/weather/weather.php3?s=600414&cityname=Muyuka-South-West-Province>.
13. WorldWeatherClimateInformation. *Climate and average monthly weather in Douala, Cameroon*. 2019 07.10.19.]; Available from: <https://weather-and-climate.com/average-monthly-Rainfall-Temperature-Sunshine,douala,Cameroon>.
14. Fellows, P.J., *Food Processing, principles and practice*. Third ed. 2009: Woodhead publishing.
15. Barrientos, L.D.P., et al., *Effect of the solar drying process on the sensory and chemical quality of cocoa (Theobroma cacao L.) cultivated in Antioquia, Colombia*. Food Research International, 2019. **115**: p. 259-267.
16. Fowler, M.S., *Industrial Chocolate Manufacture and Use*. Fourth edition ed. 2009: Blackwell Publishing.
17. Bonaparte, A., et al., *Some Quality Characteristics of Solar-Dried Cocoa Beans in St Lucia*. J Sci Food Agric, 1998. **76**: p. 553-558.
18. Deus, V.L., et al., *Influence of drying methods on cocoa (Theobroma cacao L.): antioxidant activity and presence of ochratoxin A*. Food Sci. Technol, 2018. **38**(1): p. 278-285.
19. Garcí'a-Alamilla, P., et al., *Moisture, acidity and temperature evolution during cacao drying*. Journal of Food Engineering, 2007. **79**: p. 1159-1164.
20. de Oliveira, G.H.H., et al., *Evaluation of thermodynamic properties using GAB model to describe the desorption process of cocoa beans*. Food Science & Technology, 2011. **46**: p. 2077-2084.
21. Edvardsen, K.I. and T. Ramstad, *Håndbok 53: Trehus*. 9 ed. 2010: SINTEF Byggforsk.
22. Bøgh-Sørensen, L., et al., *Konserverings teknikk 2*. 1986: DSR Forlag.
23. Hii, C.L., C.L. Law, and M. Cloke, *Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa*. Journal of Food Engineering, 2009. **90**: p. 191-198.
24. Hii, C.L., et al., *Improving Malaysian cocoa quality through the use of dehumidified air under mild drying conditions*. J Sci Food Agric, 2011. **91**: p. 239-246.
25. Dina, S.F., et al., *Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans*. Case Studies in Thermal Engineering, 2015. **5**: p. 32-40.

26. Hashim, P., et al., *Effect of drying time, bean depth and temperature on free amino acid, peptide-N, sugar and pyrazine concentrations of Malaysian cocoa beans*. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1999. **79**: p. 987-994.
27. Waheed, M.A. and C.A. Komolafe, *Temperatures dependent drying kinetics of cocoa beans varieties in air-ventilated oven*. Frontiers in Heat and Mass Transfer, 2019. **12**(8).
28. Sangamithra, A., et al., *An overview of a polyhouse dryer*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **40**: p. 902-910.
29. Borgnakke, C. and R. Sonntag, *Fundamentals of Thermodynamics*. Eighth ed. 2014: Wiley.
30. Musa, N.A., *Drying Characteristics of Cocoa Beans Using an Artificial Dryer*. Journal of Engineering and Applied Sciences, 2012. **7**(2): p. 194-197.
31. Fudholi, A., et al., *Review of solar drying systems with air based solar collectors in Malaysia*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **51**: p. 1191-1204.
32. Hii, C.L., C.L. Law, and M. Cloke, *MODELLING OF THIN LAYER DRYING KINETICS OF COCOA BEANS DURING ARTIFICIAL AND NATURAL DRYING*. Journal of Engineering Science and Technology, 2008. **3**(1): p. 1-10.
33. Hii, C.L., C.L. Law, and M.C. Law, *Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying conditions in a heat pump dryer*. Applied Thermal Engineering, 2013. **54**: p. 264-271.
34. Rodriguez-Campos, J., et al., *Effect of fermentation time and drying temperature on volatile compounds in cocoa*. Food Chemistry, 2012. **132**: p. 277-288.
35. Herman, C., et al., *Convective drying of fermented Amazonian cocoa beans (Theobroma cacao var. Forasteiro). Experiments and mathematical modeling*. Food and Bioprocess Technology, 2018. **108**: p. 81-94.
36. Gutiérrez, T.J., *State-of-the-Art Chocolate Manufacture: A review*. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2017. **16**(6): p. 1313-1344.
37. Chauhan, P.S. and A. Kumar, *Thermal analysis of insulated north-wall greenhouse with solar collector under passive mode*. International Journal of Sustainable Energy, 2018. **37**(4): p. 325-339.
38. Prakash, O. and A. Kumar, *Solar greenhouse drying: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **29**: p. 905-910.
39. Chauhana, P.S., A. Kumara, and B. Guptac, *A review on thermal models for greenhouse dryers*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **75**: p. 548-558.
40. Jain, D. and G.N. Tiwari, *Effect of greenhouse on crop drying under natural and forced convection II. Thermal modeling and experimental validation*. Energy Conversion and Management 2004. **45**: p. 2777-2793.
41. Mensmoudi, K., A. Soudani, and P.E. Bournet, *Determination of the inside air temperature of a greenhouse with tomato crop under hot and arid climates*. Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation, 2010. **5**(2): p. 117-129.
42. Guehi, T.S., et al., *Performance of different drying methods and their effects on the chemical quality attributes of raw cocoa material*. International Journal of Food Science & Technology, 2010. **45**: p. 1564-1571.
43. Faborode, M.O., J.F. Favierh, and O.A. Ajayi, *On the Effects of Forced Air Drying on Cocoa Quality*. Journal of Food Engineering, 1995. **25**: p. 455-472.
44. Afoakwa, E.O., et al., *Flavor Formation and Character in Cocoa and Chocolate: A Critical Review*. Food Science and Nutrition, 2008. **48**: p. 840-857.
45. Páramo, D., et al., *Mass transfer of water and volatile fatty acids in cocoa beans during drying*. Journal of Food Engineering, 2010. **99**: p. 276-283.
46. Mujaffar, S., A. Ramroop, and D.c. Sukha, *Thin layer drying behaviour of fermented cocoa (Theobroma cacao L.) beans* International Drying Symposium, 2018. **21**: p. 595-602.
47. Onwuka, U.N. and G. Nwachukwu, *GRAIN SIZE AND HEAT SOURCE EFFECT ON THE DRYING PROFILE OF COCOA BEANS* Nigerian Journal of Technology 2013. **32**(3): p. 417-423.

48. Nwakuba, N.R., P.K. Ejesu, and V.C. Okafor, *A mathematical model for predicting the drying rate of cocoa bean (Theobroma cacao L.) in a hot air dryer*. *AgricEngInt*, 2017. **19**(3): p. 195-202.

Vedlegg 1:

Likninger brukt til beregning av verdier ved naturlig ventilert drivhus [41]:

$$h = a + bU_e$$

$$G = \frac{WU_e + v_0}{A_g}$$

$$W = 0.5 A_l C_d C_w^{0.5}$$

$$\alpha = (1 - \varepsilon)$$

$$\beta = \left(A_d b + \rho C_p \frac{W}{A_g} \right)$$

$$\gamma = \left(a A_d + \rho C_p \frac{v_0}{A_g} \right)$$

h	Varmeoverføringskoeffisient [W/m ² K]
A _g	Areal til grunnen [m ²]
A _d	Areal til dekket [m ²]
U _e	Utvendig vindhastighet [m/s]
v ₀	Ventilasjonsrate [m/s]
A _l	Arealet til lekkasje [m ²]
C _w	Vindeffekt koeffisient [J/kg K]
G	Ventilasjonsrate [m ³ /s]
C _d	Utladnings koeffisient [J/kg K]
C _p	Spesifikk varmekapasitet til luft [J/kg K]
ρ	Tettheten til luft [m ³ /kg]

Vedlegg 2:

Likninger brukt til beregning av verdier ved kunstig ventilert drivhus [40]:

$$I_{eff\ G} = (1 - F_n)(1 - F_c)\alpha_g \sum I_i A_i \tau_i$$

$$I_{eff\ R} = (1 - F_n)(1 - F_c)(1 - \alpha_g) \sum I_i A_i \tau_i$$

$$H_g = \left[1 + \frac{h_{g\infty} A_g}{h_{gr}(A_g - A_c)} \right]^{-1}$$

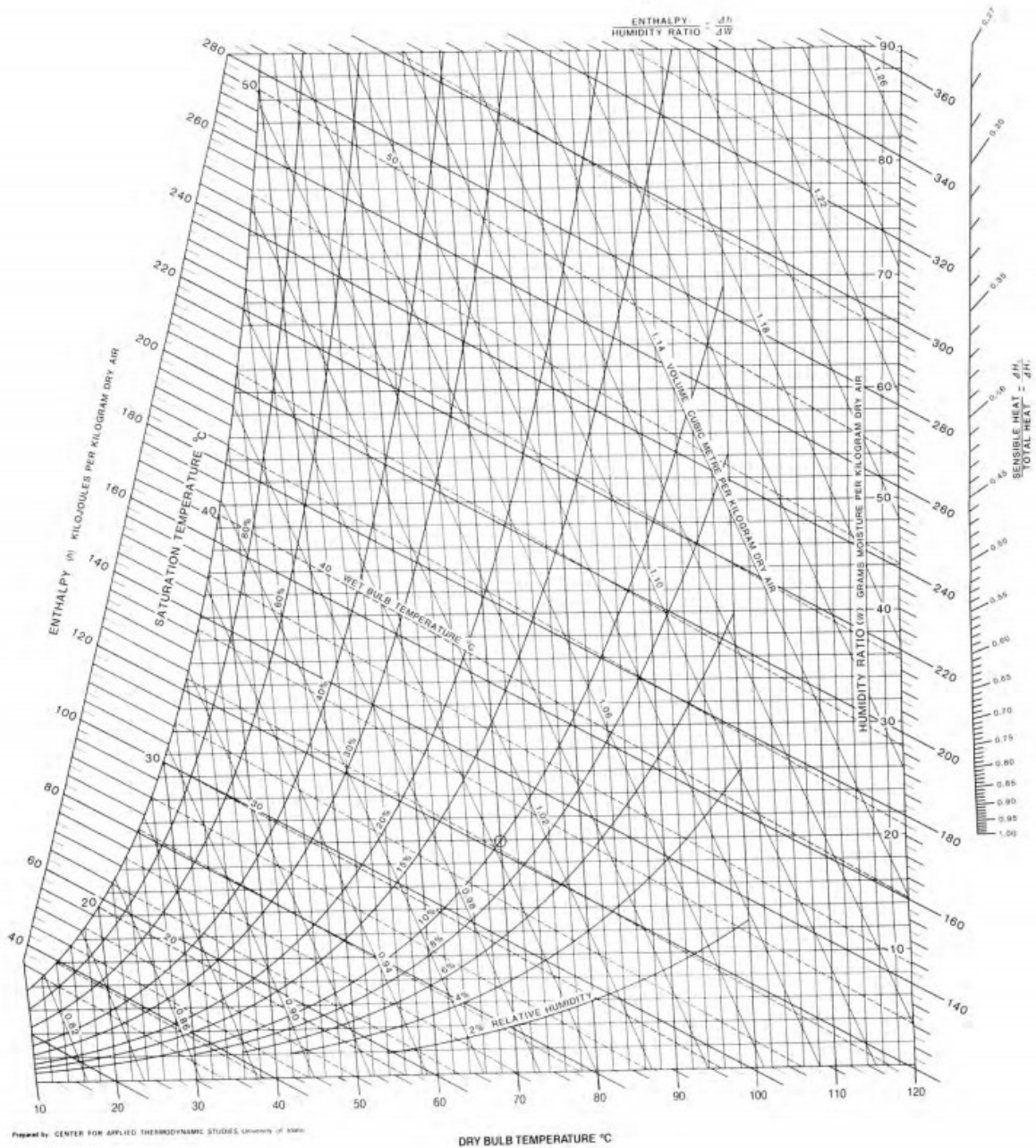
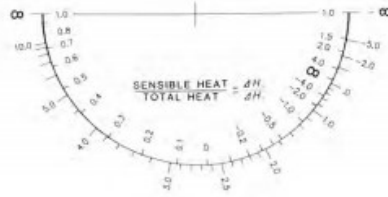
$$P(T) = e^{\left(25.31 - \frac{5144}{T_i} \right)}$$

h_{gr}	Varmetransport koeffisient mellom drivhusgulvet og drivhusrommet [W/m ² K]
$I_{eff\ G}$	Solintensitet på drivhusgulvet [W/m ²]
$I_{eff\ R}$	Solintensitet på drivhusrommet [W/m ²]
F_c	Solinnstråling på kakaobønnene [W/m ²]
α_g	Absorpsjon til drivhusgulvet
F_n	Solinnstråling på vegg mot nord [W/m ²]
I_i	Solintensitet på drivhusdekket [w/m ²]
τ_i	Transmisjonen til drivhusdekket
A_i	Areal til drivhusdekket [m ²]
h_{gr}	Varmetransport koeffisient mellom drivhusgulvet og drivhusrommet [W/m ² K]
$h_{g\infty}$	Varmetransport koeffisient mellom drivhusgulvet og grunnen [W/m ² K]
A_g	Arealet til drivhusgulvet [m ²]
A_c	Arealet til kakaobønnene [m ²]
$P(T)$	Partial damptrykk ved temperatur T [N/m ²]
T_i	Gjennomsnittlig temperatur til kakaobønnene og fuktig luft [K]

Vedlegg 3:

Grafen er hentet fra figur 16.1 i *Food, principles and practice* [14].

ASHRAE PSYCHROMETRIC CHART NO. 3
HIGH TEMPERATURE 10°C to 120°C SEA LEVEL
BAROMETRIC PRESSURE 101,325 kPa
COPYRIGHT 1992 ASHRAE



Prepared by: CENTER FOR APPLIED THERMODYNAMIC STUDIES, University of Idaho

DRY BULB TEMPERATURE °C

Vedlegg 4:

Utdrag fra tabell B.1 i *Fundamentals of Thermodynamics* [29].

Temperatur: [°C]	Mettet vanntrykk: [kPa]
20	2.339
25	3.169
30	4.246
35	5.628
40	7.384
45	9.593
50	12.350
55	15.758
60	19.941

Vedlegg 5: Relativ fuktighet

Omgivelsene	Naturlig ventilert drivhus						Kunstig ventilert drivhus				Varmepumpe		
	Plastfilm		Hardplast		Hagebrukerglass				Vifteovn		40°C	50°C	
	RH (maks)	RH (min)	RH (maks)	RH (min)	RH (maks)	RH (min)	RH (maks)	RH (min)	RH (maks)	RH (min)			
jan	77,7	0,28	0,27	0,27	0,25	0,23	0,21	0,54	0,48	0,50	0,27	0,40	0,24
feb	76,0	0,30	0,28	0,28	0,27	0,25	0,23	0,52	0,46	0,51	0,28	0,41	0,25
mar	78,7	0,33	0,31	0,31	0,29	0,27	0,25	0,55	0,49	0,52	0,28	0,42	0,25
apr	80,0	0,34	0,32	0,32	0,30	0,28	0,26	0,57	0,51	0,51	0,28	0,41	0,25
mai	82,0	0,35	0,33	0,33	0,31	0,29	0,27	0,60	0,54	0,49	0,28	0,41	0,25
jun	84,0	0,39	0,38	0,38	0,36	0,34	0,32	0,66	0,61	0,44	0,27	0,40	0,24
jul	86,1	0,45	0,44	0,44	0,43	0,39	0,38	0,74	0,69	0,39	0,27	0,38	0,23
aug	86,2	0,47	0,45	0,45	0,44	0,41	0,40	0,76	0,71	0,38	0,27	0,38	0,23
sep	84,8	0,42	0,41	0,40	0,39	0,36	0,35	0,69	0,64	0,41	0,27	0,39	0,23
okt	84,0	0,39	0,37	0,37	0,36	0,33	0,32	0,66	0,60	0,44	0,26	0,39	0,24
nov	82,2	0,36	0,34	0,34	0,33	0,30	0,29	0,61	0,56	0,47	0,27	0,40	0,25
des	80,4	0,31	0,29	0,29	0,27	0,25	0,23	0,57	0,52	0,50	0,27	0,41	0,25

Vedlegg 6: Tørkerate [kg/s]

	Naturlig ventilert drivhus						Kunstig ventilert drivhus			
	Plastfilm		Hardplast		Hagebrukerglass				Vifteovn	
	TR (maks)	TR (min)	TR (maks)	TR (min)	TR (maks)	TR (min)	TR (maks)	TR (min)	TR (maks)	TR (min)
Jan	0,0032	0,0026	0,0032	0,0028	0,0038	0,0033	0,0021	0,0020	0,0025	0,0039
Feb	0,0031	0,0026	0,0031	0,0028	0,0034	0,0031	0,0023	0,0023	0,0024	0,0038
Mar	0,0029	0,0026	0,0029	0,0024	0,0033	0,0030	0,0022	0,0019	0,0025	0,0039
Apr	0,0027	0,0023	0,0029	0,0025	0,0032	0,0031	0,0020	0,0020	0,0025	0,0039
Mai	0,0028	0,0024	0,0028	0,0026	0,0032	0,0028	0,0017	0,0020	0,0026	0,0037
Jun	0,0021	0,0020	0,0024	0,0021	0,0026	0,0023	0,0015	0,0016	0,0025	0,0041
Jul	0,0018	0,0017	0,0019	0,0017	0,0022	0,0020	0,0007	0,0011	0,0032	0,0040
Aug	0,0018	0,0016	0,0017	0,0016	0,0020	0,0019	0,0005	0,0010	0,0033	0,0040
Sep	0,0020	0,0018	0,0023	0,0019	0,0026	0,0022	0,0013	0,0011	0,0029	0,0039
Okt	0,0022	0,0019	0,0023	0,0022	0,0027	0,0023	0,0014	0,0015	0,0028	0,0041
Nov	0,0025	0,0023	0,0027	0,0024	0,0029	0,0027	0,0017	0,0016	0,0027	0,0040
Des	0,0028	0,0026	0,0032	0,0028	0,0035	0,0031	0,0021	0,0016	0,0025	0,0039

Varmepumpe					
40°C			50°C		
TR (1 m/s)	TR (2 m/s)	TR (3 m/s)	TR (1 m/s)	TR (2 m/s)	TR (3 m/s)
0,00584	0,01017	0,01407	0,01285	0,02237	0,03094

Vedlegg 7: Energi som kreves av tørkeprosessene

	Naturlig ventilert drivhus [MJ]			Kunstig ventilert drivhus [kJ]				Varmepumpe [kJ]			
	Plastfilm	Hardplast	Hagebrukerglass			Vifteovn		40°C		50°C	
	Q	Q	Q	Q (maks)	Q (min)	Q (maks)	Q (min)	Q (maks)	Q (min)	Q (maks)	Q (min)
Jan	24,6	26,0	30,0	83,0	85,0	75,4	89,0	91,3	137,5	139,3	250,6
Feb	22,8	24,1	27,7	78,1	80,0	69,5	83,0	92,7	138,2	131,7	241,7
Mar	21,4	22,7	26,1	73,5	75,4	66,5	79,9	90,8	135,8	135,5	244,3
Apr	21,0	22,2	25,5	71,6	73,6	66,1	79,4	88,9	134,1	140,6	249,3
Mai	20,8	22,0	25,3	70,5	72,3	67,0	79,8	86,3	129,5	149,4	253,1
Jun	17,9	18,9	21,7	59,8	61,4	62,2	72,9	79,5	116,1	168,4	255,6
Jul	15,1	15,9	18,3	49,2	50,5	58,2	66,6	71,9	100,7	191,2	259,4
Aug	14,4	15,2	17,5	46,8	48,0	57,3	64,9	70,3	96,5	196,2	258,2
Sep	16,6	17,6	20,2	55,0	56,4	60,6	70,2	75,7	108,7	179,8	258,2
Okt	18,3	19,4	22,3	61,0	62,7	63,5	74,8	79,2	117,9	169,7	262,0
Nov	19,8	20,9	24,1	66,7	68,5	65,3	77,2	84,0	124,7	155,8	253,1
Des	23,6	24,9	28,7	79,2	81,1	73,5	86,6	88,9	133,1	145,7	251,8



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway