

# PASSIVA KYLSYSTEM I TROPISKT KLIMAT

Högskoleingenjörsutbildning i Energi

Abdel Azez Haggo  
Ali Jafar  
Tarek Hassan

**Program:** Energiingenjör

**Svensk titel:** Passiva kylsystem i tropiskt klimat

**Engelsk titel:** Passive cooling systems in tropical climates

**Utgivningsår:** 2025

**Författare:** Ali Jafar, Abdel Azez Haggo, Tarek Hassan

**Handledare:** Michael Johansson

**Examinator:** Abas Mohsenzadeh

**Nyckelord:** Passiv kylning, tropiskt klimat, Hållbarhet, Livsmedellagring

---

## Sammanfattning

Efterfrågan på hållbara och energieffektiva kyllosningar har ökat markant, särskilt i tropiska klimat där traditionella kylmetoder ofta är opraktiska på grund av hög energiförbrukning och bristande infrastruktur. Denna studie undersöker passiva kylsystem som möjliga alternativ och utvärderar deras effektivitet i att bevara livsmedel, med fokus på miljöpåverkan och hållbarhet.

Flera passiva kyltekniker har analyserats, däribland direkt och indirekt evaporativ kylning, fasförändringsmaterial (PCM), strålningskylning samt jordbaserade lösningar såsom Zero Energy Cool Chambers (ZECC) och Modified Earthen Pot Cool Chambers (EPCC). Studien inkluderar även en jämförande analys mellan aktiva och passiva kylmetoder, med betoning på deras respektive styrkor och svagheter.

Genom en kombination av experimentella studier och fallanalyser kunde EPCC- och ZECC-systemen påvisa kapacitet att sänka lagringstemperaturen med upp till 10 °C, samtidigt som optimal luftfuktighet bibehölls för att motverka förruttelse. PCM-baserade system levererade stabil kylning i över 96 timmar, medan strålningskylning visade potential för nattlig värmeavledning. Jordbaserade alternativ, som rotkällare, höll temperaturer mellan 12–14 °C, vilket visade sig fungera väl för längre lagringsperioder.

Resultaten understryker att passiva kylmetoder är både kostnadseffektiva och miljövänliga, särskilt lämpade för områden med begränsad tillgång till elektricitet. Studien föreslår vidare utveckling av hybrida system som integrerar förnybar energi och anpassningsbar design. Framtida forskning bör fokusera på materialoptimering, storskalig tillämpning och integrering av dessa tekniker i hållbarhetsstrategier för att stödja energibesparing och livsmedelssäkerhet.

## **Abstract**

The demand for sustainable and energy-efficient cooling solutions has increased significantly, particularly in tropical climates where conventional refrigeration methods are often impractical due to high energy consumption and limited infrastructure. This study investigates passive cooling systems as potential alternatives and evaluates their effectiveness in preserving food, with a focus on environmental impact and sustainability.

Several passive cooling technologies are analyzed, including direct and indirect evaporative cooling, phase change materials (PCM), radiative cooling, and earth-based systems such as Zero Energy Cool Chambers (ZECC) and Modified Earthen Pot Cool Chambers (EPCC). The study also presents a comparative analysis between active and passive cooling methods, emphasizing their respective strengths and weaknesses.

Through a combination of experimental studies and case analyses, the EPCC and ZECC systems demonstrated the ability to reduce storage temperatures by up to 10 °C while maintaining optimal humidity conditions to prevent spoilage. PCM-based systems provided stable cooling effects for over 96 hours, whereas radiative cooling showed potential for nighttime heat dissipation. Earth-based storage methods, such as root cellars, maintained temperatures between 12–14 °C, proving effective for longer-term food preservation.

The results highlight that passive cooling methods are both cost-effective and environmentally friendly, making them particularly suitable for regions with limited access to electricity. The study recommends further development of hybrid systems that integrate renewable energy and adaptive design. Future research should focus on optimizing material selection, evaluating large-scale applications, and integrating these techniques into broader sustainability strategies to promote energy savings and food security.

## Innehållsförteckning

<b>FÖRORD.....</b>	<b>V</b>
<b>1. INLEDNING.....</b>	<b>1</b>
1.1 Passiv kylning.....	2
1.2 Aktiv kylning.....	2
<b>2. METOD OCH PROBLEMSTÄLLNING.....</b>	<b>2</b>
<b>3. TEORI.....</b>	<b>3</b>
3.1 Teknisk jämförelse mellan passiv och aktiv kylning.....	3
3.1.1 Fördelar och nackdelar.....	4
3.1.2 Beräkning av kylbehovet i ett fruktrum.....	5
3.2 Evaporativ kylning.....	5
3.2.1 Passiv direkt evaporativ kylning.....	6
3.2.2 Aktiv direkt evaporativ kylning.....	7
3.2.3 Indirekt och två steg evaporativ kylning.....	7
3.3 Innovative composite wall designs for evaporatively cooled structures for storage of perishables	26
3.4 Framväxande passiva kyltekniker och deras tvärvetenskapliga tillämpningar.....	27
3.4.1 Radiativ kylning.....	29
3.4.2 Fasändringsmaterial.....	29
3.5 Jordkällare.....	8
3.5.1 De avgörande faktorerna.....	8
3.6 Cellulosabaserad strålningskylning och solvärme Drivkraft för joniska termoelektriska material	28
3.7 En värme och masstransportmodell av lerkrukors evaporativa kylare för grönsakslagring.....	23
3.8 Lågenergikylrum (ZECC).....	11
3.9 Zero Energy Cool Chamber for Shelf-Life Extension of Tomato and Eggplant	Error! Bookmark not defined.
3.10 Modified Earthen pot Cool Chamber.....	15
3.11 Rejuvenation of Traditional Pottery making by applying Advanced Biotechniques.....	11
3.12 Cooling blanket.....	13
3.13 Utvärdering av lågkostnadskylningstekniker för förbättrad grönsakslagring i Mali.....	14
<b>4. RESULTAT.....</b>	<b>13</b>
4.1 Temperatur och energiberäkningar för kylsystem.....	30
4.2 Experimentella resultat för konstruktioner.....	30

<b>4.3</b>	<b>Resultat från jordkällare.....</b>	<b>31</b>
<b>4.4</b>	<b>Temperaturdata från cellulosa och radiativ kylning.....</b>	<b>31</b>
<b>4.5</b>	<b>Modellresultat för lerkrukor, EPCC.....</b>	<b>31</b>
<b>4.6</b>	<b>Förvarningsdata för ZECC, PCM-system och evaporativ kylning.....</b>	<b>32</b>
<b>4.7</b>	<b>Jämförelse av passiva kyltekniker.....</b>	<b>34</b>
<b>4.8</b>	<b>Beräkning av kylkapacitet i ZECC-system.....</b>	<b>35</b>
<b>5.</b>	<b>DISKUSSION .....</b>	<b>36</b>
<b>5.1</b>	<b>Implementering i större skala.....</b>	<b>36</b>
<b>5.2</b>	<b>Återkoppling till syfte och frågeställningar.....</b>	<b>37</b>
<b>6.</b>	<b>SLUTSATS .....</b>	<b>39</b>
<b>7.</b>	<b>REFERENSER .....</b>	<b>40</b>

# FÖRORD

Detta examenarbete har redovisats muntligt för en ämneskunnig publik och därefter varit föremål för diskussion vid särskilt seminarium. Författaren har även delaktigt som opponenter på annat examenarbete under samma tillfälle. Kursen omfattar 15 högskolepoäng och genomfördes under vårterminen 2025 i Högskolan i Borås.

Ett stort tack till vår handledare Michael Johansson, för visat stöd och engagemang.

Ett tack till Högskolan i Borås som har gjort detta arbete möjligt och hjälpt till med att ta fram handlingar.

Borås 2025

Ali Jafar

Abdel Azez Haggo

Tarek Hassan

## **Förkortningar**

Earthen Pot Cool Chamber	EPCC
Physiological loss weight	PLW
Heating, Ventilation, and Air Conditioning	HVAC
Basic model Earthenware storage system	EWSS1
Modified Earthenware storage system	EWSS2
Pyramid type Earthenware storage system	EWSS3
Relative Luftfuktighet	RH
Evaporativ kylning	EC
Phase Change Material	PCM
Stålningskylning	RC
Photovoltaic	PV
Zero energy cool chamber	ZECC
Passive Cooling Blanket	PCB
Termiska energilagringssystem	TEC
Mesh Supported Fabric	MSF
Pervious Concrete	PC
Autoclaved Aerated Concrete	ACC

## Nomenklatur

Variabel	Definition
$T_1$	Innertemperaturen
$T_{ab}$	Omgivning temperaturer
$T_{wb}$	Teoretisk lägsta uppnåeliga temperaturen
$T_{ini}$	Initial temperature
$T_{db}$	Dry bulb temperature
$\eta$	Verkningsgrad
$E_{ec,fr}$	Energy needed to achieve temperature reduction in the fruit by evaporative cooling
$E_{Lat}$	Latent heat
$cp_{,fr}$	Specific heat capacity of the fruit
$m_{fr}$	The fruit mass
$L_v^{ref}$	Latent heat of vaporization of water at a reference temperature
$\rho_i$	Densitet för delsektion $i$
$V_i$	Volym för delsektion $i$
$c_{v,i}$	Specifik värmekapacitet för delsektion $i$
$T_i$	Temperatur för delsektion $i$
$\dot{N}_{evap,i}$	Molärt avdunstningsflöde från yta $i$
$A_{evap,i}$	Area för avdunstningsyta $i$
$a$	Skalfaktor av daggpunkten

$CC$

Molntäcke

$T_{\infty}$

Omgivningstemperatur

# 1. INLEDNING

Tropiska klimat som i Colombia är kända för sina höga och ofta konstanta temperaturer, vilket gör effektiv kylning avgörande för att säkerställa livsmedelsbevaring, komfort i byggnader och hållbarhet i olika system. I detta klimat blir användning av energiintensiva mekaniska kylsystem både dyrt och mindre hållbart på lång sikt. Passiv kylning har fått ett ökat intresse för att hantera överhettning och bevara livsmedel utan elanvändning (Rio Jon 2024).

Kylning har alltid varit avgörande för människors livskvalitet, särskilt när det gäller förvaring av mat och livsmedel. I en värld med en växande befolkning ökar efterfrågan på mat, vilket gör det än viktigare att förvara den på ett effektivt och resurssnålt sätt. Genom att använda kylning kan vi förlänga matens hållbarhet och säkerställa att den behåller sin kvalitet och säkerhet under längre tid.

För grönsaker, kött och andra livsmedel är kylning en nödvändighet, då den har stor betydelse för både matens kvalitet och säkerhet. Flera faktorer såsom smak, näringsinnehåll och bakteriehalt är nära kopplade till den temperatur vid vilken maten förvaras. Vid en närmare granskning av just bakteriehalten framgår det att risken för bakterietillväxt är som störst vid högre temperaturer. Bakterier på livsmedel växer främst i temperaturintervallet +20 till +40 °C, men de kan även föröka sig vid temperaturer mellan +8 och +60 °C (Härryda kommun 2020).

För att uppnå dessa fördelar har kylskåpet utvecklats som en teknologisk lösning för att effektivt bevara livsmedel. År 1922 uppfann Baltzar von Platen och Carl Munters ett kylskåp som ett gemensamt examensarbete vid Kungliga Tekniska Högskolan (Johnson 2024). Dagens kylskåp består av flera huvudkomponenter som tillsammans utgör en teknisk process vars syfte är att avlägsna värme från kylskåpet. De viktigaste komponenterna är kompressor, kondensor, förångare och expansionsventil.

Kylprocessen inleds i kompressorn, som drivs av en elmotor. Där ökas köldmediets (ammoniak) tryck och temperatur innan det i gasform leds vidare till kondensorn. I kondensorn omvandlas köldmediet till vätskeform och förs vidare till expansionsventilen. Där sänks trycket och temperaturen kraftigt innan köldmediet leds till förångaren, där det återgår till gasform och skickas tillbaka till kompressorn för att upprepa processen. (BrenntagNordic 2025)

Hela denna process kräver elektricitet för att driva kompressorn. I vissa situationer, där el är otillgänglig, uppstår därför ett behov av alternativa kylmetoder såsom passiv kylning. Det är detta som denna studie fokuserar på. I Colombia saknar vissa hushålltillgång till elektricitet för att driva ett kylskåp, och arbetet undersöker metoder för att kunna kyla livsmedel utan att vara beroende av el med hjälp av passiv kylning.

# Syfte

Syftet med detta examensarbete är att undersöka och jämföra olika passiva kyltekniker som används för livsmedelagring i tropiska klimat. Fokus ligger på att identifiera vilka metoder som är mest effektiva utifrån kylkapacitet, temperaturprestanda och hållbarhetsaspekter. Arbetet syftar även till att belysa för- och nackdelar med passiva kylmetoder i jämförelse med aktiva kylsystem.

## Frågeställningar

- Vilka typer av passiva kyltekniker lämpar sig för livsmedelshantering i tropiska klimat och hur dessa system konstruerade?
- Vilken kylkapacitet och vilka temperaturprestanda uppvisar dessa system vid praktisk tillämpning?
- Hur effektiva är passiva kylmetoder jämfört med aktiva kylsystem ur perspektiven energieffektivitet, hållbarhet och användbarhet i elbristområden?
- Vilka potentiella risker och begränsningar finns med att tillämpa passiva kylsystem, särskilt i klimat med hög luftfuktighet?

### 1.1 Passiv kylning

Passiv kylning innebär användning av naturliga resurser som ventilation, solskydd och byggmaterials termiska egenskaper för att reglera temperaturen inomhus. Genom att utnyttja naturlig luftcirkulation kan man på ett energieffektivt sätt kyla ner utrymmen utan att behöva använda eldrivna system. (Burca 2023)

Passiv kylning har främst använts inom livsmedelslagring, särskilt för frukt och grönsaker. I många tropiska regioner, där tillgången till elektricitet är begränsad eller obefintlig, är traditionella kylskåp och kyltekniker ofta opraktiska eller otillgängliga. Som ett resultat har alternativa lösningar för kylning utan el utvecklats (Munusamy, Ranjith & Sankarapandian 2011).

### 1.2 Aktiv kylning

Aktiv kylning är ett kylsystem som använder mekaniska eller elektriska metoder för att avlägsna värme från ett system, vilket gör det möjligt att hålla komponenterna vid en lägre temperatur än omgivningens temperatur. (Moircooling 2024)

## 2. METOD OCH PROBLEMSTÄLLNING

Urvalet syftade till att identifiera och analysera vetenskapliga artiklar, fallstudier och tekniska rapporter som behandlar tekniker för passiv kylning med fokus på livsmedelförvaring, hållbarhet och lagring i tropiska miljöer. Litteratursökning genomfördes i flera vetenskapliga

databaser såsom Google Scholar, Diva portal, Elicit och Högskolan i Borås AI Assistant. Följande sökord och sökfraser användes i olika kombinationer för att täcka in ett brett spektrum av relevanta källor: passiv cooling, non-electric refrigeration, zero energy cool chamber, sustainable cold storage och tropical climate food preservation.

Krav för artikelval var:

- Studier publicerade från år 2005 och framåt.
- Forskning som fokuserar på passiva kylsystem utan behov av elektricitet.
- Tillämplighet i tropiska klimat.
- Innehöll kvantitativa data.

Exklusionskriterier:

- Artiklar utan teknisk beskrivning eller utan empiriska resultat.
- Arbeten som saknade Peer Review.
- Studier som enbart behandlade aktiv kylning eller klimat av byggnader.

Endast vetenskapliga artiklar, tekniska rapporter och bökar med tydligt angivna metoder och resultat använts. Trovärdighet förstärkts genom fler källor analyserade samma typ av system (till exempel ZECC eller PCM) vilken möjlig gjorde resultaten.

Målet med litteratururvalet var att identifiera metoderna för passiv kylning i tropiska klimat, utvärdera deras effektivitet för att bevara frukt, grönsaker och andra livsmedel, analysera deras miljöpåverkan och hållbarhetsaspekter, jämföra alternativa tekniker såsom EPCC och ZECC med aktiva kylsystem samt undersöka möjligheterna till användning i områden med begränsad tillgång till elektricitet.

I tropiska klimat så som Colombia är behovet av kylning konstant och intensivt, vilket leder till hög energianvändning och miljöpåverkan från konventionella luftkonditioneringsystem. Samtidigt står många utvecklingsländer inför ekonomiska och infrastrukturella begränsningar som försvårar implementeringen av energikrävande lösningar. Det finns därför ett behov av att undersöka hur passiva kylsystem, som inte kräver extern energitillförsel, kan användas som ett hållbart alternativ. Problemet som uppstår är hur effektiva dessa passiva lösningar är i praktiken under tropiska förhållanden, samt vilka faktorer som påverkar deras funktionalitet och genomförbarhet i sådana miljöer.

## **3. TEORI**

### **3.1 Teknisk jämförelse mellan passiv och aktiv kylning**

Aktiv och passiv kylning är två olika kylsystem som används för att sänka temperaturen i ett visst utrymme eller för att kyla ner specifika produkter. Dessa två system uppnår samma mål

att minska värme, men de fungerar på olika sätt och har därmed olika egenskaper, effektivitet och användningsområden. Det finns tydliga skillnader mellan dem vad gäller funktionsprinciper, prestanda samt fördelar och nackdelar. För att tydliggöra dessa skillnader krävs en jämförande analys av deras teknologier och tillämpningar. (Chiesa, Grosso, Pearlmutter & Ray 2017)

### 3.1.1 Fördelar och nackdelar

Valet mellan passiv och aktiv kylning beror på flera faktorer klimat, ekonomiska resurser och miljömål. Kylning är en viktig del av moderna liv särskilt i varma klimat där inomhustemperatur kan påverka både komfort och hälsa. Det finns två strategier att sänka temperaturen i byggnader: passiv kylning och aktiv kylning. (Chiesa et al. 2017)

#### Passiv kylning (Cai & Gou 2024)

Fördelar:

- Mycket låg eller inga energiförbrukningar
- Låg miljöpåverkan
- Låg driftkostnad och minimalt underhåll

Nackdelar:

- Begränsad effektivitet i mycket varma eller fuktiga klimat
- Mindre flexibilitet och kontroll

#### Aktiv Kylning

Fördelar:

- Hög kylkapacitet även under extrema väderförhållanden
- Möjlighet till exakt temperaturutrustning

Nackdelar:

- Hög energiförbrukning
- Höga installations och underhållskostnader
- Ökad miljöpåverkan beroende på el källa och köldmedier

Risker med passiva evaportiva kylsystem för livsmedellagring lyfts i studien (Defraeye, Shoji, Schudel, Onwude & Shrivastava 2023) finns det flera betydande riskfaktorer vid användning av passiva evaportiva kylare:

Den har begränsad kylkapacitet i fuktiga klimat eftersom dessa system bygger på avdunstning för att sänka temperaturen detta minskar deras effektivitet kraftigt i miljöer med hög luftfuktighet. Detta gör att kylningen blir otillräcklig under sådana förhållanden.

Till skillnad från aktiva kylsystem kan passiva lösningar inte justera eller styra temperaturen exakt. Detta innebär att lagrade livsmedel riskerar att exponeras för höga eller låga temperatur vilket ökar risken för kvalitetstapp eller förstörd vara (Defraeye et al. 2023)

### 3.1.2 Beräkning av kylbehovet i ett fruktrum

Energien som krävs för att kyla frukt genom avdunstning visas i ekvation 3.1. Den beräknar hur mycket energi som krävs för att kyla ner en viss mängd från dess starttemperatur. (Defraeye et al. 2023)

$$E_{ec,fr} = m_{fr} * c_{p,fr} * (T_{ini} - T_{wb}) \quad 3.1$$

Energien som tillförs från avdunstning av 1 liter vatten visas i ekvation 3.2

$$E_{ec,fr} = m_{fr} * c_{p,fr} * (T_{db} - T_{wb}) = E_{lat} = m_1 * L_v^{ref} \quad 3.2$$

Denna formel visar balansen mellan den energi som frukten släpper ifrån sig när den kyls ner och energi som krävs för att avdunsta 1 liter vatten.

Hur mycket fruktmassa som kan kylas av 1 liter vatten visas i ekvation 3.3

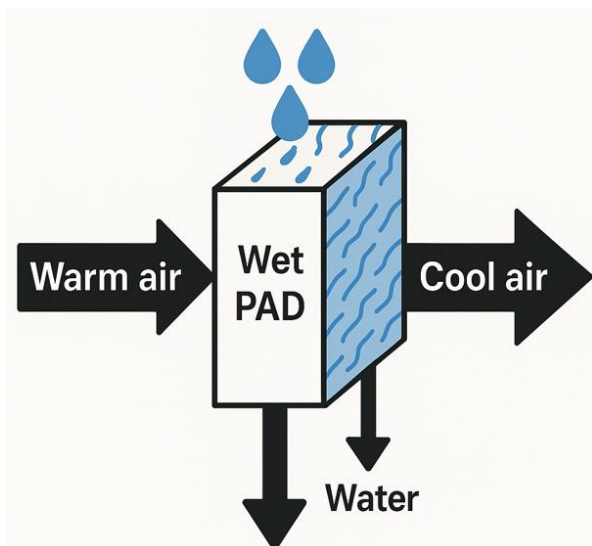
$$m_{fr} = \frac{L_v^{ref}}{c_{p,fr} * (T_{db} - T_{wb})} \quad 3.3$$

Den räknar ut hur mycket frukt i kg som kan kyls ner. Ju större temperaturskillnad mellan torr och våta kudden desto fler kilo frukt kan kyls (Defraeye et al. 2023).

## 3.2 Evaporativ kylning

Principen för evaporativ kylning bygger på att avdunstning absorberar värme från omgivningen, vilket leder till att ytan som är i kontakt med vattnet kyls ner. Skillnaden mellan luftens torr- och våt temperatur avgör hur effektiv kylningen blir ju större skillnad, desto bättre kylningseffekt. Genom att låta varm utomhusluft passera genom en våt, porös kudde kyls den ner naturligt och skapar ett svalare klimat.

I ett evaporativt kylsystem finns några huvudsakliga komponenter: kylpad, fuktabsorberande material, vattentillförsel, fördelningsrör, ränna, vattenbehållare och ett överloppssystem. När luften passerar de fuktiga kylkuddarna avdunstar en del av vattnet, vilket absorberar värme från luften. Resultatet blir att värmen tas bort från luften i denna process, vilket gör att kuddarna har lägre temperatur och högre luftfuktighet. (Ndukwu & Manuwa 2014)



*Figur 1: direkt evaporativ kylning*

I ett evaporativ kylsystem används olika material som kylkuddar för att hålla vatten och möjliggöra kontakt mellan luft och vatten. Dessa material måste kunna absorbera och hålla kvar vatten samtidigt som de tillåter luft att passera genom dem.

I student har det testats båda organiska och oorganiska material exempelvis:

- Naturliga material: jute, ris strå, träspån, bomull, kokosfiber, palmblad och kol.
- Tillverkade material: metallnät, keramik, cellulosapads, PVC, latexskum och glasfiber

I tropiska länder används ofta jordbruksrester som kyl material, främst i passiva system där luftcirkulation sker naturligt. Tjockleken på kylkudden påverkar effektiviteten, tjockare kuddar ger bättre avkylning med kräver starkare fläktar.

Evaporativa kylsystem används för att sänka temperaturen och öka luftfuktigheten i lagringsmiljön, vilket är optimalt för att bevara frukt och grönsaker. Systemet är effektivt för att förlänga hållbarheten och bibehålla kvaliteten hos känsliga livsmedel särskilt i varma och torra klimat där traditionella kylsystem är dyra eller otillgängliga. (M. C. Ndukwu, 2014)

**Tre huvudsakliga** metoder tas upp i studien:

### **3.2.1 Passiv direkt evaporativ kylning**

Den passiva metoden är den mest grundläggande formen av evaporativ kylning och bygger på naturlig luftcirkulation utan användning av fläktar eller elektriska komponenter. Systemen är oftast konstruerade med enkla lokalt tillgängliga material som lera, tegel, bambu, jutesäckar, sand och ris strå. Vattnet appliceras manuellt och när den varma omgivningsluften passerar genom de fuktiga väggarna eller kuddarna kyls luften ner genom avdunstning.

Exempel på sådana konstruktioner inkluderar **Zeer pot**, som består av två lerkärl med sand däremellan som hålls fuktig. **Bambukylare** med tygdukar som suger vatten från en behållare samt **Tegelkammare** fyllda med sand och täcka med fuktade mattor. Dessa lösningar har varit

populärt i Indien och delar av Afrika, sådana passiva system visat sig kunna sänka temperaturen med upp till 10°C och bibehålla en luftfuktighet på omkring 90–95%. (M. C. Ndukwu, 2014) Passiva system har vissa begränsningar. Deras effektivitet är starkt beroende av ett torrt och blåsig klimat samt har tillgång till vatten, dessutom har de ofta låg kapacitet och är inte lämpliga för storskalig lagring (Ndukwu & Manuwa 2014).

### **3.2.2 Aktiv direkt evaporativ kylning**

Aktiva system är en mer avancerad variant av direkt evaporativ kylning där fläktar, pumpar eller andra komponenter används för att förbättra luftflöde och vattenfördelningen. Dessa system möjliggör en jämnare och mer kontrollerade kylning och är därmed mer effektiva än passiva alternativ (Ndukwu & Manuwa 2014).

Forskning har visat att aktiva system kan sänka temperaturen med mellan 4 °C och 13 °C, samtidigt som luftfuktigheten i lagringsutrymmen kan höjas till mellan 85–98%. Kylkuddar tillverkade av jute, kokosfiber och andra material som nämnts tidigare, används ofta eftersom dessa material har god vattenbehållande förmåga och är billiga att tillverka. Systemen består vanligtvis av en fläkt som suger in utomhusluft genom fuktiga pads, en vattenpump som håller padsen blöta samt ett lagringsutrymme som är isolerat och ventilerat.

Den stora fördelen med aktiva system är att de fungerar även i miljöer med låg naturlig luftcirkulation och kan hantera större mängder produkter men de kräver tillgång till elektricitet eller solenergi samt viss teknisk kunskap för underhåll (Ndukwu & Manuwa 2014).

### **3.2.3 Indirekt och två steg evaporativ kylning**

Indirekt evaporativ kylning är en mer utvecklad metod där luften först kyls ned utan att fuktas direkt. Den varma luften passerar genom en värmeväxlare där den kyls av ett separat luftflöde som har befuktats i ett tidigare steg. På detta sätt undviks att den luft som når lagringsutrymmet blir för fuktig, vilket kan vara viktigt för produkter som inte tål för hög luftfuktighet (Chopra & Beaudry 2018).

Tvåstegssystem testas i Indien. Systemet består av två separata kylkammare och en plattvärmeväxlare. Utomhus passerar luften först genom ett förkylning stadium och leds sedan in i lagringsutrymmet, medan fuktig luft från en separat krets används för att kyla ned värmeväxlaren. Denna metod kunde sänka temperaturen till 16–18 °C och bibehålla en relativ fuktighet på 50–75%. Nackdelen med denna metod är den högre kostnaden och komplexiteten i konstruktionen (Ndukwu & Manuwa 2014).

I studien framhålls att evaporativ kylning är en enkel, energieffektiv och miljövänlig teknik, särskilt väl lämpad för varma och torra klimatzoner. Tekniken uppvisar en hög grad av flexibilitet, då både passiva och aktiva system kan utformas med hjälp av enkla, lokalt

tillgängliga material och anpassas efter varierande klimatförhållanden och användarbehov (Ndukwu & Manuwa 2014).

Studien identifierar samtidigt ett antal centrala utmaningar som behöver hanteras för att möjliggöra en fortsatt utveckling och bredare implementering av tekniken. Särskild vikt läggs vid behovet av framtida satsningar på fältstudier för att verifiera teknikens prestanda under verkliga förhållanden. För en jämförelse mellan olika metoder för evaporativ kylning se tabell 5. Vidare framhålls vikten av att integrera förnybara energikällor, såsom solenergi, för att ytterligare öka systemens energieffektivitet och hållbarhet. Slutligen betonas betydelsen av att utveckla hållbara affärsmodeller som kan främja teknikens tillgänglighet och praktiska användbarhet i länder (Ndukwu & Manuwa 2014).

### **3.3 Jordkällare**

En av de mest effektiva metoderna för att kyla ner mat och förlänga dess hållbarhet är användningen av en jordkällare. En jordkällare är en underjordisk konstruktion som skapar en naturligt kall och fuktig miljö. En jordkällare kan hålla frukt och grönsaker färska i flera månader genom att utnyttja jordens naturliga kyla (Hajdu-Rafis 2017).

Trots att det finns flera alternativa metoder för livsmedelsbevaring anses jordkällare vara en av de mest hållbara och pålitliga lösningarna. Detta beror på att jordkällare fungerar utan behov av elektricitet eller andra externa energikällor. I stället bygger de på naturens egna resurser, främst markens kyla och fuktighet. Jordkällare fungerar som ett naturligt kylskåp, där den kyla som uppstår i utrymmet härrör från jorden omkring den. Genom att utnyttja jordens kapacitet att bibehålla en stabil temperatur på cirka 12 - 14°C, samt genom att nyttja naturlig luftcirkulation för att säkerställa naturlig ventilation, upprätthålls en optimal förvaringsmiljö för livsmedel (Hajdu-Rafis 2017).

Det finns flera anledningar till att använda en jordkällare. Den möjliggör tillgång till färska livsmedel året runt, har låg miljöpåverkan och är därmed ett miljövänligt alternativ. Den största fördelen och det som detta arbete fokuserar på att en jordkällare inte kräver någon form av el eller annan energi, vilket gör den särskilt användbar i områden med begränsad eller obefintlig tillgång till elektricitet. En jordkällarens effektivitet och därmed livsmedlens hållbarhet är beroende av flera viktiga faktorer. Dessa faktorer spelar en avgörande roll för hur väl källaren fungerar och påverkar i hög grad resultatet. För att uppnå bästa möjliga förvaringseffekt krävs att dessa förutsättningar är optimala (Hajdu-Rafis 2017).

#### **3.3.1 De avgörande faktorerna**

En fullt fungerande jordkällare med hög effektivitet och goda resultat när det gäller matens hållbarhet och kvalitet måste uppfylla vissa krav. Det finns flera faktorer som spelar en avgörande roll för om källaren fungerar som den ska. Alla dessa faktorer påverkar i varierande

grad hur väl jordkällaren presterar, och därmed om maten får den kyla som krävs för att öka hållbarheten (Ferber 2012).

### 3.3.2 Temperatur och luftfuktighet

De flesta grödor som brukar förvaras i en jordkällare trivs bäst i kyla, vilket bidrar till längre hållbarhet. Med kyla menas dock inte extrem kyla, eftersom det kan orsaka köldskador. Den optimala temperaturen för de flesta grödor ligger i genomsnitt mellan 0–4 °C och denna temperatur uppnås vanligtvis genom naturlig nedkylning. För att ha kontroll över temperaturen i källaren bör en termometer placeras där året runt, så att du vet om klimatet är lämpligt för matförvaring. Om du inte har en termometer kan du i stället ställa en kopp med vatten i den kallaste delen av jordkällaren (Ferber 2012).

Jordkällarens dörr ska alltid hållas stängd, och onödiga öppningar bör undvikas, eftersom detta kan påverka temperaturen avsevärt. Temperaturförändringar kan leda till att det blir antingen för kallt eller för varmt, vilket är ogynnsamt för grödor och livsmedel. Under hösten bör dörrar och ventilation öppnas för att släppa in sval utomhusluft och därmed sänka temperaturen i jordkällaren till strax över fryspunkten. När denna temperatur uppnåtts bör öppningar stängas för vintern. Ventilationen öppnas därefter endast vid behov för att undvika köldskador. En välisolerad jordkällare har kapacitet att bibehålla svala temperaturer även vid extrem kyla utomhus. I områden med hårda vintrar kan det vara fördelaktigt att installera extra isolering eller en termostat utrustad med varningssignal som larmar när temperaturen når fryspunkten. Luftfuktigheten i jordkällaren är en avgörande faktor för lagringsförhållandena. De flesta grönsaker består till 80–90 % av vatten. När luftfuktigheten i omgivningen är låg övergår fukten från produkterna till den omgivande luften, vilket kan leda till uttorkning. För vissa grödor, såsom lök, vitlök och vintersquash, är detta önskvärt, eftersom en något torrare miljö kan förlänga hållbarheten. Dessa bör förvaras vid luftfuktighet under 80–90 % (Ferber 2012).

Däremot kräver många lagringsgrödor, särskilt rotfrukter, en luftfuktighet på över 90 % för att behålla sin krispighet och färskhets. Fuktförlusten är som störst strax efter skörd, vilket gör det viktigt att grödorna snabbt förs in i en sval och fuktig miljö. Ett undantag utgörs av grödor som behöver torkas innan de lagras. För att övervaka luftfuktigheten används en hygrometer, vilket är ett instrument som mäter den relativa luftfuktigheten – det vill säga mängden vattenånga i luften vid en given temperatur och under aktuella förhållanden. Med hjälp av hygrometern kan luftfuktigheten kontrolleras kontinuerligt under årets alla årstider, vilket möjliggör anpassning av lagringsförhållandena till olika grödor (Ferber 2012).

Luftfuktigheten är en parameter som kan kontrolleras och justeras vid behov. Om luftfuktigheten är för hög är den enklaste lösningen att öppna ventilationsöppningarna för att släppa in kall luft och släppa ut varmare luft, vilket bidrar till att sänka luftfuktigheten. Ett alternativ är att använda en avfuktare under en begränsad period, men övervakning krävs för att undvika att miljön blir för torr. Vissa ämnen kan också användas för att absorbera överskottsfukt, exempelvis kalciumklorid eller släckt kalk, vilka effektivt binder vattenånga från luften. Dessa material måste hanteras varsamt och får inte komma i kontakt med livsmedel.

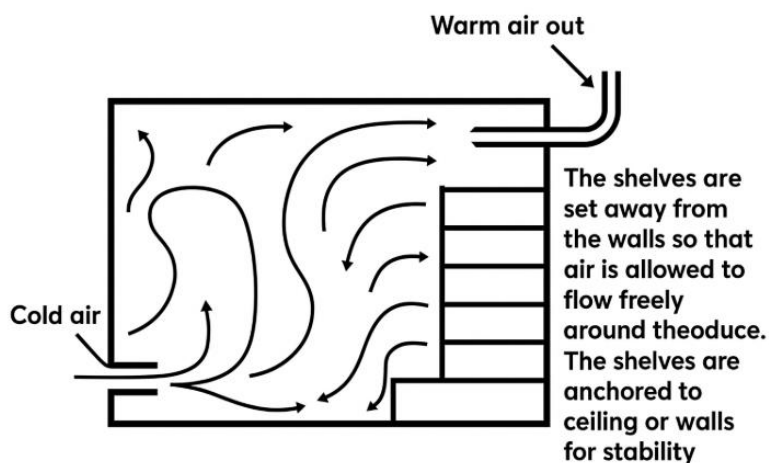
Om kraftig kondens observeras på tak, väggar eller förvaringsbehållare kan det indikera att källaren är för kall. I sådana fall kondenseras vattenångan och sätter sig på ytorna i stället för att hålla sig i luften, vilket i sin tur medför en minskad relativ luftfuktighet i utrymmet. För att höja luftfuktigheten kan enkla metoder användas, exempelvis att ta med en hink delvis fylld med rent vatten vid varje besök och sprida vattnet över golv och väggar. Denna åtgärd bidrar till att vattenången återförs till luften och därmed höjer fuktigheten i källaren (Ferber 2012).

### 3.3.2.1 Ventilation

Ventilation och luftcirkulation är centrala faktorer för att reglera både temperatur och luftfuktighet i en jordkällare. Dessutom är god ventilation nödvändig för att avlägsna oönskade lukter samt eten (etylengas), som naturligt frigörs från lagrade produkter under mognads- och nedbrytningsprocesser (Ferber 2012).

Alla jordkällare bör vara utrustade med ventilationssystem som har direkt förbindelse med utomhusluften. En traditionell och enkel ventilationslösning består vanligtvis av ett ventilationsintag för att släppa in kall, frisk luft samt ett ventilationsutlopp som avleder varm, fuktig och gasbemängd luft från utrymmet.

Dessa ventilationskanaler kan utgöras av enkla rör eller ventiler som leds genom ytterväggarna. Eftersom varm luft naturligt stiger bör ventilationsutloppet placeras i den övre delen av källaren, medan intaget placeras nära golvnivån för att effektivt tillföra kall luft och främja naturlig luftcirkulation (Ferber 2012).



Figur 2: Exempel på ordentlig ventilation.

Om jordkällaren är belägen utomhus krävs två separata ventilationsöppningar, en vid taket och en nära golvet. Om källaren däremot är inomhus kan ett fönster användas som ventilationsöppning, och då räcker det med en öppning, vilket innebär att två ventilationsrör kan använda samma öppning. För en liten jordkällare, som är högst 1,8 x 2,4 meter, bör

ventilationsrörens diameter vara minst 10 cm för att säkerställa tillräcklig ventilation. För en större källare bör rörens diameter vara minst 15 cm. Över de yttre ventilationsöppningarna bör ett nät monteras för att förhindra att insekter kommer in. Det är viktigt att placera hyllorna och behållaren så att maten och grödorna inte står direkt på väggarna för att luftcirkulationen ska vara möjlig i hela källaren (Ferber 2012).



*Figur 3; Exempel på en ventilation öppning.*

### **3.4 Lågenergikylrum (ZECC)**

ZECC är en typ av kylrum som använder principen om avdunstningskylning för att bibehålla låga temperaturer och hög luftfuktighet utan att använda mekanisk kylning. Detta är särskilt användbart i tropiska områden där traditionell kylning kan vara dyr och svår att installera (Rayaguru, Khan & Sahoo 2010).

### **3.5 Rejuvenation of Traditional Pottery making by applying Advanced Biotechniques**

Studien fokuserade på att utveckla miljövänliga, energieffektiva kylsystem som ett alternativ till moderna kylskåp, med är låg kostnad och utan el förbrukning. Flera modeller av sådana lerbaserade förvarning system togs fram och testades. Den grundläggande modellen bestod av ett dubbelkruksystem där en mindre lerkruka placerades inuti en större som beskrivs i 3.10.

Grundmodellen (EWSS1)

- Dubbelkruksystem: dubbelkruksystem där en mindre lerkruka placerades inuti större
- Kylning via förångning: hålls 5–6°C lägre än utetemperaturen
- Luftfuktigheten inuti: 80%

En modifierad version utvecklades för att förbättra användarvänligheten och kylförmågan. Denna modell hade en enkel kruka med två yttre vattenbehållare formade som ringar. Krukan hade också små lufthål för ventilation och en ihålig bas för att möjliggöra luftflöde. Systemet uppnådde en luftfuktighet på upp till 90% och temperaturreduktion på cirka 5°C.

Modifierade modell (EWSS2)

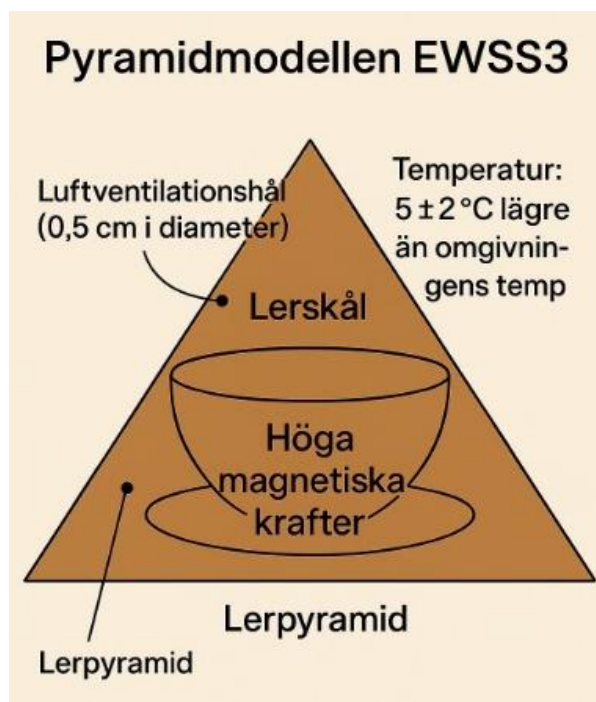
- Enkelkruka med två vattenhållande ringformad för att hålla väggarna fuktiga
- Små ventilation hål och luftflöde från en ihålig bas förstärker avdunstning.
- Temperatur: 5°C kallare än omgivningen, luftfuktighet 90%

En annan variant bestod av ett pyramidformat lock i lera som täcker en inre skål. Denna design inspirerades av teorin att pyramidformer kan påverka energiflöde och luftcirkulation.

(A.J.A. Ranjit Singh 2007)

Pyramid modell (EWSS3)

- Innerskål täckt av ett pyramidformat ler lock
- Designerad för att utnyttja luftflöde och eventuellt magnetiska effekter för kylning
- Temperatur  $5 \pm 2^\circ\text{C}$  lägre än omgivnings temperatur
- Relativ luftfuktighet  $90 \pm 3\%$



Figur 5 Pyramid modell (EWSS3)

Systemen testades med flera olika frukter och grönsaker som tomater, bananer, auberginer och morötter. Resultaten visade på klart minskad mikrobiell tillväxt, mindre viktförlust och bättre

bevarande av näringsinnehåll. Se tabell 4 för en jämförelse mellan EWSS1, EWSS2 och EWSS3

Den modell som fick bäst resultat i studien är den Modifierade modellen (EWSS2). EWSS2-modellen hade bättre bevarande av näringsämnen. I jämförelse med andra system hade EWSS2 den långsammaste nedbrytningen av kolhydrater, proteiner och vitaminer över 7 dagar. EWSS2 tog mindre plats, var enklare att hantera och var mer hygienisk tack vare vattenringarna som kontinuerligt kylde väggarna via kapillärverkan. Den var den mest effektiva modellen för att bevara frukt och grönsaker utan el. Den kombinerade smart design med god kylning och hållbarhet och passar bra i varma och torra områden. Se tabell 6 i kapitel 4.17 för en jämförelse mellan de olika systemen. (A.J.A. Ranjit Singh 2007)

### 3.6 Cooling blanket

Kylfilt är en återanvändbar textilbaserad filt fylld med ett naturligt stoppningsmaterial som sågspån eller träkol. Denna studie utvärderade effektiviteten hos två kylfiltar med en kapacitet på  $0,06m^3$  och  $0,18m^3$  för att konservera färska produkter genom fullskaliga utomhusexperiment i Kenya. En ny design av ett passivt kylsystem har utvecklats en återvändbar kyl filt PCB tillverkad av hållbart material och fylld med absorberande material som träkol. Tekniken bygger på att avdunstande vatten absorberar värme från omgivningen, vilket sänker temperatur och höjer luftfuktigheten (Wittkamp, Defraeye, Yegon & Onwude 2024).

Försöken inkluderade tre typer av PCB: CL (Charcoal large), CS (Charcoal small) och SS (Sawdust small), i tabell 2 visas vilka jämfördes med förvaring i ett stort kolkylsystem ( $40 m^3$ ) samt i skuggiga förhållanden. Systemen testade med olika kyl principer (Luftkylning, direkt kylning) och fyllnadsmaterial träkol och sågspån (Wittkamp et al. 2024).

## 4. RESULTAT

De studerade passiva kylmetoderna visar att passiva kylsystem kan effektivt sänka temperaturer och förlänga hållbarheten hos livsmedel i tropiska klimat såsom Colombia.

Passiva kylfilter med träkol eller sågspån sänkte temperaturen med 3–5°C underdagtid och till 10 °C under extrem värme. Systemet bibehöll en RH på 95% vilket minskade viktförlusten hos tomater med 50% jämfört med rumstemperatur. Tabeller och diagram från de olika fältexperimenten bekräftar att passiva system i rätt kontext ger avsevärda energibesparingar och är praktiskt tillämpbara även i låginkomstmiljöer. Dessutom sparas det ungefär 200 kWh per år jämfört med ett vanligt kylskåp med frys (Energimyndigheten 2022).

## 4.1 Utvärdering av lågkostnadskylningstekniker för förbättrad grönsakslagring i Mali

I Mali har bristen på prisvärda och energieffektiva lösningar för grönsaksförvaring länge varit ett problem, särskilt i de landsbygdsområden där tillgången till el ofta är opålitlig eller för dyr. Traditionellt tvingades både bönder och handlare förlora en stor del av sin gröda efter skörd, något som direkt påverkade deras inkomster och livsmedelssäkerhet. Grönsaker är kända för att bli dåliga med tiden. När möjligheten att frysa grönsakerna tas bort blir det svårt att lagra dem svalt, vilket gör det besvärligare för hushåll som nyttjar grönsaker i olika maträtter och därför behöver köpa färska grönsaker lite ofta, ofta till en högre kostnad. Problemet blir ännu större när temperaturen är hög. (Verploegen, Sanogo & Chagomoka 2018)

Syftet med studien att undersöka icke-elektriska teknologier för avkylning och lagring av grönsaker efter skörd i Mali med fokus på två huvudtyper, Evaporative cooling Chambers (ECCs) och lerkylare. Avdunstningskylnings princip är  $Q_{removed} = m * L_v$ , grönsaker kräver svala och fuktiga miljöer (optimalt >70% RH, < 25°C).

Totalt sex typer av evaporativa kylsystem inkluderas i studien, tre typer av evaporative cooling Chamber (ECCs) Halm-baserad, Säck-baserad och Tegel-baserad dessutom tre typer av lerkylare pot in pot- konfiguration, Cylinderformad pot on dish och rund pot in dish. Urvalet av dessa enheter baserad på variation i design, byggmaterial, kostnadsnivå, tillgången och hållbarhet. Avancerad elektroniska sensorer installerades på samtliga kylsystem för att över tid mäta omgivningstemperatur, relativ fuktighet, inre temperatur, fuktinnehåll i sandlagret. Sensorerna var programmerade att mätvärden varje femte minut under hela studieperioden.

Strukturerade intervjuer genomfördes för att fånga upplevd nytta, användbarhet, hållbarhet och eventuella begränsningar. Intervjuerna genomfördes efter att deltagarna använt respektive enhet i minst tre månader vilket säkerställde erfarenhetsbaserad återkoppling.

Sensorbaserad datainsamling användes för att kvantitativt utvärdera kylprestanda hos de utvalda evaporativa kylsystemen under verkliga fältförhållanden. Den insamlade datan omfattade temperatur, relativ luftfuktighet (RH), samt i vissa fall sandfuktighet, vilket möjliggjorde en objektiv jämförelse av de sex systemens funktionalitet. Den massiva strukturen hos tegel-ECC (med ~10 cm tjockt sandlager) ger en hög termisk tröghet, vilket bidrar till temperaturstabilitet över dygnet. Säck- och halm-ECC kyler snabbt men tappar effekt inom 5–13 timmar utan vattning (Verploegen, Sanogo & Chagomoka 2018).

Tegel-ECC visas att den är mest robust och temperaturstabil med kostsam att bygga. Lerkylare särskilt pot in pot är effektiva, billiga och kräver minimalt under håll. RH reducerar kylningseffekt men temperatur differensen förblir tillräcklig för att förbättra grönsakernas hållbarhet dessutom vattningsfrekvens är avgörande faktor för systemets hållbara drift, en sammanfattad resultat visas i tabell 1.

Tabell 1: Sammanställning av kylkapacitet, luftfuktighet och användningsvillkor för evaporativa kylsystem

Kriterium	Tegel-ECC	Säck-ECC	Halm-ECC	Pot-in-pot	Pot-in-dish
$\Delta T_{\max}$ (°C)	10,4	4,3	6,9	8,6	5,1
RH stabilt	Hög	Låg	Medel	Mycket Hög	Hög
Vattningsfrekvens	1/dag	3/dag	2–3/dag	<1/dag	<1/dag
Lämplig för	Gemensamt bruk	Enskilda	Enskilda	Hushåll	Hushåll

Resultaten visar tydligt att avdunstning är en effektiv och lågkostnad metod för att förbättra lagringsförhållandena för grönsaker i Mali. Vattningsfrekvens är kritiska enheter med hög vattenretention (tegel och pot-in-pot) är bättre lämpade för användare med begränsad tillgång till vatten. Omgivande RH påverkar starkt effekten - därför måste klimatet vägas in vid val och utplacering av system. Dessa fynd bekräftar att enkla, lokalt producerade tekniker kan erbjuda signifikanta förbättringar av livsmedelsförvaring och minska post-skördeförluster, särskilt i elektricitetsbegränsade miljöer. Resultaten ger därmed ett starkt underlag för vidare spridning och anpassning av evaporativa kylsystem inom liknande kontexter globalt. (Verploegen, Sanogo & Chagomoka 2018)

## 4.2 Modified Earthen pot Cool Chamber

Modified Earthen Pot Cool Chamber (EPCC) är en studie som undersöker effektiviteten hos en traditionell kylmetod, den så kallade lerkruskylningen, för att bevara frukt och grönsaker såsom tomater, vindruvor och aubergine. Studien jämför förvaring i en EPCC med förvaring i kylskåp samt vid rumstemperatur. Resultaten visar att EPCC är ett miljövänligt, energisnålt och kostnadseffektivt alternativ till kylskåp. (Rayaguru, Khan & Sahoo 2010)

Metoden bygger på två lerkärl, där ett mindre kärl placeras inuti ett större, med vatten i mellanrummet. Vattnet spelar en avgörande roll då det hjälper till att sänka temperaturen (med 5–6 grader jämfört med rumstemperatur) och upprätthålla en hög luftfuktighet (87–92 %). Den relativa luftfuktigheten och temperaturen i rummet låg på  $60 \pm 2$  % och  $29 \pm 1$  °C. I kylskåpet uppmättes en luftfuktighet på 55 % och en temperatur på  $5 \pm 1$  °C.

Studien bekräftar att denna metod förlänger hållbarheten hos färskvaror, minskar näringsförluster och begränsar mikrobiella förändringar jämfört med andra förvaringssätt.



Figur 4: visar hur en EPCC ser ut. (Rayaguru, Khan & Sahoo 2010)

De utvalda produkterna – tomater, vindruvor och aubergine – tvättades med sterilt vatten, packades i sterila plastpåsar och förvarades i tre olika system: EPCC, kylskåp och rumstemperatur. Produktvikten mättes vid start och därefter var 48:e timme under en lagringsperiod på totalt 9 dagar. (Rayaguru, Khan & Sahoo 2010)

Under denna tid analyserades och dokumenterades flera parametrar, inklusive fysiologisk viktförlust, mikrobiell belastning, förekomst av svamp, biokemiska förändringar samt sensoriska egenskaper såsom smak och textur.

Viktförlusten beräknades enligt formeln:

$$PLW(\%) = \frac{\text{startvikt} - \text{slutvikt}}{\text{startvikt}} * 100 \quad (3.8)$$

Denna studie visar att produkterna som förvarades i EPCC uppvisade lägre fysiologisk viktförlust efter 9 dagars lagring, jämfört med förvaring i kylskåp och vid rumstemperatur.

Viktförlusten i EPCC var följande:

- Vindruvor: 5,3% jämfört med 10% i kylskåpen.
- Tomater: 7,5% (EPCC) jämfört med 10% i kylskåp
- Auberginer: 1,69% (EPCC) jämfört med 2,35% i kylskåp

Rumstemperatur visade den största viktförlusten bland de tre systemen.

I kylskåp orsaker större viktförlust av mekanisk stress, membranskador, läckage och förändringar i enzymaktivitet. I EPCC, däremot är stressen på frukterna och grönsakerna mindre, avdunstning minimal och kvaliteten bättre med hjälp av hög luftfuktighet och lägre temperatur. (Rayaguru, Khan & Sahoo 2010).

När det gäller mikrobiell tillväxt visade resultaten att mängden totala heterotrofa bakterier och svampar ökade under lagring särskilt efter nio dagar. Ökningen av bakterier var mest markant vid rumstemperatur, där miljön hjälpte till med spridningen av mikroorganismer. I kylskåpet var tillväxten något lägre men fortfarande märkbar. I EPCC, där både luftfuktigheten och temperaturen var kontrollerade var bakterietillväxten som lägst och de hade minimerade fysiska

förändringar i frukterna, vilket i sin tur minskade sårbarheten för bakterier som kan tränga in i frukten genom skadad vävnad eller öppna sår. (Rayaguru, Khan & Sahoo 2010).

En annan viktig faktor var att svampar dominerade i vissa prover och kunde hindra bakterietillväxt genom antibiotika. Den kontrollerade miljön i EPCC bidrog också till att minska sockerförlusten och bevara vattenhalten vilket förhindrar försämring av fruktens kvalitet.

Studien visar att frukter som lagras i kontrollerad miljö EPCC behåller sin kvalitet bäst jämfört med lagring i rumstemperatur eller kylskåp. EPCC ger hög luftfuktighet och stabil temperatur, vilket minskar vattenförluster och bevarar smak, konststen och utseende. Efter 9 dagar hade frukter som lagrats i EPCC fortfarande över 75–85% av sin ursprungliga kvalitet, medan frukter i rumstemperatur försämrades betydligt mer. EPCC är därmed ett effektivt sätt att förlänga hållbarheten på frukt, men kräver vidareutveckling för storskalig användning. (Rayaguru, Khan & Sahoo 2010).

### 4.3 Cooling blanket

*Tabell 2: Dimensioner på tre typer av PCB*

Typ	Längd (m)	Bredd (m)	Höjd före fyllning (m)	Höjd efter fyllning (m)	Torrsvikt (kg)
CS (charcoal small)	3	0.12	0.4	2.3	12
SS (sawdust small)	3	0.12	0.4	2.3	4
CL (Charcoal large)	5.25	0.15	0.4	4.2	30

Det har gjorts två studier. Den första studien syftade till att jämföra prestandan hos kylfilter (PCB) i olika storlekar samt olika fyllmaterial för lagring av tomater efter skörd. Filtarna används som luftflödesdrivna kylsystem där varje filt lindades runt en eller tre standardplastlådor (57 liters volym) och försågs med ett lock av vävt bast för att säkra systemet. En tunn plastfilm placerades under locket som en extra ångbarriär för att förhindra mögel och bibehålla fuktigheten i filten. Vatten tillsattes regelbundet för att upprätthålla avdunstningseffekten, med ungefär 5 liter för små filter och 12 liter för större filter varje 1–2 dagar. I varje experiment användes 35 tomater. Frukten fördelades slumpmässigt i fem behandlingsgrupper: CS, SS, träkolskylare, skuggkontroll och CL. Lagringstiden var fem gånger och försöket gjordes bara en gång (Wittkamp et al. 2024).

En andra studie undersökte filtarnas lämplighet för andra grönsaker såsom kål, ärtskidor och zucchini (10 kg av varje). Här testades tillämpningen av filtarna genom att placera PCB SS ovanpå lådan i stället för att linda den runt. Grönsakerna fördelades slumpmässigt i fyra grupper (utan CL). Lagringstiden var fem dagar och försöket replikerades veckan efter.

Kylprestandan hos de kylfiltarna (PCB) utvärderades utifrån följande nyckelmått:

- Innetemperatur – mätt med sensorer placerade i mitten av varje låda mellan frukterna
- Inre relativ fuktighet-registrerade med högre termiska sensorier i samma position som temperaturmätningen
- Frukttemperatur
- Kyleffektivitet (%) - beräknades enligt formeln

$$\eta = \frac{T_{ab} - T_1}{T_{ab} - T_{wb}} \quad 3.10$$

Den passiva kylfiltren (PCB) sänkte lufttemperaturen med 3–5 °C under omgivningstemperaturen, med en maximal reduktion på 10°C under de varmaste timmarna på dagen. Den relativa fuktigheten i filtren upprätthölls på 95% vilket är optimalt för att minska uttorkning och förlänga hållbarheten hos grönsakerna. Kylfiltarnas effektivitet under dagtid uppmätts till 70% vilket är jämförbart med traditionella förångningskylsystem.

Kylfiltren visar stor potential som ett kostnadseffektivt, energisnålt och skalbart alternativ för att minska skördeförbrukningar i låg- och medelinkomstländer. Systemet är särskilt lovande för småbönder och handlare på lokala marknader.

#### 4.4 ZECC

(ZECC) konstruerades i Bhubaneswar, Orissa, baserat på evaporativ kylning. Strukturen är en rektangulär, dubbelväggig kammare med ett värmeisolerande, avtagbart tak. Väggarna är 125 mm tjocka och yttermåttarna är 1650 mm × 1150 mm × 675 mm. Utrymmet mellan väggarna är fyllt med flodsand och har ett dropprörssystem anslutet till en vattenhink placerad högre än kammaren. Vatten droppas kontinuerligt på sanden för att hålla den våt, vilket hjälper till att bibehålla lägre temperaturer och högre luftfuktighet inuti kammaren. Golvet är slätt putsat och topplocket är tillverkat av gummiduk och halm med en bamburam. Denna konstruktion hjälper till att förhindra avdunstning av inre fukt och bevarar färsk frukt och grönsaker. Efter initial mätning av sandbädden bestämdes det dagliga vattenbehovet under tomgångsförhållanden. Fem olika vattennivåer (45, 60, 75, 90 och 105 liter per dag) testades, och motsvarande förändringar i relativ fuktighet (RH) och temperatur studerades. En 15-liters hink användes för droppvatten, fylld 3 till 7 gånger per dag. Processen övervakades, och hinken försågs med vatten från en tank ovanför via ett PVC-rör. Experimentet varade i 7 dagar, och genomsnittliga RH- och temperaturvärden registrerades. Variationer i RH och temperatur med olika vattennivåer observerades under både sommaren (april-maj 2007) och vintern (november-december 2007) under tomgångsförhållanden. Dessa data hjälpte till att bestämma den optimala vattenmängden som behövdes för att uppnå önskad RH och temperatur (Rayaguru, Khan & Sahoo 2010).

Lagringsexperimentet innebar att mäta temperatur- och relativ fuktighetsprofil (RH) för ZECC:n med hjälp av den optimala vattennivån. Maximala och minimala värden för dessa parametrar registrerades dagligen under hela året (januari-december 2008). Veckovisa medelvärden beräknades från den insamlade datan och jämfördes med omgivningsförhållandena. Temperatur och RH i mitten av ZECC:n och utanför registrerades med en digital termohygrometer (UKAS, modell XHJT 302, minsta räkning 0,01 °C och 1 % RH) med 1-timmesintervaller. Kurvor som visar förändringar i temperatur och RH för veckovisa och månatliga medelvärden framställdes (Rayaguru, Khan & Sahoo 2010).

Potatis, tomat, aubergine, mango, bananer och bladgrönsaker (spenat) förvarades separat i ZECC under sommar och vinter. Mogna frukter och grönsaker skördades manuellt från närliggande gårdar och transporterades i plastbehållare. Efter sortering för enhetlig storlek och oskadad produkt tvättades de med kranvatten för att avlägsna fältvärme och jordpartiklar. För att minska mikrobiella populationer desinficerades produkterna (förutom bladgrönsaker) med klorerat vatten (100 µg/ml) i 20 minuter. Efter desinfektion torkades proverna på ytan och delades upp i två delprover för förvaring i ZECC och vid rumstemperatur. ZECC:s prestanda utvärderades baserat på hållbarhet (antal dagar med säljbarhet  $\geq 80$  %) och fysiologisk viktförlust (PLW) för produkterna under olika säsonger. Produkterna förvarades i plastlådor inuti kammaren, och hållbarheten bestämdes baserat på 20 % ruttelse eller opålitlighet. Säljbarheten bedömdes genom att observera synlig mögeltillväxt, röta, krympning eller missfärgning. PLW beräknades genom att jämföra viktskillnaderna med den ursprungliga vikten (Rayaguru, Khan & Sahoo 2010).

Temperaturen inuti ZECC minskade med en ökning av vattennivån, medan den relativa luftfuktigheten (RH) ökade. Vid en vattenmängd på 45 liter/dag var RH-värdena 72 % på sommaren och 64 % på vintern, och ökade till 95 % respektive 94 % vid 105 liter/dag. Temperaturen minskade från 34 °C till 27 °C på sommaren och från 21 °C till 17 °C på vintern. De optimala vattenmängderna för effektiv prestanda fastställdes till 75 liter/dag på sommaren och 90 liter/dag på vintern. Under sommaren var den högsta ökningen av RH vid 75 liter/dag, medan temperatursänkningen förblev konstant mellan 75 och 90 liter/dag. På vintern var temperatursänkningen 6,9 % vid 90 liter/dag och 2,8 % vid 105 liter/dag. Högre vattenanvändning utöver dessa nivåer var onödig. Jämförande data visade att högre omgivande RH resulterade i mindre kyleffekt inuti ZECC. Temperatur- och luftfuktighetsfluktuationerna inuti kammaren var mycket mindre än utanför, vilket gav en stabilare miljö (visar i figur 4). Hållbarheten för lagrade produkter förlängdes med 3 till 15 dagar beroende på produkttyp och säsong för en tydligt resultat se tabell 7 (Rayaguru, Khan & Sahoo 2010).

Tomater och potatis uppvisade en signifikant skillnad i hållbarhet vid förvaring i ZECC jämfört med omgivande förhållanden. Alla produkter som lagrades i ZECC förblev färska och fasta, med fysiologisk viktförlust (PLW) inom 10 %, vilket anses säkert och acceptabelt. Hållbarheten för potatis, tomat och auberginer i ZECC var 32, 18 och 7 dagar (vinter) respektive 21, 8 och

4 dagar (sommar), jämfört med 17, 7 och 4 dagar (vinter) respektive 8, 3 och 2 dagar (sommar) under omgivande förhållanden.

Bladgrönsaker och mango hade den högsta PLW under omgivande förhållanden men visade betydande besparingar i PLW och förlängd hållbarhet vid förvaring i ZECC. ZECC visade sig vara effektivt för korttidslagring av frukt och grönsaker, förutom under regnperioden (juni till september). Det rekommenderas för användning i västra och centrala Orissa, där klimatet är relativt torrt. (Rayaguru, Khan & Sahoo 2010)

(ZECC) visar sig vara en effektiv lösning för att förlänga hållbarheten för olika frukter och grönsaker i tropiska regioner som Orissa, Indien. Genom att använda avdunstningskylning bibehåller ZECC lägre temperaturer och högre luftfuktighet utan behov av mekanisk kylning, vilket gör den lämplig för landsbygdsområden med begränsade resurser.

Experimenten visade att optimala vattennivåer avsevärt förbättrar kyleffekten och den relativa fuktigheten inuti kammaren, vilket leder till bättre konservering av produkterna. Hållbarheten för potatis, tomater, bär, bladgrönsaker och mango förlängdes avsevärt när de förvarades i ZECC jämfört med omgivningsförhållanden, med fysiologisk vikt förlust (PLW) som hölls inom acceptabla gränser. (Rayaguru, Khan & Sahoo 2010)

Trots dess effektivitet är ZECC:s prestanda mindre idealisk under regnperioden på grund av högre omgivningsfuktighet. Den är dock fortfarande ett värdefullt verktyg för korttidslagring av trädgårdsprodukter under andra perioder, särskilt i torra klimat. ZECC kan rekommenderas för användning i tropiska och kustnära områden, vilket ger en hållbar och kostnadseffektiv metod för att minska förluster efter skörd och förbättra försörjningen för små och marginella jordbrukare (Rayaguru, Khan & Sahoo 2010).

#### **4.5 Zero Energy Cool Chamber for Shelf-Life Extension of Tomato and Eggplant**

I en annan studie genomfördes ett experiment vid Ehime University. Två nollenergikylkammare (ZECC) installerades i ett växthus vid universitetets jordbruksfakultet, där en medeltemperatur på 25 °C hölls. Studien utvärderade lagringsförhållandena för tomater och auberginer och jämförde lastade förhållanden (produkter lagrade i ZECC-behållare) med förhållanden utan last (tomma ZECC-behållare). Forskarna övervakade viktminskning som en viktig kvalitetsindikator, tillsammans med förändringar i färg och ytstruktur, och observerade dessa egenskaper dagligen under hela experimentet. Totalt trettio tomater och auberginer användes, och experimentet upprepades tre gånger (Islam & Morimoto 2012).

(ZECC) konstruerades med hjälp av en slumpmässig blockstruktur. Den bestod av yttre och inre tegelväggar, med ett mellanrum på 7,5 cm mellan dem, fyllt med en blandning av sand (60 %) och zeolit (40 %) för att förbättra kyleffektiviteten. Detta porösa material hjälpte till att minska omgivningstemperaturen med upp till 15 °C. Kranvatten tillfördes sandområdet genom

droppbevattning styrd av en elektrisk ventil. Kammarens förvaringsutrymme mätte  $100 \times 100 \times 50$  cm, och en bamburam användes som skydd.

För att förhindra temperaturökning på grund av solstrålning installerades en skuggridå. Denna ridå, som mätte  $200 \times 150$  cm, blockerade 60 % av den inkommande solstrålningen och upprätthöll effektivt svalare förvaringsförhållanden. Studien undersökte olika förvaringsbehållare för att bedöma deras effektivitet vid konservering av tomater och auberginer inuti ZECC. Silverjonbelagda plastbehållare användes, eftersom silverjoner ( $\text{Ag}^+$ ) är kända för sina antibakteriella egenskaper. Två Påse Tight TW-100-behållare, vardera med måtten  $35,6 \times 25 \times 16,5$  cm, användes för att förvara värmebehandlade produkter vid  $60^\circ\text{C}$  och  $45^\circ\text{C}$ , och experimentet upprepades tre gånger. Kopparbehållare testades också för deras antimikrobiella effekter.

I denna uppställning begravdes tomater och auberginer i fina kopparkorn ( $1 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$ ) inuti behållaren. Detta experiment upprepades också tre gånger (Islam & Morimoto 2012).

Dessutom användes perforerade plastlådor gjorda av högdensitetspolyeten för att förvara icke-värmebehandlade produkter utanför ZECC för kvalitativ utvärdering. Varje låda mätte  $45 \times 35 \times 25$  cm, och tio tomater och auberginer placerades inuti för ett experiment som upprepades tre gånger. Studien utvärderade den fysiologiska vikt förlusten (PLW) hos tomater och auberginer som en viktig indikator på kvalitet. PLW mättes dagligen med hjälp av en Shimazu högprecisionsvåg BL-320S, där en vikt förlust på 5 % betraktades som tröskeln för försämrad färskhet. Avläsningarna gjordes med en dags mellanrum tills röta inträffade. Dessutom behandlades produkterna med varmvatten för att bekämpa insektsangrepp och svamp-/bakterieröta. Behandlingen delades in i två temperaturbaserade grupper:

- $45^\circ\text{C}$  i en timme, följt av kylning och torkning före lagring.
- $60^\circ\text{C}$  i tre minuter, följt av kylning och torkning före lagring.

Behandlingens effektivitet varierade beroende på grödtyp, odlingsförhållanden och exponeringstid, med temperaturreglering säkerställd med hjälp av en fin termoindikator F-002DN. Experimentet mätte temperatur, relativ fuktighet och bevattning inuti och utanför ZECC:n. En digital termometer (Sato Shoji, 47SD) med fyra termoelement (Cromel-Alumel,  $0,3 \text{ mm } \phi$ ) användes för att registrera temperaturdata. Tre termoelement placerades i ZECC:ns övre, mellersta och nedre lager, medan ett fjärde mätte utomhustemperaturen. Temperaturen i mellanlagret användes som referens för den inre temperaturen. Den relativa fuktigheten inuti ZECC:n registrerades med en termohygrometer (Sato Shoji, HT-SD), som loggade data med en minuts intervall under 24 timmar, vilket gav 1440 mätpunkter för temperatur, fuktighet och bevattningsförhållanden (Islam & Morimoto 2012).

Vattenfördelningen hanterades genom tjugo lågtrycksdroppmunstycken, försörjda av en programmerbar flödesventil (Haikanbuhin VKK-15WAG), vilket säkerställde 50 liter vatten per dag för att bibehålla fuktnivåerna i sandlagret. Överskottsvatten dränerades bort effektivt.

Studien undersökte temperatur- och relativa fuktighetsprestanda hos Zero Energy Cool Chamber (ZECC) under olika förhållanden. Det visade sig att solstrålningen ökade både utomhus- och inomhustemperaturerna, men skugggardinen minskade värmeexponeringen avsevärt och hjälpte till att bibehålla lägre temperaturer. Under skuggning och bevattning nådde utomhustemperaturen en topp på 35,4 °C, medan inomhustemperaturen förblev på 16,5 °C. Den relativa fuktigheten inuti ZECC var i genomsnitt 90,6 %, med en maximal luftfuktighet på 98,6 % på grund av ökad avdunstning från sand och våta tegelstenar. Ytterligare experiment visade att vattning och skuggning tillsammans resulterade i den lägsta registrerade inomhustemperaturen på 9,6 °C, medan ingen skuggning och ingen vattning ledde till en maximal luftfuktighet på 34,6 °C. Vattning påverkade också dynamiskt temperatur och fuktighet, vilket orsakade betydande temperaturfall och luftfuktighetsökningar. Skugggardinen blockerade 60 % av solstrålningen och stabiliserade både inomhus- och utomhustemperaturer. Vattning förlängde kyleffekten, även om dess effektivitet var kortare under förhållanden utan skuggning på grund av direkt solexponering. Under sju dagar bekräftade dagliga temperatur- och luftfuktighetsmedelvärden att skuggningsridån minskade inomhustemperaturen, men den relativa luftfuktigheten förblev nästan konstant under olika skuggningsförhållanden se tabell 8 (Islam & Morimoto 2012).

Studien undersökte den fysiologiska vikt förlusten (PLW) hos tomater och auberginer som förvarades i silverjonbelagda behållare inuti ZECC, både med och utan varmvattenbehandling. Resultaten visar att varmvattenbehandling, i kombination med silverjonbelagda behållare och kopparkorn, minskade viktminskningen avsevärt och förlängde hållbarheten för både tomater och auberginer (Islam & Morimoto 2012).

Experimentet analyserade även effekterna av varmvattenbehandling och silverjonbelagda behållare på konservering av tomater och auberginer. Frukter som inte behandlades i varmt vatten ruttnade snabbare och uppvisade mörk färg och fläckar på grund av mikroorganismtillväxt och okontrollerad etylenproduktion, vilket accelererar mogningen. Däremot håll sig frukter som behandlades i varmt vatten och förvarades i silverjonbelagda behållare ljusare i färgen, eftersom behandlingen saktade ner mogningen och förbättrade deras kvaliteten genom att minska surhetsgraden och öka innehållet av lösliga fasta ämnen, glukos och sackaros (resultatet visas i figur 5). Varmvattenbehandling vid 45 °C i en timme (tomat) och 60 °C i tre minuter (aubergine) desinficerade fruktens yta men kunde inte helt förhindra förruttelse i sent rutning. Högtemperaturbehandling (60 °C för tomater) och mild temperaturbehandling (45 °C för aubergine) förbättrade termotoleransen och fördröjde mikrobiell skada. Silverjoner stör bakteriellt DNA och förhindrar mikroorganismtillväxt. Kopparkorn hämmade svampinfektioner samtidigt som de accelererade kylningsprocessen och minskade etylenproduktionen. Dessa kombinerade effekter förlängde hållbarheten och minskade den fysiologiska vikt förlusten (PLW) hos de lagrade frukterna (Islam & Morimoto 2012).

Resultaten visar att nollenergikylkammare (ZECC) är ett effektivt system för att sänka temperaturen och styra luftfuktigheten vid lagring av färsk livsmedel, särskilt i områden utan tillgång till elektricitet. Genom evaporativ kylning uppnåddes signifikanta

temperatursänkningar i den inre kammaren, samtidigt som den relativa luftfuktigheten bibehålls på en hög nivå. Detta skapade termodynamiskt gynnsamma lagringsförhållanden för värmekänsliga produkter.

Systemets kylkapacitet berodde på synergier mellan skuggning, vattentillskott och materialval i konstruktionen. Jämfört med rumstemperaturlagring reducerades värmeöverföringen till produkterna, vilket bidrog till att minska vikt förluster till följd av avdunstning. Den termiska stabiliteten i ZECC möjliggjorde därmed en förlängd lagringstid utan aktiv energitillförsel.

Komplementära metoder som varmvattenbehandling och metallbelagda behållare användes för att ytterligare stabilisera den mikrobiella miljön, men den primära effekten på hållbarheten uppnåddes genom effektiv passiv kylning. Kombinationen av enkel evaporativ teknik och lågkostnadsdesign gör ZECC till en relevant lösning för energisnåla kylbehov i rurala miljöer. (Islam & Morimoto 2012).

#### **4.6 En värme och masstransportmodell av lerkrukors evaporativa kylare för grönsakslagring**

Denna studie behandlar både större och mindre lerkruskylare som nyttjar evaporativ kylning för att reducera temperaturer i den inre lerkrukan och därigenom förlänga hållbarheten för grönsaker. Evaporation sker genom att vatten i sanden diffunderar genom lerkrukorna, vilket ökar den relativa luftfuktigheten i den inre kammaren samtidigt som den yttre krukan avdunstar. Enligt denna studie saknar modeller som fungerar ungefär på samma princip och använder samma kylteknik experimentell validering och förutsätter ofta konstanta och förenklade miljöförhållanden som inte speglar verkliga driftförhållanden, brister finns även i hanteringen av värmeöverföringar särskilt radiativ värmeväxling samt i korrekt uppskattning av vattenavdunstningshastigheter. (Rehman, McGarrigle, Glicksman & Verploegen 2020)

I denna studie presenteras ett transportmedel som har validerats experimentellt med data från fältstudier utförda i Mali och Rwanda. Sensorbaserade mätningar av omgivningstemperatur, relativ luftfuktighet, temperaturen och luftfukten i den inre kammaren och omgivningen samt sandfukt har använts för att kalibrera och verifiera modellen. Modellen är anpassad för mindre skala lerkruskylare, men parametrastudier inom ramen för arbetet ger också insikter som kan användas för optimering av större system. (Rehman et al. 2020)

En systemmodell för två olika geometrier av lerkruskylare, "lera-i-lera" (pot-in-pot) och "lera-i-plastfat". (pot-in-dish), förslås i studien, både modellerna representeras som koncentriskt cylindriska kroppar i kontakt, vilket motsvarar den övergripande formen hos de verkliga enheterna. Trots att de verkliga krukorna uppvisar avsmalningar antogs i modellen idealiserade, vertikala cylindrar för att förenkla beräkningarna. Varje delområde i modellen motsvarar specifik sektion och material, markerad med siffror. (Rehman et al. 2020)

Energi-balansen i systemet baseras på första lagen i termodynamiken och tillämpas på varje delvolym inom kylsystemet. Varje delsektion antas ha enhetlig temperatur, vilket möjliggör användning av lumped parametermodellering. Energi-balansen i studien uttrycks enligt

$$\frac{d}{dt}(\rho_i v_i c_{v,i} T_i) = \sum \dot{Q}_{in} - \sum \dot{Q}_{out} \quad (3.4)$$

Värme-flödarna in och ut inkluderar ledning, edning, konvektion, strålning samt entalpin från avdunstande vatten. För konvektionen används empiriska korrelationer baserade på Nussel och Sherwoodtal, medan luftens egenskaper beräknas för varje tidssteg utifrån omgivningstemperatur och fuktighet. I system med grönsaker modelleras innerkammaren som två separata sektioner, fuktig luft och grönsaker. Deras termiska massor bestäms utifrån specifika materialdata. Temperaturen i varje del initieras vid termisk jämvikt med uppmätt kammartemperatur. (Rehman et al. 2020)

Massbalansen beskriver transporten av vatten i systemet och bygger på antagandet att ingen nettoförlust sker annat än genom avdunstning. Den totala vattenmängden i systemet definieras i mol och dess förändring uttrycks som

$$\frac{dNH_2O}{dt} = - \sum_{i=1}^{N_s} N''_{evap,i} A_{evap,i} \quad (3.5)$$

Det antas att all sand och tyg är mättade initialt, och mängden lagrat vatten beror på deras porositet och volym. Diffusiv transport inom sanden negligeras, med hänvisning till fältdata som visade konstant hög fukthalt i sanden under hela experimentet. Vattenproduktion från växttranspiration uteslöts på grund av den höga relativa luftfuktigheten i inre kammaren (Rehman et al. 2020).

En strålningsmodell utvecklades för att efterlikna de verkliga miljöförhållandena i vilka lerkylare typiskt används, främst inomhus. Inomhustemperaturer från ett strålningsperspektiv skiljer sig från omgivningstemperaturen. Modellen tar hänsyn till radiativt värmeutbyte mellan enhetens yta, tak, väggar och golv. Dessa ytor benämndes som "o" (tak och väggar), "g" (golv) och "s" (enhetens yta). Jordytan modellerades som adiabatisk, och alla ytor betraktades som diffusa gråa strålare. Emissiviteten för varje yta hämtades från litteraturen, och vyfaktorer beräknades med förenklade geometriska antaganden:

$$\frac{F_{so}}{F_{sg}} = \frac{A_o}{A_g} \quad (3.6)$$

Systemet löstes iterativt i varje tidssteg med hjälp av energi-balans-ekvationerna, där temperaturerna för tak och väggar beräknades utifrån långvågsstrålning, kortvågsstrålning och

konvektion. Den effektiva himmelstemperaturen, som påverkar den långvågiga strålningen till tak och väggar, beräknades enligt Berdahl och Martins korrelation för heta och torra klimat:

$$T_{sky} = CC(0,711 + 0,56[a + 0,73a^2]^{0,25})T_{\infty} \quad (3.7)$$

Den kortvågiga strålningen som absorberas av tak och väggar beräknades som en funktion av absorptiviteten och klimatdata från Mali. Rumsmodellen antogs vara en kubisk struktur med aluminiumtak 3,5 m i höjd och 0,02 cm tjocklek. Emissivitetvärden på 0,02 för tak och 0,7 för väggar användes (Rehman et al. 2020).

Pot-in-pot-systemet visade i genomsnitt en daglig vattenförbrukning på 1,96 L, medan pot-in-dish-systemet förbrukade 2,85 L per dag. Pot-in-pot-konfigurationen uppnådde dessutom högre kylverkningsgrad tack vare större effektiv avdunstningsyta och förbättrad vattenfördelning i konstruktionen. Kylverkningsgraden ökade med vindhastigheten för båda systemen, dock med avtagande marginalnytta vid vindhastigheter över 3 m/s.

En ökning i mängden grönsaker i innerkammaren hade liten påverkan på vattenförbrukningen men försämrade kylverkningsgraden något. Större system visade förbättrad kylverkningsgrad, där större avdunstningsytor kompenenserade för den ökade termiska massan (Rehman et al. 2020).

En viktig komponent i pot-in-pot-enheterna var tyglocket, vars våta tillstånd bidrog med cirka 32 % av den totala kylkapaciteten. När tyglocket var torrt förlorades upp till 72 % av kylkapaciteten. För pot-in-dish-enheter bekräftade kapillärmodelleringen att cirka 60 % av den inre lerytan deltog i aktiv avdunstning, i enlighet med fältobservationer.

Systemets inre kammare uppnådde temperaturer 2–3 °C under omgivningens, vilket skapade en sval och fuktig miljö gynnsam för förvaring av känsliga grönsaker såsom tomat, sallad och aubergine. Denna temperatursänkning är tillräcklig för att bromsa nedbrytningen av färska livsmedel och därmed förlänga hållbarheten. Studien bekräftar därmed evaporativ kylningens potential som ett hållbart alternativ i regioner utan tillgång till elektrisk kylning, med möjlighet att minska de omfattande skördeförlusterna på 30-50 % som ofta förekommer i utvecklingsländer(Rehman et al. 2020).

## 4.7 Innovative composite wall designs for evaporatively cooled structures for storage of perishables

Studien introducerar problemet med stora förluster av frukt och grönsaker i Indien upp till 30% på grund av dålig lagring och evaporativ kylning har identifierats som en lösning. Det har skapats tre olika modeller som fungerar med evaporativ kylning. Det finns tre prototyper som konstruerade, BSB Brick-Sand-Brick, PC Pervious Concrete och MSF Mesh Supported Fabric. Varje struktur var 1x1x0.9m och fylldes med 100 kg vatten i PET flaskor för att simulera frukter. Temperaturer loggades kontinuerligt med koppar konstanta termoelement. En 40 W glödlampa simulerade respirationsvärme (Chopra & Beaudry 2018).

Utöver detta mättes även omgivningstemperatur och relativ fuktighet. Temperaturdata samlades in kontinuerligt var 15:e minut under två veckorsperioder. Systemet drevs av ett 12-volts batteri som laddades dagligen med en solpanel på 60 watt vilket möjliggjorde oberoende drift utan extern elförsörjnings. Under försök perioden noterade stora variationer i omgivningsklimat. Dagtidstemperaturen låg i genomsnitt omkring 39°C, medan nattetemperaturen sjönk till cirka 27°C. Relativ fuktighet varierade från 70% under dagen till nära mättnad nattetid. Särskilt noterbart var att regnfall under studietiden påverkade förhållandena i form av ökad luftfuktighet och därmed reducerade avdunstning effekt. Detta skapade realistiska tropiska förhållanden och gav möjlighet att utvärdera dessa kylförhållanden(Chopra & Beaudry 2018).

De insamlade temperaturdata analyserades för att utvärdera skillnader i kylförmåga mellan konstruktionerna. Speciellt fokus på låg strukturers förmåga att dra nytta av lägre nattliga temperaturer samt på hur snabbt inomhustemperaturen kunde reagera på yttre klimatförändringar. Genom att jämföra produktens medeltemperatur i respektive struktur kunde slutsats dras om termisk effektivt, isoleringsförmåga och värmeförlust (Chopra & Beaudry 2018).

De experimentella resultaten visade tydliga skillnader i temperaturprestanda mellan de tre testade evaporativt kylda strukturerna. Temperaturdata från insamlade mätpunkter indikerade att MSF-strukturen uppvisade den lägsta genomsnittliga temperaturen för den simulerade produkten under hela mätperioden. I jämförelse med den traditionella BSB-konstruktionen som representerade den konventionella standarden, presterade både MSF och PC betydligt bättre vad gäller att sänka och bibehålla produktens temperatur inom det önskade intervallet för intervall för förvaring av lättfördärliga livsmedel (Chopra & Beaudry 2018).

Medeltemperaturen i BSB-strukturen uppmättes till  $34.4 \pm 0.63^\circ\text{C}$  vilket låg nära de högsta dagstemperaturerna under perioden. Detta tyder på att dess höga termiska massa agerade som ett värmelager snarare än som en isolerande buffert. PC-strukturen höll en medeltemperatur på  $31.8 \pm 0.40^\circ\text{C}$  vilket innebär en temperaturreduktion på cirka  $2,6^\circ\text{C}$  jämfört med BSB. Den största sänkning observerades i MSF-strukturen som bibehöll en medeltemperatur på  $30.9$

$\pm 0.46^{\circ}\text{C}$  motsvarade en förbättring på cirka  $3.5^{\circ}\text{C}$  jämfört med BSB. Denna temperaturskillnad är signifikant i sammanhanget av lagring av frukt och grönsaker, där även små variationer påverkar hållbarhet och kvalitet (Chopra & Beaudry 2018).

Sammantaget visar resultaten att MSF-strukturen har den högsta termiska responsiviteten och mest effektiva passiva kylförmågan i ett tropiskt klimat, särskilt under förhållanden med varierande luftfuktighet. PC erbjuder också förbättringar över den traditionella BSB-strukturen, men dess prestanda påverkas fortfarande av dess jämförelsevis högre termiska massa. BSB visade sig vara minst effektiv båda i absoluta temperaturmätningar och i dynamisk anpassningsförmåga till omgivningens kylcykler (Chopra & Beaudry 2018).

## **4.8 Framväxande passiva kyltekniker och deras tvärvetenskapliga tillämpningar**

Emerging Passive Cooling Technologies and Their Multidisciplinary Applications är en studie som belyser de grundläggande principerna och designstrategierna för framväxande passiva kylteknologier, såsom fasändringsmaterial (PCM), strålningskylning och evaporativ kylning. Särskild vikt läggs vid deras mångsidiga tillämpningar, från bevarande av biologiskt material till kylning av byggnader, elektronik och personliga klädesplagg. De passiva kylmetoder som presenteras i studien erbjuder betydande kostnadsbesparingar genom lägre underhålls- och driftskostnader samt genom generellt enklare konstruktioner av den enkla anledningen att ingen energiförbrukning behövs och de kräver bara lite underhåll. Dessa egenskaper gör teknologierna attraktiva för hållbara och energieffektiva lösningar inom flera sektorer. Passiva kyltekniker fungerar på olika sätt och har olika funktion principer för att uppnå samma mål, evaporativ kylning (EC) ökar vattenånghalten i luften vilket gör att den producerar kallare luft, medan fasändringsmaterial (PCM) absorberar, lagrar och frigör värme genom att ändra fas och strålningskylning (RC) avleder värme från inomhusluften till natthimlen genom att använda infraröd strålning (Nqoro, Taziwa, Hasheni & Solomon 2025).

Dessa teknologier har haft stor betydelse för att möta det stora kylbehovet och har fått stor uppmärksamhet inom många områden som termisk vetenskap och teknik, medicin, miljövetenskap, byggnad och värmehantering samt materialvetenskap. Detta leder till en stor utveckling i personlig komfortkylning, byggnadens kylning, batterikylning, solcellsanläggningar (PV), datacenter, flexibel elektronik, takkylning, kylning av elfordon, grafikkort i bilar, samt konservering av livsmedel och kemikalier (Nqoro et al. 2025).

## 4.9 Cellulosabaserad strålningskylning och solvärme

### Drivkraft för joniska termoelektriska material

Cellulosabaserad strålningskylning och solvärmning driver joniska termoelektriska system är en studie som undersöker ett naturligt kylsystem baserat på cellulosa, ett biobaserat material som utvinns från växter. Cellulosa utmärker sig genom sina gynnsamma fysikaliska och kemiska egenskaper samt sin anpassningsbarhet, vilket gör att den har ett brett användningsområde inom olika tekniska tillämpningar, såsom kylning av material och livsmedel. En av de mest intressanta aspekterna med cellulosa är dess optiska egenskaper; eftersom cellulosa inte absorberar synligt ljus kan materialet användas för att skapa tunna skikt som är genomskinliga, dimhöljda (diffusa) eller reflekterande. Dess egenskaper öppnar upp för innovativa tillämpningar inom passiva kylsystem, där värmeavledning sker utan extern energitillförsel. (Liao et al. 2023).

Cellulosa är ett av ämnena som har molekylära vibrationer och på grund av dessa vibrationer kan materialet absorbera infraröd strålning (värmestrålning). Enligt Kirchhoffs lag är ett materials förmåga att absorbera värme kopplad till dess förmåga att avge värme, och därför kan cellulosa sända ut värmestrålning och användas i ett passivt kylsystem, särskilt i det mellersta infraröda området (8–14 mikrometer), det område där jorden kan stråla ut värme till rymden.

Denna egenskap gör att materialet är användbart i radiativ kylning (strålningskylning) vilket är en metod där objekt kyls ner naturligt genom att skicka ut värme till rymden utan att behöva el eller energi. I en forskning visades att cellulosa kan användas för att reflektera ljuset, minska uppvärmning från solen och samtidigt sända ut värmestrålning, vilket leder till temperaturer under omgivningens (så kallad subambient cooling), även mitt på dagen (Liao et al. 2023).

En forskning på cellulosa genomfördes där cellulosacetatbaserade porösa spridande skikt designades för att kombinera låg absorption av solinstrålning med hög emissivitet i det mellersta infraröda spektrumet. Genom att utnyttja mikroporösa strukturer kan dessa filmer effektivt sprida och reflektera bort solens strålar, vilket minimerar värmeuppbyggnad orsakad av solinstrålning. Samtidigt gör deras höga termiska emissivitet ett starkt utsändande av infraröd strålning. Fälttester under verkliga miljöförhållanden visade att dessa filmer kan uppnå temperaturer cirka 5 °C lägre än den omgivande lufttemperaturen, både under dag- och nattsikt, och uppskattades kunna nå genomsnittliga minitemperaturer på 7–8 °C under omgivningstemperaturen (Liao et al. 2023).

Resultatet bekräftar därmed filmens potential för passiv radiativ kylning utan extern energitillförsel. Denna teknik representerar ett lovande hållbart alternativ till konventionella kylsystem och kan bidra till att minska energiförbrukningen i framtida tillämpningar.

## 4.10 Radiativ kylning

Radiativ kylning, eller strålningskylning, är ett kylsystem som kan avleda värme ut i rymden utan att förbruka elektricitet, särskilt under nattens timmar. Under denna period är atmosfärens strålning utanför våglängdsområdet 4–85  $\mu\text{m}$  nästan försumbar. Däremot är solstrålningen under dagen mycket intensiv, särskilt inom våglängdsintervallet 0,3–2,4  $\mu\text{m}$ , vilket gör att radiativ kylning inte fungerar effektivt i dagsljus utan särskilda material (Nqoro et al. 2025).

För att uppnå god kylprestanda krävs material med hög solreflektans inom våglängderna 0,3–2,4  $\mu\text{m}$  för att reflektera bort solljus, samt hög emissivitet inom våglängdsområdet 8–13  $\mu\text{m}$ . Detta intervall sammanfaller med det så kallade atmosfäriska fönstret, där jordens atmosfär är mycket transparent för termisk strålning. Material med dessa egenskaper möjliggör effektiv värmeavledning från jorden ut i rymden, även under dagtid.

Strålningskylning är särskilt väl lämpad för användning i energieffektiva byggnader, solpaneler, kläder, vätskekylning och livsmedelsförvaring. I en studie kunde mikrosfärbeläggningar med en partikelradie på 0,5 mikrometer generera en nettokylkraft på 80  $\text{W}/\text{m}^2$ , med en solreflektans på 0,986 och en tjocklek på 300 mikrometer.

Samma studie visade att ett tvålagigt gelmaterial, styrt av temperatur och förstärkt med nano partiklar av aluminiumoxid, effektivt kunde avleda värme och sänka temperaturen med cirka 5 °C (Nqoro et al. 2025).

## 4.11 Fasändringsmaterial

Fasändringsmaterial eller PCM är en kylteknik som använder vissa material som termiska energi lager och fungerar genom att lagra eller frigöra latent värme när de bryter form, det vill säga fasen ändras som till exempel från fast eller flyttande form eller tvärtom. När en fas byte sker i materialen (stelnar eller smälter) i samband med den förändringen absorberar värme vilket gör att den tekniken kan användas för kylning. Kylningsprocessen i den tekniken sker oftast i tre steg och dem är:

- **Laddning:** det steget sker när temperaturen sjunker då stelnar PCM-materialet och avger värme till omgivningen.
- **Lagring:** när det är i stelnat form så fungerar det som ett värmelager så den lagrar värmen inne i sig.
- **Urladdning:** när temperaturen stiger igen så smälter PCM-materialet och när det sker så absorberas värmen från luften vilket gör att omgivningstemperatur sjunker.

PCM-materialet håller alltid temperaturen vid materialets smältpunkt. Vid kylning av byggnader brukar det användas material med smältpunkt runt 22°C

Att använda fasändringsmaterial som kylmetod är en smidig kylteknik eftersom det minskar behovet av luftkonditionering, sparar energi och minskar elförbrukning. Men vissa egenskaper måste finnas i materialet för att det ska räknas som PCM-material och kunna användas i den kylmetoden. Materialet ska ha en lagom och rimlig smältpunkt, termisk

konduktivitet (hur snabbt det leder värme) måste beaktas samt hur mycket värme materialet kan lagra (Nqoro et al. 2025).

Kylning med hjälp av PCM-material undersökts där användes ett kommersiellt PCM som heter paraffin RT28HC och tillverkades olika typer av PCM-materialet, två RT28HC-prover bereddes, ett blandat med kopparskum och det andra med grafen-nano plattor och både materialet hade smältpunkten  $27,7^{\circ}\text{C}$  samt var anpassade till inomhuskylning i tropisk klimat, resultatet var acceptabelt, men inte imponerande för att kompositen med grafen kunde behålla en stabil temperatur på ungefär  $29,5^{\circ}\text{C}$  i lite mer än 6 timmar medan den med kopparskum höll samma temperatur fast i 5 timmar (Nqoro et al. 2025).

I en annan forskning utvecklades kylplattor fyllda med ett PCM som heter RT5, med en ganska låg smältpunkt på  $4,96^{\circ}\text{C}$ . Det här materialet var tillverkat just för kylning av känsliga livsmedel under transport, och resultatet var imponerande. Trots att temperaturen utomhus varierade mellan  $13^{\circ}\text{C}$  och  $35^{\circ}\text{C}$  kunde RT5 hålla den stabil i ungefär 96,4 timmar (Nqoro et al. 2025).

#### 4.12 Temperatur och energiberäkningar för kylsystem

Beräkningar för att fastställa kylbehovet i ett fukt rum har utfört baserat på evaporitiv kylning. Ekvation 3.1 visar energin som krävs för att sänka temperaturen på fukten. Vidare visar ekvationen 3.2 energin som frigörs vid avdunstning av 1 liter vatten. Ekvation 3.3 används för att beräkna hur mycket fruktmassa som kan kylas med denna vattenmängd. Skillnaden mellan torr och våt temperatur har visat sig ha stor påverkan på mängden frukt som kan kylas effektivt.

#### 4.13 Experimentella resultat för konstruktioner

I en studie från indein konstruerades tre olika strukturer för evaporitiv kylning: BSB(Brick-Sand-Brick), PC (Pervious Concrete) och MSF (Mesh Supported Fabric). Konstruktion och materialval visas i tabell 3 (Chopra & Beaudry 2018).

Strukturell design och materialets egenskaper för varje struktur

- BSB - Har termisk massa  $5804$  ( $\text{Wh}/^{\circ}\text{C}$ ) och U-värde  $2.01$  ( $\text{W}/\text{m}^2 * ^{\circ}\text{C}$ )
- PC - Har termisk massa  $749.7$  ( $\text{Wh}/^{\circ}\text{C}$ ) och U-värde  $4.12$  ( $\text{W}/\text{m}^2 * ^{\circ}\text{C}$ )
- MSF - Har termisk massa  $41.58$  ( $\text{Wh}/^{\circ}\text{C}$ ) och U-värde  $6.60$  ( $\text{W}/\text{m}^2 * ^{\circ}\text{C}$ )

Tabell 3 Konstruktion och materialval

Struktur	Vägmateriäl	Tak/golvmaterial	Byggteknik
BSB	Två tegelväggar + sandlager	Vanliga tegelblock	Traditionell
PC	Porös betong	AAC block	Ny konstruktion

<b>MSF</b>	Tyg på AAC block järntrådsram	Ny konstruktion
------------	----------------------------------	-----------------

AAC Block används i både PC och MSF för att minska värmeledning ( $\lambda \approx 0.12 \frac{W}{m \cdot K}$ )

Temperatur i simulerade vattenflaskor:

- BSB medeltemperatur är  $34.4 \pm 0.63^\circ\text{C}$
- PC medeltemperatur är  $31.8 \pm 0.40^\circ\text{C}$
- MSF medeltemperatur är  $30.9 \pm 0.46^\circ\text{C}$

#### 4.14 Resultat från jordkällare

Jordkällare uppehöll temperaturen på  $12\text{--}14^\circ\text{C}$  och RH på  $90\text{--}95\%$  vilket förlängde hållbarheten för rotfrukter med flera månader. Effektiviteten var dock starkt beroende av korrekt ventilation och isolering. (Ferber 2012)

#### 4.15 Temperaturdata från cellulosa och radiativ kylning

Cellulosabaserade filmar har uppnått temperatur cirka  $5^\circ\text{C}$  under omgivningstemperatur både dag och nattid.

Radiativ kylning med hög emmissivitet inom våglängden  $8\text{--}13\mu\text{m}$  och hög solreflektans visar på kylningseffekt ner till  $80 \text{ W/m}^2$  i studier. PCM-system lyckades bibehålla en stabil inomhustemperatur under längre tid än extern energitillförsel. Exempelvis höll PCM RT5 temperaturen runt  $5^\circ\text{C}$  över 96 timmar vid utomhustemperaturen på upp till  $35^\circ\text{C}$ . PCM-baserad kylning med paraffin RT28HC höll en stabil temperatur på  $29,5^\circ\text{C}$  i 6 timmar. (Nqoro et al. 2025)

#### 4.16 Modellresultat för lerkrukor, EPCC

Direkt evaporativ kylning med system som Zeer pots och modified earthen pot chamber (EPCC) sänkte temperaturen med  $5\text{--}10^\circ\text{C}$  och upprätthöll en relativ luftfuktighet (RH) på  $85\text{--}95\%$ . EPCC kunde minska fruktens fysiologiska viktförlust med upp till  $40\text{--}50\%$  jämfört med rumstemperatur. I vissa fall, som med auberginer, var skillnaden i viktförlust mellan EPCC och kylskåp mindre än  $1\%$ . EPCC visade hög fuktighet och kapacitet att bibehålla temperaturen och frukt för lagring. (A.J.A. Ranjit Singh 2007)

Tabell 4: Jämförelse mellan EWSS1, EWSS2 och EWSS3 (A.J.A. Ranjit Singh 2007)

Modell	EWSS1 Grundmodell	EWSS2 Modifierad Modell (Bäst)	EWSS3 pyramidmodell
<b>Struktur</b>	Dubbelkruka med våt sand	Enkel kruka med vattenringar	Skål + pyramidtäckte av lera
<b>Kylprincip</b>	Avdunstning via våt sand	Avdunstning via kapillärvattenföring i krokvägen	Luftcirkulation och formdesign
<b>Temp. Sänkning °C</b>	5–6°C	5 ± 2°C	3–4°C
<b>Luftfuktighet (%)</b>	80%	90 ± 3%	75%
<b>Kapacitet</b>	5 liter	8 liter	3 liter
<b>Hantering</b>	Tung, mindre praktiskt	Enkel hantering	Medel hantering
<b>Näringsbevarande</b>	Bra	Mycket bra, minsta förluster	Okej
<b>Utseende, smak</b>	Bra	Utmärkt	okej
<b>Lämplighet för hushållsbruk</b>	Begränsad	Hög, praktiskt för dagligt bruk	Bättre för specifika behov

#### 4.17 Förvarningsdata för ZECC, PCM-system och evaporativ kylning

Zero Energy Cool Chamber (ZECC) som utnyttjar vattenavdunstning genom sand och reducerar temperaturen till 17–27°C under tropiska förhållanden och förlängde hållbarheten för potatis och tomater med upp till 15 dagar. (Rayaguru, Khan & Sahoo 2010)

PCM-system lyckades bibehålla en stabil inomhustemperatur under längre tid än extern energitillförsel. Exempelvis höll PCM RT5 temperaturen runt 5°C över 96 timmar vid utomhustemperaturen på upp till 35°C. PCM-baserad kylning med paraffin RT28HC höll en stabil temperatur på 29.5°C i 6 timmar. (Nqoro et al. 2025)

Tabell 5: Jämförelse mellan olika metoder för evaporativ kylning (Ndukwu & Manuwa 2014)

Faktor	Passiv direktkylning	Aktiv direktkylning	Indirekt/Tvåstegskylning
<b>Drivkraft</b>	Naturlig luftcirkulation	Elektriska fläktar/pumpar	Elektrisk energi för fläktar, pumpar och värmeväxlare
<b>Byggmaterial</b>	Lera, tegel, bambu, jute, sand, risstrå	Trä, isolering, kyl pads, fläktar	Värmeväxlare, två separata luftflöden, plattvärmeväxlare

<b>Temperatursänkning</b>	5–10°C underomgivnings temperatur	4–13°C underomgivnings temperatur	8–15°C underomgivnings temperatur
<b>Luftfuktighet</b>	90–95% RH	85–98% RH	50–75% RH
<b>Lagringskapacitet</b>	Låg till medel	Medel	Högt
<b>Lämplig för klimat</b>	Torra, blåsiga område	Klimatanpassning	Varierande klimat
<b>Underhåll</b>	Låg (men kräver vattenpåfyllning)	Medel, Kräver skötsel av fläktar, pumpar och pads.	Högt

Tabell 6: Fördelar och nackdelar för olika förändrings material (Ngoro et al. 2025)

	Organiska	Oorganiska	Eutektiska
<b>Exempel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alkohol</li> <li>• Esters</li> <li>• Fassty acids</li> <li>• Glykol</li> <li>• Paraffin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Salt hydrats</li> <li>• Metaller</li> </ul>	Blandningar av: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Organisk-organisk</li> <li>• Organisk-oorganisk</li> <li>• oorganisk-oorganisk</li> </ul>
<b>Fördelar</b>	Brett smältpunktsintervall, fysisk och kemisk stabilt etc.	Hög smältvärme, icke-brännbar etc.	latent billig, Ingen underkylning, eller varmehöghet, etc.
<b>Nackdelar</b>	Mycket brandfarliga, värmeförledningsförmåga, etc.	Dålig kärnbildningsförmåga, läckage under fasövergång	Låg värmeledningsförmåga, läckage under fasövergång, etc.

Tabell 7: Utan varmvattenbehandling (Islam & Morimoto 2012)

Grönsak	Förvaringsplats	Viktförlust (%)	Dagar vikt förlust	till Kommentar
<b>Tomat</b>	Utanför ZECC	5,4%	7 dagar	-
<b>Tomat</b>	Inuti ZECC	5,35%	16 dagar	Förbättrad hållbarhet
<b>Aubergine</b>	Utanför ZECC	5,98%	4 dagar	-

<b>Aubergine</b>	Inuti ZECC	5,01%	9 dagar	Förlängd färskhets
------------------	------------	-------	---------	-----------------------

Tabell 8: Med varmvattenbehandling, silverbelagda behållare och kopparkorn (Islam & Morimoto 2012)

Grönsak	Behandlingstemperatur	Behandlingstid	Viktförlust (%)	Dagar till viktförlust	Förmultning	Kommentar
<b>Tomat</b>	45 °C	1 timme	1,01%	12 dagar	Dag 9–12	Låg viktförlust men ruttnade innan viktförlust var slut
<b>Aubergine</b>	45 °C	Ej specificerad	5,01%	15 dagar	Dag 14–15	God hållbarhet
<b>Tomat</b>	60 °C	3 minuter	5,14%	28 dagar	Dag 26–28	Förblev fri från förmultning länge
<b>Aubergine</b>	60 °C	Ej specificerad	1,98%	10 dagar	Dag 8–10	Låg viktförlust, men tidig förmultning

#### 4.18 Jämförelse av passiva kyltekniker

Tabell 9 visar en sammanfattad resultat av dem olika passiva kylmetoder och hur dem olika tekniker påverkar temperaturen och luftfuktigheten samt visar fördelarna och nackdelarna som metoderna har.

Tabell 9: Jämförelse av passiva kyltekniker

Teknik	Temp.Reduktion(°C)	Luftfuktighet(%)	Fördelar	Nackdelar
<b>ZECC</b>	6–10	90–95	Låg kostnad, lokal tillgänglighet	Fungerar sämre i fuktigt klimat
<b>EPCC</b>	5–8	85–95	Enkel konstruktion	Begränsad kapacitet
<b>PCM</b>	Upp till 5	Ej påverkan	Jämn temperatur, långvarig kyla	Dyrt material, begränsad kyltid
<b>Radiativ Kylning</b>	3–7(nattid)	Ej påverkan	Kan fungera dag/natt	Effektivitet beronde av material och väder
<b>Jordkällare</b>	Håller 12–14°C	85–95	Naturligt klimat	Ej mobil, kräver viss konstruktion

<b>Cooling blanket</b>	3–6°C	60–70	Lätt att använda, portabel	Begränsad livslängd
<b>Evaporativ kylning-direkt</b>	4–10	85–95	Billig, enkel att bygga	Kräver vatten och ventilation
<b>Evaporativ kylning-indirekt</b>	5–8°C	Ej relevant	Förbättrad temperaturkontroll	Komplex konstruktion
<b>Evaporativ kylning-tvåsteg</b>	6–9°C	Ej relevant	Hög verkningsgrad, stabil kyla	Dyr, tekniskt avancerad

#### 4.19 Beräkning av kylkapacitet i ZECC-system

För att konkretisera den teoretiska förståelsen och visa ingenjörsmässig tillämpning genomfördes en beräkning av kylkapaciteten i ett ZECC-system baserat på antaganden från litteraturen.

Beräkningen av energi som krävs för kylning av fruktmassa, utgörs från följande förenklade energibalans:

$$Q = m * c * \Delta T$$

##### Exempel:

- Massa frukt: 10kg
- Temperaturreduktion: från 30°C till 20°C →  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$
- Specifik värmekapacitet: 3,6kJ/kg\*°C

$$Q = 10 * 3.6 * 10 = 360\text{kJ}$$

Alltså krävs 360kJ för att kyla 10kg frukt med 10°C

##### Kylpotential via evaporativ kylning

Avdunstning av vatten absorberar värme. Latenta värmets (förångningsentalpi) för vatten vid 30°C är cirka 2400kJ/kg.

$$\text{Mängden vatten som behövs: } \frac{360}{2400} = 0,15\text{kg} = 150\text{ml}$$

För att kyla 10 kg frukt med 10°C krävs endast 150ml avdunstat vatten, vilket visar den höga energieffektiviteten hos ZECC.

Beräkningen bekräftar att passiva system som ZECC, trots låg teknisk komplexitet har en hög teoretisk kylpotential. I verkligheten krävs dock mer vatten eftersom kylning även påverkar väggar, produkter och återkommande värmeinträngning. Avdunstning är inte 100% effektiv och det finns övriga förluster. Därför är vattenförbrukningen i verkliga ZECC-system ofta i intervallet 45–105 liter per dag vilket matchar försöksdata i studien från Orissa, Indien (Rayaguru, Khan & Sahoo 2010).

## 5. DISKUSSION

### 5.1 Implementering i större skala

Vid en storskalig implementering av passiva kylsystem uppstår flera praktiska utmaningar och möjligheter. Även om teknologierna har visat god effektivitet i mindre skala och experimentella miljöer, kräver bred tillämpning att vissa grundförutsättningar uppfylls.

Tillgång till vatten är avgörande för system som bygger på evaporativ kylning, särskilt i områden där vattenbrist redan är ett problem. Lösningar som pot-in-pot eller ZECC kräver daglig påfyllning av vatten, vilket kan vara opraktiskt i torra regioner utan stabil vatteninfrastruktur.

Klimatanpassning är en annan faktor. Vissa tekniker fungerar bäst i torra och varma miljöer (t.ex. evaporativ kylning), medan andra som radiativ kylning är mer effektiva nattetid och kräver avancerade material för dagtidsanvändning. Detta innebär att valet av teknik måste skräddarsys efter lokal klimatprofil.

Ekonomiska aspekter är både en möjlighet och en begränsning, flera av teknikerna är lågteknologiska och billiga att bygga, ofta med lokalt tillgängliga material. Dock kan initial investering, arbetskraft och underhåll utgöra hinder för vissa samhällen, särskilt i avlägsna eller fattiga områden.

Underhåll och teknisk kompetens behövs för system som kräver daglig drift, t.ex. fyllning av vatten eller hantering av ventilationsflöden. Utbildningsinsatser kan därför vara nödvändiga för att säkerställa långsiktig funktionalitet.

Hållbarhet över tid är också en nyckelparameter. Många passiva system visar god prestanda initialt, men deras livslängd beror på materialets slitstyrka och lokala miljöpåverkan som fukt, mögel eller erosion.

Det krävs storskalig implementering av passiva kylsystem att man anpassar designen till lokala förhållanden, säkerställer vattenförsörjning, tillhandahåller utbildning och följer upp funktionalitet över tid. Med rätt stöd och lokalanpassning finns stor potential att förbättra livsmedelshållbarhet och minska energianvändning i tropiska regioner.

Resultat visar att olika passiva kylmetoder uppnår märkbara temperatursänkningar och bevarar hög luftfuktighet, vilket är avgörande för livsmedelslagring i tropiska klimat.

MSF-strukturen uppnådde den lägsta medeltemperaturen, vilket indikerar att den har högst kylningsförmåga av de tre testade konstruktionerna. Detta gör MSF till den mest effektiva lösningen bland alternativen i studien från Indien.

Jordkällaren, med sin förmåga att hålla stabil temperatur och hög luftfuktighet under längre perioder, är särskilt väl lämpad för långtidslagring utan elbehov.

Radiativ kylning visade sig fungera bäst nattetid, vilket begränsade dess användning under dagtid utan avancerade material.

Pot-in-pot-systemet var effektivt i fältförsök, särskilt tack vare dess tyglock som bidrog väsentligt till kylning. Det är särskilt användbart i miljöer med god tillgång till vatten och luftcirkulation.

ZECC visade sig kunna ge en stabil förvaringsmiljö för frukt och grönsaker, med avsevärd förlängning av hållbarhet och reducerad PLW. EPCC visade liknande egenskaper, vilket gör dessa lösningar attraktiva för användning i resurssvaga områden.

Sammanfattningsvis visar resultaten att flera passiva kyltekniker har stor potential för energieffektiv och hållbar livsmedelslagring i tropiska regioner. Teknikernas effektivitet påverkas dock av lokala klimatförhållanden, materialval och tillgång till vatten.

## 5.2 Återkoppling till syfte och frågeställningar

Syftet med detta arbete var att undersöka och jämföra olika passiva kyltekniker som används för livsmedelsförvaring i tropiska klimat, med fokus på effektivitet, temperaturprestanda och hållbarhetsaspekter. Vidare eftersträvades en jämförelse mellan passiva och aktiva kylsystem ur tekniska och miljömässiga perspektiv.

De resultat som har redovisats i detta arbete ger ett tydligt underlag för att besvara de formulerade forskningsfrågorna:

- **Vilka passiva kyltekniker lämpar sig för livsmedelshantering i tropiska klimat?**

Arbetet visar ett brett urval av tekniker, inklusive evaporativa kammare (BSB, PC, MSF), lerkrukor (pot-in-pot, pot-in-dish), jordkällare, radiativ kylning med cellulosebaserade filmer samt ZECC och EPCC-konstruktioner. Dessa metoder utnyttjar naturliga processer som avdunstning, jordens termiska massa och utstrålning av värme för att sänka temperaturen utan extern energi.

- **Vilken kylkapacitet och vilka temperaturprestanda uppvisar dessa system vid praktisk tillämpning?**

Kyleffekten och temperatursänkningen varierar mellan tekniker, Radiativ kylning har uppnått upp till 80 W/m<sup>2</sup>, medan evaporativa system som ZECC sänkt temperaturen med upp till 7 °C under omgivningens temperatur. Pot-in-pot har gett en reduktion på 2–3 °C jämfört med omgivningstemperaturen. Jordkällare uppnår 12–14 °C, ZECC cirka 27 °C från 34 °C, och

radiativ kylning runt 5 °C under omgivningstemperaturen. Cellulosabaserad kylning fungerar både dag och natt, medan några andra metoder kan vara klimatberoende.

- **Hur effektiva är passiva kylmetoder jämfört med aktiva kylsystem ur perspektiven energieffektivitet, hållbarhet och elbristområden?**

Passiva kylmetoder har i studien visat sig vara effektiva alternativ till aktiva kylsystem, särskilt i tropiska områden där tillgången till elektricitet är begränsad eller obefintlig. Tekniker som Zero Energy Cool Chamber (ZECC), Modified Earthen Pot Cool Chamber (EPCC), PCM system och radiativ kylning har demonstrerat god förmåga att sänka lagringstemperaturen och bevara livsmedel över längre tid, utan att vara beroende av el. Exempelvis kunde ZECC systemet sänka temperaturen från 34 °C till 27 °C samtidigt som den relativa luftfuktigheten hölls över 90 %, vilket är tillräckligt för att bromsa nedbrytningsprocesser och minska vikt förlust hos grönsaker. PCM-lösningar som RT5 visade dessutom en kapacitet att hålla temperaturen under 5 °C i upp till 96 timmar, vilket gör dem särskilt användbara för transport av känsliga livsmedel.

Jämfört med aktiva kylsystem, som har högre kylkapacitet och exakt temperaturkontroll, är de passiva metoderna inte lika kraftfulla. Däremot är deras stora fördel att de inte kräver elektricitet, köldmedier eller mekaniska komponenter som kompressorer, vilket gör dem mycket mer energieffektiva. Eftersom

Systemen som till exempel i regel byggs med naturmaterial som lera, halm och sand, är de också betydligt mer hållbara ur miljösynpunkt. De genererar inga växthusgasutsläpp under drift och har mycket låga livscykelkostnader.

I elbristområden utgör dessa tekniker ett av få realistiska alternativ för att förlänga livsmedelshållbarhet. De är enkla att konstruera, kostnadseffektiva, och kräver minimalt underhåll, vilket gör dem särskilt lämpliga för landsbygdsbefolkning och småskaliga jordbrukare. Även om de inte kan ersätta aktiva system i alla sammanhang, är deras funktionalitet tillräcklig i många tropiska miljöer och de bör betraktas som ett hållbart komplement i globala kylstrategier.

- **Vilka potentiella risker och begränsningar finns med att tillämpa passiva kylsystem, särskilt i klimat med hög luftfuktighet?**

Studien visar att hög luftfuktighet kan försämra effektiviteten hos evaporativa kylsystem, vilket innebär att klimatet är en avgörande faktor mer eller mindre för olika passiva kylsystem. Varje passivt kylsystem har egna begränsningar och bör ha specifika omständigheter för att ge en hög effektivitet. Viktigt att notera är att temperaturkontrollen är mindre exakt än hos aktiva system, vilket kan påverka livsmedelssäkerheten.

## 6. SLUTSATS

Denna studie visar att evaporativ kylning, särskilt i form av pot-in-pot-system, är en av de mest effektiva passiva metoderna för att sänka temperaturen vid livsmedelsförvaring i tropiska klimat där tillgång till el saknas. Metodens effektivitet påverkas dock av omgivande luftfuktighet och förmågan att upprätthålla god ventilation.

Materialval och konstruktion har stor inverkan på kylprestandan. Porösa och fukthållande material såsom lera eller sand förbättrar avdunstningen, medan isolerande komponenter bidrar till att stabilisera temperaturen. Lokalt tillgängliga material ger fördelen av låg kostnad, men kan behöva kompletteras med tekniska förbättringar för optimal effekt.

Genom att kombinera evaporativ kylning med exempelvis jordkylda lagringsutrymmen kan både snabb nedkylning och långvarig temperaturhållning uppnås. Detta ger ett robust och skalbart alternativ för matförvaring i låginkomstmiljöer med begränsade resurser.

## 7. REFERENSER

A.J.A. Ranjit Singh, M. M. (2007). Department of science and technology technology systems development program project progress report. s. 66.

BrenntagNordic, C., EnergyTechnology, KTH, Frigotech, ICT, IVT, Kemetyl, NIBE, Nowab, KTF, Stainless Eng., Temper, WICA, WILO, Benny Ekman, Eric Granryd, Tommy Nilsson, Lennart Rolfsman. (2025). Handbook on indirect refrigeration and heat pump systems. I: Åke Melinder, D. o. E. T., KTH (red.).

Burca, J. D. (2023). *Förstå passiv kylning och naturlig ventilation*. <https://constructive-voices.com/sv/passiv-kylning-och-naturlig-ventilation-traditionella-tekniker-f%C3%B6r-modern-design/> [2025-04-01]

Cai, S. & Gou, Z. (2024). Towards energy-efficient data centers: A comprehensive review of passive and active cooling strategies. *Energy and Built Environment*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2024.08.009>

Chiesa, G., Grosso, M., Pearlmutter, D. & Ray, S. (2017). Advances in adaptive comfort modelling and passive/hybrid cooling of buildings. *Energy and Buildings*, 148, s. 211-217. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.012>

Chopra, S. & Beaudry, R. (2018). Innovative composite wall designs for evaporatively cooled structures for storage of perishables. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 88, s. 1692-1695. doi:10.56093/ijas.v88i11.84895

Defraeye, T., Shoji, K., Schudel, S., Onwude, D. & Shrivastava, C. (2023). Passive evaporative coolers for postharvest storage of fruit and vegetables: Where to best deploy them and how well do they perform. *Frontiers in Food Science and Technology*, Volume 3 - 2023. doi:10.3389/frfst.2023.1100181

Energimyndigheten (2022). *Vitvaror* <https://www.energimyndigheten.se/effektiv-energianvandning/hushall/nar-du-ska-kopa-nya-produkter/vitvaror/#:~:text=En%20kombinerad%20kyl%20och%20frys,effektiva%20kompressor%20och%20tjockare%20isolering> [[2025-04-25]]

Ferber, S. (2012). Root cellars rock food skills workshop. Root Cellars Rock

Hajdu-Rafis, A.-C. (2017). Länge leve jordkällaren. s. 9.

Islam, M. & Morimoto, T. (2012). Zero energy cool chamber for extending the shelf-life of tomato and eggplant. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 46, s. 257-267. doi:10.6090/jarq.46.257

Johnson, A. (2024). *Carl munters and baltzar von platen refrigerator* <https://www.prv.se/sv/kunskap-och-stod/skola/uppfinnare-fran-sverige/carl-munters-och-baltzar-von-platen-kylskapet/> [2025-04-28]

kommun, H. (2020). *Håll rätt temperatur*.  
<https://www.harryda.se/download/18.446cba66182e9265b811513/1661948484793/H%C3%A5ll%20r%C3%A4tt%20temperatur.pdf> [2025-04-11]

Liao, M., Banerjee, D., Hallberg, T., Åkerlind, C., Alam, M. M., Zhang, Q., Kariis, H., Zhao, D. & Jonsson, M. P. (2023). Cellulose-based radiative cooling and solar heating powers ionic thermoelectrics. *Advanced Science*, 10(8), s. 2206510.  
doi:<https://doi.org/10.1002/advs.202206510>

moircooling (2024). *Active thermal managment solution*. <https://moircooling.com/whats-active-cooling-active-cooling-vs-passive-cooling/> [2025-04-22]

Munusamy, M., Ranjith, S. A. J. A. & Sankarapandian, V. (2011). Evaluation of self-life and organoleptic aspects of fruits stored in a modified traditional earthen pot cool chamber. *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 10, s. 375-379.

Ndukwu, M. C. & Manuwa, S. I. (2014). Review of research and application of evaporative cooling in preservation of fresh agricultural produce. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 7(5), s. 85-102.

Nqoro, X., Taziwa, R., Hasheni, T. & Solomon, G. (2025). Emerging passive cooling technologies and their multidisciplinary applications: An integrative review. *International Journal of Energy Research*, 2025. doi:<https://doi.org/10.1155/er/3489021>

Rayaguru, K., Khan, M. & Sahoo, N. (2010). Water use optimization in zero energy cool chambers for short term storage of fruits and vegetables in coastal area. *Journal of food science and technology*, 47, s. 437-41. doi:10.1007/s13197-010-0072-7

Rehman, D., McGarrigle, E., Glicksman, L. & Verploegen, E. (2020). A heat and mass transport model of clay pot evaporative coolers for vegetable storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 162, s. 120270.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120270>

Rio Jon, P. S., Vu Trong Duc Anh, Irma Ramadan (2024). Passive cooling strategies. ASEAN Centre for Energy.

Verploegen, E., Sanogo, O. & Chagomoka, T. (2018). *Evaluation of low-cost evaporative cooling technologies for improved vegetable storage in mali*.  
doi:10.1109/GHTC.2018.8601894

Wittkamp, T., Defraeye, T., Yegon, R. & Onwude, D. (2024). *Evaluating passive evaporative cooling blanket for improved postharvest storage of fruit and vegetables in low- and middle-income countries*. doi:10.31224/4250



# HÖGSKOLAN I BORÅS

Besöksadress: Allégatan 1 · Postadress: 501 90 Borås · Tfn: 033-435 40 00 · E-post: [registrator@hb.se](mailto:registrator@hb.se) · Webb: [www.hb.se](http://www.hb.se)