



SINTEF



Rapport

Energibruk i norske veksthus

Rapport for prosjektet "Energieffektiv klimakontroll for økt produktivitet i norske veksthus"

Forfatter(e):

Sigurd Sannan, SINTEF Energi AS

Knut Erik Enerstvedt, Gether AS

Helge Skarphagen, Gether AS

Rapportnummer:

2022:00331 - Åpen

Oppdragsgiver:

Forskningsmidlene for jordbruk og matindustri (FFL/JA)

Rapport

Energibruk i norske veksthus

Rapport for prosjektet "Energieffektiv klimakontroll for økt produktivitet i norske veksthus"

EMNEORD

Veksthus
Energibruk
Energieffektivisering
Varmepumper
Termisk lagring
Vertikal dyrking

VERSJON

Versjon 1

DATO

2022-03-24

FORFATTER(E)

Sigurd Sannan, SINTEF Energi AS
Knut Erik Enerstvedt, Gether AS
Helge Skarphagen, Gether AS

OPPDRAGSGIVER

Forskningsmidlene for jordbruk og matindustri
(FFL/JA)

OPPDRAGSGIVERS REFERANSE

2020/52293, Agros 137200

PROSJEKTNUMMER

502002963

ANTALL SIDER OG VEDLEGG

24

SAMMENDRAG

Drift av veksthus er generelt energikrevende med et energiforbruk som kan utgjøre opptil 30-40 % av de totale produksjonskostnadene. Denne rapporten tar for seg noen av utfordringene norsk veksthusnæring står overfor pr. i dag og potensialet for mer energieffektiv og klimavennlig drift av veksthus i Norge. Statistikk for energibruk i norske veksthus, antall veksthusbedrifter og veksthusareal over tid blir presentert. Erfaringer gjort ved bruk av varmpumper og termisk energilagring ved et veksthus på Mære landbruksskole blir oppsummert. I tillegg blir to energieffektive veksthuskonsept basert på varmpumpeteknologi og termisk lagring av overskuddsvarme beskrevet, ett for et vanlig veksthus og et annet for hybride veksthus der vertikaldyrking kombineres med tradisjonell veksthusproduksjon. En litteraturstudie på bruk av integrerte varmpumper for å dekke varme- og kjølebehovet i veksthus er også inkludert.

UTARBEIDET AV

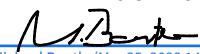
Sigurd Sannan

SIGNATUR

**KONTROLLERT AV**

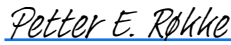
Michael Bantle

SIGNATUR


Michael Bantle (Mar 25, 2022 14:13 GMT+1)**GODKJENT AV**

Petter Egil Røkke

SIGNATUR


Petter E. Røkke (Mar 25, 2022 14:27 GMT+1)

Historikk

| VERSJON | DATO | VERSJONSBEKRIVELSE |
|-----------|------------|--------------------|
| Versjon 1 | 2022-03-24 | Endelig versjon |

Innholdsfortegnelse

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Innledning | 4 |
| 2 | Drift av veksthus i Norge | 5 |
| 2.1 | Energibruk for veksthus – statistikk..... | 5 |
| 2.2 | Statistikk over antall veksthusbedrifter og veksthusareal..... | 7 |
| 2.3 | Utfordringer i norsk veksthusnæring..... | 9 |
| 3 | Erfaringer fra bruk av varmepumper og termisk energilagring i veksthuset ved Mære landbruksskole | 10 |
| 3.1 | Introduksjon til varmepumpeanlegget på Mære..... | 11 |
| 3.2 | Optimalisert kontroll..... | 11 |
| 3.2.1 | Justering av kjøling ved overgang fra dag til natt..... | 12 |
| 3.2.2 | Justering av rørtemperaturen..... | 12 |
| 3.3 | Fordeler ved teknologien..... | 13 |
| 3.4 | Oppsummering fra veksthuset på Mære..... | 15 |
| 4 | Energieffektive veksthuskonsept i Norge | 15 |
| 4.1 | Veksthus med varmepumpeanlegg og termisk lagring..... | 15 |
| 4.2 | Hybride veksthus med kombinert vertikaldyrking og tradisjonell veksthusproduksjon..... | 17 |
| 5 | Litteraturstudie på bruk av varmepumper | 18 |
| 5.1 | Studier på bruk av luft-til-luft-varmepumper i veksthus..... | 18 |
| 5.2 | Sammenlignende studier på bruk av luft-til-luft- og grunnvarmepumper i veksthus..... | 19 |
| 5.3 | Studier på bruk av grunnvarmepumper i veksthus..... | 19 |
| 5.4 | Studier på bruk av vann-til-vann-varmepumper i veksthus..... | 20 |
| 5.5 | Oversiktsartikler på energieffektiv klimakontroll i veksthus..... | 20 |
| 6 | Oppsummering | 21 |
| | Referanser | 22 |

1 Innledning

Bærekraftig produksjon av frukt og grønnsaker i veksthus er et godt alternativ for å sikre større andel av norskprodusert mat. Veksthus gir gunstige vekstforhold og beskytter avlingene mot ytre trusler som ekstreme værforhold og ulike skadedyr. Dette gir mulighet for kontinuerlig produksjon under kontrollerte former, og produksjonsmengden per kvadratmeter kan mangedobles. Veksthus med effektive systemer for kontroll av inneklimate tillater dessuten utvidede vekstsesonger og produksjon av avlinger utenfor avlingenes normale sesong og/eller naturlige geografiske område. Dette er spesielt viktig i Norge hvor de klimatiske forhold begrenser hva som er mulig å dyrke utendørs på friland. Bærekraftig veksthusproduksjon kan derfor bidra til redusert import av mat og bedre matforsyningsikkerhet.

Drift av veksthus er generelt energikrevende med et energiforbruk som kan utgjøre opptil 30-40 % eller mer av de totale produksjonskostnadene [1], [2]. Høye driftskostnader, suboptimal energieffektivitet og kontroll av veksthusklimaet er faktorer som påvirker både produktiviteten og lønnsomheten for veksthus. I tillegg bidrar bruk av fossile brenslere som energikilde til at veksthus slipper ut mer CO₂ enn nødvendig til atmosfæren. Forbrenning av ulike brensel kan dessuten bidra til partikkelutslipp og utslipp av andre forurensende gasser som NO_x og SO_x. For å redusere karbon- og miljøavtrykket ved veksthusdrift er det derfor avgjørende at veksthusnæringen fortsetter omstillingen til mer energieffektive og miljøvennlige teknologier.

God kontroll av klimaet i et veksthus er viktig for å oppnå både god kvalitet på produktene og høy produksjon [3], [4], [5]. De klimatiske forhold kan kontrolleres ved oppvarming og kjøling, ved ventilasjon og fuktighetsstyring, og ved tilførsel av CO₂. Temperaturen og luftfuktigheten er ofte kontrollert ved oppvarming og ventilasjon. Kontroll av luftfuktigheten kan være mer utfordrende enn regulering av temperaturen siden dette ikke bare avhenger av ventilasjonen, men også av plantenes transpirasjon og kondens i veksthuset. Transpirasjonen avhenger av solstrålingen, temperaturen i veksthuset, den relative fuktigheten og konsentrasjonen av CO₂. Klimaet i et veksthus påvirkes derfor av mange faktorer som virker på hverandre i et komplisert samspill. Et sofistikert kontrollsystem er derfor nødvendig for å kontrollere og regulere klimaet i et veksthus på en god og effektiv måte.

Varmepumper er energieffektive systemer for oppvarming og kjøling og har vært foreslått til bruk i veksthus siden oljekrisen på 1970-tallet [6]. Prinsippet er å omgjøre lav-kvalitets varme eller kulde fra omgivelsene til nyttbar energi. Energien for å drive en varmepumpe er da mindre enn det man får ut. Bruk av varmepumper i veksthus har imidlertid tradisjonelt vært begrenset på grunn av en lav effektfaktor (COP) [7], [8] og de relativt høye installasjonskostnadene [9], [10]. Med utvikling av mer avansert teknologi har likevel bruk av varmepumper blitt revurdert i de senere år til både oppvarming av veksthus og som et kontrollsystem for fuktighet og CO₂-nivå [1], [11], [12], [13].

Varmepumper kan hente varme fra ulike varmekilder som luft, vann (ferskvann, sjøvann, eller grunnvann) eller bergvarme. Tidligere studier har vist at varmepumper basert på grunnvarme (grunnvann eller bergvarme) har en bedre ytelse enn varmepumper basert på luft [14], [15], spesielt om vinteren når lufttemperaturen er lavere enn den mer stabile og moderate bakketemperaturen [16], [17], [18]. På Mære landbruksskole i Trøndelag har installasjon av en varmepumpe basert på grunnvarme i veksthuset ført til 50 % flere tomater med 80 % mindre energibruk [19]. I tillegg har CO₂-utslippene her blitt redusert med 99 % sammenlignet med fossilbasert energibruk.

Optimale veksthusforhold krever en presis kontroll av temperatur, fuktighet og CO₂-nivå i veksthuset. I Norge vil som regel oppvarming være fokuset for å opprettholde riktig temperatur, men i enkelte varme sommerer kan også nedkjøling være nødvendig for å unngå for høye temperaturer. Bruk av varmepumper har vist seg å være energieffektive systemer som er svært anvendelig til både oppvarming og nedkjøling i lukkede rom. I tillegg kan varmepumpesystemer bidra til å regulere fuktighet. Fuktigheten i veksthus har vist seg å være den mest utfordrende faktoren å kontrollere, spesielt når

oppvarmingskostnadene er høye [3]. Den letteste og mest vanlige metoden for å kontrollere fuktigheten er ved ventilasjon hvor den fuktige luften fra transpirasjon blir byttet ut med tørr luft utenfra. Effekten av denne metoden avhenger imidlertid av de lokale værforhold og den finjusterte kontrollen av inneklimate som er nødvendig for plantene. I kaldt vær medfører hyppig ventilasjon også til varmetap som igjen kan føre til nødvendig oppvarming og ekstrakostnader. Bruk av varmepumpe har imidlertid vært demonstrert å være en effektiv metode for avfukting av veksthus med redusert behov for oppvarming i forbindelse med dette [12].

Energikostnadene utgjør en betydelig del av produksjonskostnadene for veksthus. Et viktig tiltak for å øke lønnsomheten i veksthusnæringen er derfor energieffektiv drift. Men fokus på høy kvalitet og høyere produksjonskapasitet er også viktig. I tillegg vil en fortsatt energiomlegging mot mindre bruk av fossilt brensel bidra til å styrke konkurransekraften på lang sikt. Målet er derfor å sikre en bærekraftig drift gjennom energisparende tiltak som også fører til reduserte utslipp av CO₂ og andre klimagasser til atmosfæren.

I denne rapporten blir potensialet for mer energieffektiv og klimavennlig drift av norske veksthus diskutert. Statistikk innhentet fra SSB for energibruk i norske veksthus over perioden 1998-2018 blir først presentert i kapittel 2. Deretter blir tilsvarende statistikk over antall veksthusbedrifter og veksthusareal for perioden 1989 – 2018 presentert. Kapitlet avsluttes med å belyse utfordringene som norsk veksthusnæring står overfor pr. i dag. Kapittel 3 gir en oppsummering av erfaringene som er gjort ved bruk av varmepumper og termisk energilagring ved veksthuset på Mære landbrukskole. I kapittel 4 blir to energieffektive veksthuskonsept beskrevet, ett for et vanlig veksthus og et annet for et hybrid veksthus der vertikaldyrking blir kombinert med tradisjonell veksthusproduksjon. Begge disse konseptene er basert på bruk av varmepumper og termisk lagring av overskuddsvarme. Til slutt, i kapittel 5, presenteres en litteraturstudie på bruk av integrerte varmepumper for å dekke varme- og kjølebehovet i veksthus.

2 Drift av veksthus i Norge

2.1 Energibruk for veksthus – statistikk

Veksthusproduksjon i Norge er kjennetegnet ved et generelt behov for oppvarming og belysning. Energien til dette dekkes normalt ved en kombinasjon av elektrisitet og fossile brenslers. Elektrisitet brukes først og fremst til vekstlys/belysning, men en del brukes også til drift av elektrokjeler der dette er installert. Fossile brenslers i bruk har tradisjonelt vært fyringsolje, naturgass og propan, men trenden er at bruken av fyringsolje har gått kraftig ned i de senere år. Dette kommer klart frem av SSBs statistikk for forbruk av fossile brenslers i norske veksthus i perioden 1998-2018; se Tabell 1 som også viser bruk av fjernvarme/spillvarme og flis for 2018 [20].

Tabell 1. Statistikk fra SSB som viser forbruk av fossile brenslers, fjernvarme/spillvarme og flis i norske veksthus for perioden 1998-2018. Rubrikker med .. indikerer at tall ikke er kommet inn i SSBs databaser eller er for usikre til å publiseres.

| | 1998 | 2006 | 2009 | 2018 |
|-----------------------------|--------|---------|---------|---------|
| Naturgass (MWh) | .. | 165 382 | 176 748 | 130 626 |
| Fyringsolje (1000 liter) | 43 617 | 11 876 | 7 770 | 1 750 |
| Propangass (tonn) | 2 323 | 5 137 | 5 770 | 7 304 |
| Fjernvarme/spillvarme (MWh) | .. | .. | .. | 24 384 |
| Flis (m ³) | .. | .. | .. | 62 055 |

Tabell 1 viser at samlet forbruk av fyringsolje har gått ned fra nærmere 44 millioner liter i 1998 til 1,75 millioner liter i 2018, en nedgang på hele 96 %. Bruken av naturgass har gått ned med 21 % fra 2006 til 2018, med et forbruk på 165 GWh i 2006 til 131 GWh i 2018. I samme periode har bruk av propangass økt med 42 %, med et forbruk på ca. 5 100 tonn i 2006 til 7300 tonn i 2018. Med et forbruk på ca. 2 300 tonn propangass i 1998 har imidlertid bruken av propan blitt mer enn 3-doblet i perioden 1998-2018.

I Tabell 2 er tallene for fyringsolje, propan, fjernvarme/spillvarme og flis i Tabell 1 omgjort til forbruk i MWh. Fyringsolje har en brennverdi på om lag 10 kWh per liter og hvis vi anvender en virkningsgrad på 90 % (som er typisk for oljekjeler fra 90-tallet og nyere) gir dette 9 kWh per liter fyringsolje. For propan er brennverdien om lag 12,9 kWh per kg og hvis vi antar 90 % virkningsgrad på gasskjelen gir dette 11,61 kWh per kg propan. Brennverdien for flis avhenger av fuktighet og treslag. For eksempel vil gran med en fuktighet på rundt 30 % ha en brennverdi på om lag 800 kWh per m³ flis, mens bjørk med tilsvarende fuktighet vil ha en brennverdi på om lag 1000 kWh per m³ flis. Hvis vi antar at flisen i hovedsak består av granflis og anvender en virkningsgrad på 80 % for fliskjelen gir dette 640 kWh per m³ flis.

Tabell 2. Forbruk av fossile brensler, fjernvarme/spillvarme og flis i norske veksthus i MWh for perioden 1998-2018 basert på SSBs statistikk fra Tabell 1. Rubrikker med .. indikerer at tall ikke er tilgjengelig fra SSBs databaser. For fyringsolje er brukt 9 kWh/liter, for propan er brukt 11,61 MWh/tonn og for flis er brukt 640 kWh per m³.

| | 1998 | 2006 | 2009 | 2018 |
|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Naturgass (MWh) | .. | 165 382 | 176 748 | 130 626 |
| Fyringsolje (MWh) | 392 553 | 106 884 | 69 930 | 15 750 |
| Propangass (MWh) | 26 970 | 59 641 | 66 990 | 84 799 |
| Fjernvarme/spillvarme (MWh) | .. | .. | .. | 24 384 |
| Flis (MWh) | .. | .. | .. | 39 715 |

SSBs statistikk for bruk av elektrisitet i norske veksthus for perioden 1998-2018 er vist i Tabell 3.

Tabell 3. Statistikk fra SSB som viser forbruk av elektrisitet i norske veksthus for perioden 1998-2018. Rubrikker med .. indikerer at tall ikke er kommet inn i SSBs databaser eller er for usikre til å publiseres.

| | 1998 | 2006 | 2009 | 2018 |
|-------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Elektrisitet til vekstlys (MWh) | 222 935 | 341 153 | 346 703 | 309 126 |
| Elektrisitet til elektrokjele (MWh) | 276 349 | 202 680 | 161 828 | 81 863 |
| Elektrisitet til varmepumpe (MWh) | .. | .. | 2 700 | 4 043 |

Tabell 3 viser at forbruk av elektrisitet til vekstlys har økt med nærmere 39 % i perioden 1998-2018, fra om lag 223 GWh i 1998 til ca. 309 GWh i 2018. Forbruket i 2018 er imidlertid 11 % lavere enn forbruket på nærmere 347 GWh i 2009. SSBs statistikk viser også at forbruket av elektrisitet til elektrokjel har gått ned med 70 % fra 1998 til 2018, fra ca. 276 GWh i 1998 til om lag 82 GWh i 2018. I mellomtiden har varmepumper blitt installert i en del veksthus, og selv om dette fortsatt har et relativt beskjedent omfang har forbruk av elektrisitet til varmepumpe økt med 50 % fra 2009 til 2018, fra 2,7 GWh i 2009 til ca. 4 GWh i 2018.

2.2 Statistikk over antall veksthusbedrifter og veksthusareal

I Norge har det vært en konstant nedgang i antall jordbruksbedrifter med veksthus siden slutten av 1980-tallet. Tabell 4 viser en reduksjon i det totale antall veksthusbedrifter fra 1270 bedrifter i 1989 til 309 bedrifter i 2018, en nedgang på nesten 76 % [21]. Med i alt 637 bedrifter med veksthus i 2010 viser statistikken fra SSB også en reduksjon i antall veksthusbedrifter på 51,5 % fra 2010 til 2018. Nedgangen i antall veksthusbedrifter har vært størst for de minste bedriftene med veksthusareal mellom 300 og 999 m². Med 613 bedrifter i denne kategorien i 1989 og kun 62 bedrifter i 2018 tilsvarer dette en nedgang på omtrent 90 % for perioden 1989-2018. Med i alt 222 bedrifter i denne kategorien i 2010 har reduksjonen vært relativt størst siden da, dvs. en nedgang på omtrent 72 % fra 2010 til 2018. For mellomstore bedrifter med veksthusareal 1 000-1 999 m² og 2 000-4 999 m² har det vært en henholdsvis nedgang på 84 % og litt over 56 % fra 1989 til 2018. For perioden 2010-2018 har reduksjonen i antall mellomstore bedrifter vært på ca. 59 % og ca. 39 % for bedriftene med henholdsvis opptil 1 999 m² og 4 999 m² veksthusareal.

Tabell 4. Statistikk fra SSB som viser antall jordbruksbedrifter med veksthus i Norge for perioden 1989-2018. Tallene omfatter kun bedrifter med minst 300 m² vekstareal.

| | Jordbruksbedrifter med veksthus | | | | |
|------|---------------------------------|--------------------------------------|-------------|-------------|--------|
| | I alt | Etter veksthusareal i m ² | | | |
| | | 300-999 | 1 000-1 999 | 2 000-4 999 | 5 000- |
| 1989 | 1 270 | 613 | 376 | 215 | 66 |
| 1999 | 957 | 370 | 281 | 227 | 79 |
| 2006 | 737 | 254 | 179 | 199 | 105 |
| 2010 | 637 | 222 | 145 | 153 | 117 |
| 2018 | 309 | 62 | 60 | 94 | 93 |

For de aller største bedriftene med veksthusareal på minst 5 000 m² viser Tabell 4 at det har vært en økning i antall bedrifter siden 1989. Med 66 bedrifter i 1989 og 93 bedrifter i 2018 for denne kategorien tilsvarer dette en økning på nesten 41 % i perioden 1989-2018. Med 117 slike bedrifter i 2010 har det imidlertid vært en nedgang på 20,5 % i antall store veksthusbedrifter fra 2010 til 2018.

Trenden i SSBs statistikk for jordbruksbedrifter med veksthus er at det totalt har vært en sterk nedgang i slike bedrifter fra 1989 til 2018. Nedgangen har vært størst for de minste bedriftene med veksthusareal opp til 999 m², men det har også vært en sterk reduksjon i antall mellomstore bedrifter med veksthusareal opp til 4 999 m². For de største bedriftene med veksthusareal over 5 000 m² har antallet slike bedrifter hatt en økning frem til 2010, men etter dette har det også blitt en del færre store bedrifter.

Tabell 5 viser det totale veksthusareal for perioden 1989-2018 i Norge, samt hvordan dette fordeler seg i størrelsen på arealene. Statistikken viser her at det totale veksthusarealet holdt seg på et konstant nivå på i overkant av 2 000 dekar fra 1989 til 2010, men at dette falt til noe over 1 700 dekar i 2018. Dette tilsvarer en samlet nedgang i veksthusareal fra 2010 til 2018 på 16,6 %. For perioden 1989 til 2018 falt det samlede veksthusarealet for areal med størrelse 300-999 m² fra 345 dekar til 41 dekar, en nedgang på litt over 88 %. Med 132 dekar veksthusareal med størrelse 300-999 m² i 2010 var nedgangen på nesten 69 % i denne størrelsen i perioden 2010-2018. For mellomstore veksthusareal var det en samlet nedgang i areal på henholdsvis omtrent 83 % og 52 % for areal med størrelse 1 000-1 999 m² og 2 000-4 999 m² fra 1989 til 2018. For perioden 2010-2018 var det en nedgang i areal på omtrent 57 % for areal i størrelse 1 000-1 999 m² og på omtrent 37 % for areal i størrelse 2 000-4 999 m².

Tabell 5. Statistikk fra SSB som viser det totale veksthusareal og størrelsen på arealene for perioden 1989-2018 i Norge. Tallene omfatter kun veksthusareal med areal på minst 300 m².

| | Veksthusareal i alt (dekar) | | | | |
|------|-----------------------------|------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| | Totalt | 300-999 m ² | 1 000-1 999 m ² | 2 000-4 999 m ² | 5 000- m ² |
| 1989 | 2 046 | 345 | 500 | 583 | 619 |
| 1999 | 2 003 | 221 | 378 | 662 | 741 |
| 2006 | 2 022 | 151 | 236 | 610 | 1 025 |
| 2010 | 2 048 | 132 | 196 | 451 | 1 269 |
| 2018 | 1 709 | 41 | 84 | 282 | 1 303 |

For de største veksthusarealene på mer enn 5 000 m² viser Tabell 5 at det har vært en samlet økning av slike areal fra 1989 til 2018. Med 619 dekar på 5 000 m² eller mer i 1989 og 1 303 dekar av denne størrelsen i 2018 tilsvarer dette en økning på mer enn 110 %, dvs. denne type areal har blitt mer enn doblet i perioden 1989-2018. Med 1269 dekar på 5 000 m² eller mer i 2010 har det imidlertid vært en beskjeden økning på 2,7 % av denne type areal fra 2010 til 2018.

Tabell 6 viser det totale antall jordbruksbedrifter med veksthus etter landsdel fra 1999 til 2018 [21]. Tall fra 1989 er ikke tatt med da de ikke finnes i SSBs databaser. Statistikken viser her at det har vært en sterk reduksjon i antall jordbruksbedrifter i alle landsdeler i perioden 1999-2018 og at denne nedgangen har vært spesiell stor siden 2010. På Østlandet har det vært en reduksjon fra 384 bedrifter i 1999 til 140 bedrifter i 2018, en total nedgang på 63,5 %. Den relative nedgangen fra 2010 til 2018 var på litt over 49 % for Østlandet. For Agder og Rogaland har det vært en reduksjon fra 287 bedrifter i 1999 til 85 bedrifter i 2018, en total nedgang på noe over 70 % og en nedgang på over 50 % siden 2010. På Vestlandet, som her omfatter de tidligere fylkene Hordaland, Sogn og Fjordane, og Møre og Romsdal, har det vært en reduksjon fra 135 bedrifter i 1999 til 32 bedrifter i 2018. Dette tilsvarer en total nedgang på over 76 % og siden 2018 har det vært en relativ nedgang på nesten 57 % for Vestlandet. For Trøndelag har det vært en reduksjon fra 80 bedrifter i 1999 til 29 bedrifter i 2018, en total nedgang på nesten 64 % og en halvering av antall bedrifter siden 2010. For Nord-Norge har det vært en reduksjon fra 71 bedrifter i 1999 til 23 bedrifter i 2018, en total nedgang på nesten 68 %. Fra 2010 har det vært en relativ nedgang på over 60 % i Nord-Norge.

Tabell 6. Statistikk fra SSB som viser det totale antall jordbruksbedrifter med veksthus etter landsdel for perioden 1999-2018. Tallene omfatter kun bedrifter med minst 300 m² vekstareal.

| | Jordbruksbedrifter med veksthus etter landsdel | | | | |
|------|--|-------------------|------------|-----------|------------|
| | Østlandet | Agder og Rogaland | Vestlandet | Trøndelag | Nord-Norge |
| 1999 | 384 | 287 | 135 | 80 | 71 |
| 2006 | 301 | 210 | 98 | 64 | 64 |
| 2010 | 276 | 171 | 74 | 58 | 58 |
| 2018 | 140 | 85 | 32 | 29 | 23 |

Samlet sett viser SSBs tallmateriale fra Tabell 6 at det har vært en nedgang i antall jordbruksbedrifter med veksthus på mellom 63,5 og 76,3 % for de enkelte landsdelene i perioden 1999-2018. For tidsrommet fra 2010 til 2018 har denne nedgangen vært på mellom 49,3 og 60,3 % for de enkelte landsdelene. Nedgangen i antall jordbruksbedrifter med veksthus har vært størst på Vestlandet i perioden 1999-2018 (76,3 %), mens nedgangen for perioden 2010-2018 har vært relativt størst i Nord-Norge (60,3 %).

Tabell 7 viser det totale veksthusareal etter landsdel for perioden 1999-2018. Tall fra 1989 er ikke tatt med da de ikke finnes i SSBs databaser. Statistikken her viser noen regionale forskjeller i utvikling i

veksthusareal for perioden. På Østlandet, som har det største veksthusarealet, holdt det totale veksthusarealet seg noenlunde konstant på mellom 900 og 1000 dekar fra 1999 og frem til 2010, men dette falt til 757 dekar i 2018. Dette tilsvarer en nedgang på nesten 19 % i perioden 2010-2018. For Agder og Rogaland har veksthusarealet holdt seg noenlunde konstant for hele perioden 1999-2018, med en svak oppgang fra 652 dekar i 1999 til 713 dekar i 2018 (tilsvarende litt over 9 %). Med 770 dekar i 2010 var det imidlertid en relativ nedgang i veksthusareal på noe over 7 % i perioden 2010-2018 for Agder og Rogaland. For Vestlandet, som igjen omfatter de tidligere fylkene Hordaland, Sogn og Fjordane, og Møre og Romsdal, har det vært en jevn nedgang i det totale veksthusareal i hele perioden 1999-2018. Med 221 dekar veksthusareal i 1999 og 92 dekar i 2018 tilsvarer dette en reduksjon på litt over 58 %. Den relative nedgangen i veksthusareal for perioden 2010-2018 var på nesten 41 % for Vestlandet. For Trøndelag var det en reduksjon på nesten 15 % i veksthusareal fra 1999 til 2010, men etter dette har det vært en relativ stor økning her i det totale veksthusarealet. Med 74 dekar veksthusareal i 1999 og 119 dekar i 2018 har den totale oppgangen for perioden 1999-2018 i Trøndelag vært på nesten 61 %. Siden 2010 har den relative økningen i veksthusareal vært på nesten 89 % her. For Nord-Norge har utviklingen vært en helt annen med et drastisk fall i veksthusareal fra 2010 til 2018. Med 113 dekar veksthusareal i 1999 og 130 dekar i 2010 var det imidlertid en økning på 15 % for perioden 1999-2019 i Nordland. Med bare 28 dekar veksthusareal i 2018 var nedgangen på 78,5 % i perioden 2010-2018. For hele perioden 1999-2018 var det en total nedgang i veksthusareal på litt over 75 % for Nordland.

Tabell 7. Statistikk fra SSB som viser det totale veksthusareal etter landsdel for perioden 1999-2018. Tallene omfatter kun veksthusareal med areal på minst 300 m².

| | Veksthusareal etter landsdel (dekar) | | | | |
|------|--------------------------------------|-------------------|------------|-----------|------------|
| | Østlandet | Agder og Rogaland | Vestlandet | Trøndelag | Nord-Norge |
| 1999 | 942 | 652 | 221 | 74 | 113 |
| 2006 | 983 | 647 | 191 | 63 | 138 |
| 2010 | 930 | 770 | 155 | 63 | 130 |
| 2018 | 757 | 713 | 92 | 119 | 28 |

Totalt viser Tabell 7 at det samlede veksthusarealet i Norge holdt seg på et noenlunde konstant nivå i perioden fra 1999 til 2010, men at dette arealet har hatt en nedgang på nesten 15 % etter 2010. For Agder og Rogaland har det totale veksthusarealet holdt seg på et stabilt høyt nivå på ca. 700 dekar i hele perioden 1999-2018, mens det for Vestlandet har vært en jevn nedgang i veksthusareal i hele perioden til i underkant av 100 dekar i 2018. For Østlandet har det totale veksthusarealet falt fra et snitt på ca. 950 dekar i perioden 1999-2010 til i overkant av 750 dekar i 2018. Med ca. 120 dekar areal i 2018 har veksthusarealet nesten doblet seg i Trøndelag siden 2010. I Nordland har det imidlertid vært en drastisk nedgang i veksthusareal siden 2010 til bare 28 dekar i 2018.

2.3 Utfordringer i norsk veksthusnæring

Som det kommer frem av statistikken fra SSB i avsnitt 2.2 har veksthusnæringen i Norge vært under press i mange år. Det har vært en sterk nedgang i antall jordbruksbedrifter med veksthus i alle landsdeler siden slutten av 1980-tallet, og i perioden 1989 til 2018 ble antall veksthusbedrifter redusert med om lag 76 %. Imidlertid har det vært en dreining mot større bruk i denne perioden, slik at reduksjonen i samlet veksthusareal ikke er like dramatisk, men på om lag 17 %.

Veksthusnæringen i Norge har kommet i en alvorlig økonomisk situasjon de siste par årene. Økte strømpriser og priser på naturgass har gjort at driftskostnadene har økt drastisk, med det resultat at mange bedrifter har måttet nedskalere, stenge ned eller utsette produksjon for ikke å gå på for store

økonomiske tap. Både elektrisitet og gass er viktige energikilder til lys og oppvarming i veksthus, og kostnadene til energi utgjør en betydelig del av produksjonskostnadene. Veksthusnæringen har vært i en omstillingsprosess over flere år og har kuttet CO₂-utslippene med ca. 75 % i perioden fra 1989 til 2020 [22]. Dette har skjedd gjennom omstilling til økt bruk av fornybar energi, bedre klimastyring og smartere energibruk. Det er imidlertid fortsatt behov for omstilling og redusert bruk av fossile brensler, og Norsk Gartnerforbund har som mål at næringen skal være tilnærmet 100 % utslippsfri innen 2030 [23].

Bærekraftig og lønnsom drift er nøkkelfaktorer for at norsk veksthusnæring skal kunne opprettholdes inn i fremtiden. Nasjonal produksjon av frukt, grønnsaker og urter er viktig for å fremme selvforsyning og begrense behovet for import av mat. Det er også økende interesse for lokal og kortreist mat, og kostnader og miljøavtrykk i forbindelse med transport reduseres tilsvarende ved kortere avstander mellom produsent og forbruker. Marginene for lønnsom veksthusdrift er imidlertid små og blir raskt spist opp av store kostnadsøkninger på energi og andre innsatsfaktorer, slik tilfellet har vært i den senere tid. Næringen står derfor i en svært krevende situasjon og etterspør bedre rammevilkår og forutsigbarhet over kraft- og gassprisene på det norske markedet. Den nylig innførte strømstøtteordningen oppleves følgelig ikke som god nok til å sikre en økonomisk bærekraftig drift av veksthus, og en kompensasjonsordning for de økte gassprisene er heller ikke på plass [24].

Fra 1. januar 2022 ble veksthusnæringens fritak for CO₂-avgift på naturgass og LPG avviklet. I stedet ble det innført en redusert avgiftssats på 10 % av ordinært nivå og som gradvis skal økes frem mot 2030. Dette er i tråd med klimaavtalen fra Glasgow hvor alle deltagende land forpliktet seg til å styrke sine nasjonale mål for utslipp av klimagasser [25]. Argumentet fra myndighetenes side er at en gradvis innføring av CO₂-avgift for veksthus skal gi næringen et økonomisk insentiv til å redusere bruken av fossil gass, samtidig som det gir tid til tilpasning til et høyere avgiftsnivå. Næringen opplever imidlertid CO₂-avgiften som meningsløs siden den svekker en allerede utsatt bransjes evne til å foreta de investeringene som er nødvendig for en fortsatt omlegging fra fossil til fornybar energi. Risikoen er derfor stor for at avgiften ikke vil fremskynde, men tvert imot forsinke omleggingen til 100 % fornybar drift.

En side ved dette er at planter er avhengig av CO₂ til fotosyntesen, der vann og CO₂ blir omdannet til karbohydrater (mat) og oksygen. CO₂ bør derfor betraktes som et næringsstoff for planter, og studier har vist at planteveksten kan øke med omtrent 30-50 % ved ekstra tilførsel av CO₂ til veksthusklimaet [26], [27]. Fra et globalt perspektiv er det derfor et spørsmål om hva som gir lavest miljøavtrykk, dvs. om Norge fortsatt skal basere seg på stor grad av import av frukt og grønt, eller om rammevilkårene for norsk veksthusnæring legger godt nok til rette for lønnsom og bærekraftig drift på kort og lang sikt for å sikre selvforsyningen. Et relevant aspekt til dette er produksjon av frukt og grønt i norske veksthus vist seg å kunne være svært effektiv og mer miljøvennlig enn i andre land som for eksempel Spania og Nederland [28]. Ved bruk av nyere veksthus teknologi er for eksempel klimaavtrykket for produksjon av én kilo agurk i Norge lavere enn tilsvarende avtrykk for dyrking i Spania, og også lavere enn transporten av én kilo agurk fra Spania til Norge. Tilsvarende sammenligning gjelder for Nederland der veksthusnæringen i stor grad baserer seg på bruk av naturgass til oppvarming [29]. En økt nedleggelse av veksthusbedrifter i Norge med påfølgende økt import av frukt og grønt vil derfor føre til karbonlekkasje til Spania, Nederland og andre land det importeres fra.

3 Erfaringer fra bruk av varmepumper og termisk energilagring i veksthuset ved Mære landbruksskole

Ved Mære landbruksskole i Trøndelag er det bygget et varmepumpeanlegg som leverer varme til et 1000 m² stort veksthus der det dyrkes tomater. Anlegget er senere utvidet til å forsyne de resterende 2000 m² veksthusareal, men vi ser her nærmere på resultater og erfaringer fra det opprinnelige demonstrasjonsanlegget [19].

3.1 Introduksjon til varmepumpeanlegget på Mære

Anlegget på Mære består av væske-til-vann varmepumper med en total kapasitet på 120 kW, termisk energilager med borehull (BTES), dynamisk termisk energilager (DTES) og tørrkjøler for utnyttelse av uteluft som varmekilde. Fire aerotempere med en total kapasitet på 100 kW sørger for avfukking og kjøling ved å flytte overskuddsenergi fra luften inne i veksthuset til væsken som sirkulerer gjennom dem og avleverer energien i energilagrene eller direkte til varmepumpene. Systemet flytter energi i tid ved å høste når det er overskudd, og sørger for å lagre og hente energien ut når det er behov. BTES fungerer som sesonglager der overskuddsenergi lagres om sommeren og hentes ut igjen påfølgende vintersesong. Funksjonen til DTES er mer som et korttidslager som utnytter variasjoner mellom dag og natt eller fra en dag til en annen ved å flytte energien i tid. Overskuddsenergi i form av høy temperatur i veksthuset oppstår hovedsakelig i sommerhalvåret pga. solinnstråling, men kan også oppstå i de kaldere og mørkere årstidene fordi vekstlysene avgir varme. Dette avhenger av typen lamper som benyttes. Overskuddsenergi i form av høy luftfuktighet forekommer fordi plantene transpirerer. Anlegget utnytter fornybare energikilder fra grunnvarme, uteluft og overskuddsenergi inne i veksthuset som kombinert med varmepumper gir redusert energiforbruk, redusert behov for bruk av luftelucker til klimakontroll og generelt bedre kontroll med plantenes omgivelsesklime. Den reduserte bruk av luftelucker er illustrert i Figur 1.



Figur 1. Bilde fra Mære landbruksskole som illustrerer forskjellen i behov for utlufting ved bruk av takluker mellom veksthus der varmepumpeteknologien er tatt i bruk i forhold til andre veksthus.

3.2 Optimalisert kontroll

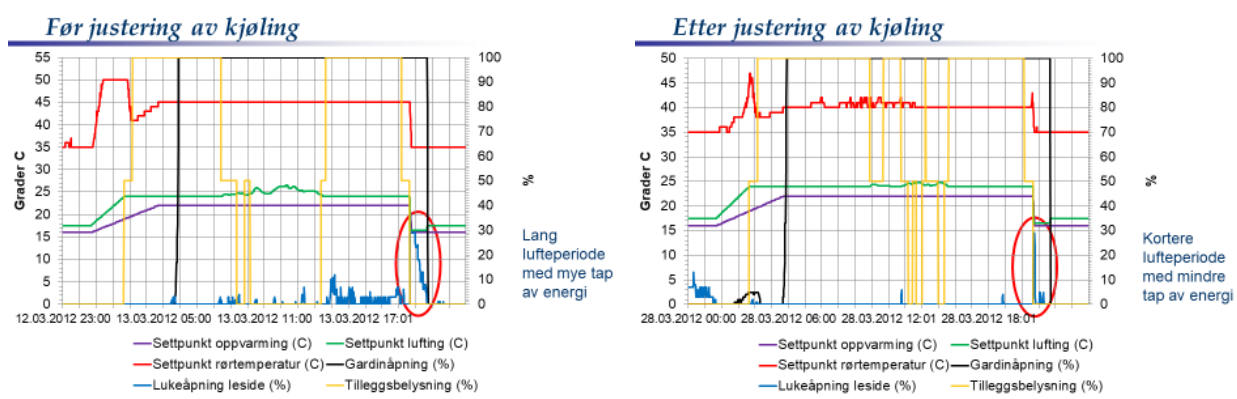
Et avansert kontrollsystem for anlegget er utviklet og optimalisert over tid for økt produksjon og bedre energiutnyttelse. Dette har vært et samarbeid mellom plantefaglig og energifaglig ekspertise. Justeringer foretas på bakgrunn av gartnerens vurderinger, analyse av driftsdata og modellering med verktøyet TRNSYS (Transient Systems Simulation). Noen eksempler på dette er gitt i det følgende.

3.2.1 Justering av kjøling ved overgang fra dag til natt

For justering av kjøling ved overgang fra dag til natt gjelder:

- I overgangen fra dag til natt skal temperaturen senkes i løpet av en kort periode.
- Veksthusets klimacomputer bestemmer settpunkter og perioder for klimaparameterne, og varmepumper og aerotempere opererer i forhold til dette. Dersom aerotempene ikke klarer å tilfredsstille klimacomputerens krav til temperatur og luftfuktighet raskt nok, åpnes lukene.
- Temperatursenkning ved å åpne lukene medfører tap av energi.
- Ved å øke kjølekapasiteten til aerotempene og starte maks kjøling noe før overgangsperioden begynner, forkortes tiden med åpne luker og dermed mindre tap av energi.

Figur 2 viser endringen i bruk av lufteluker før og etter justering av kjøling ved overgang fra dag til natt.



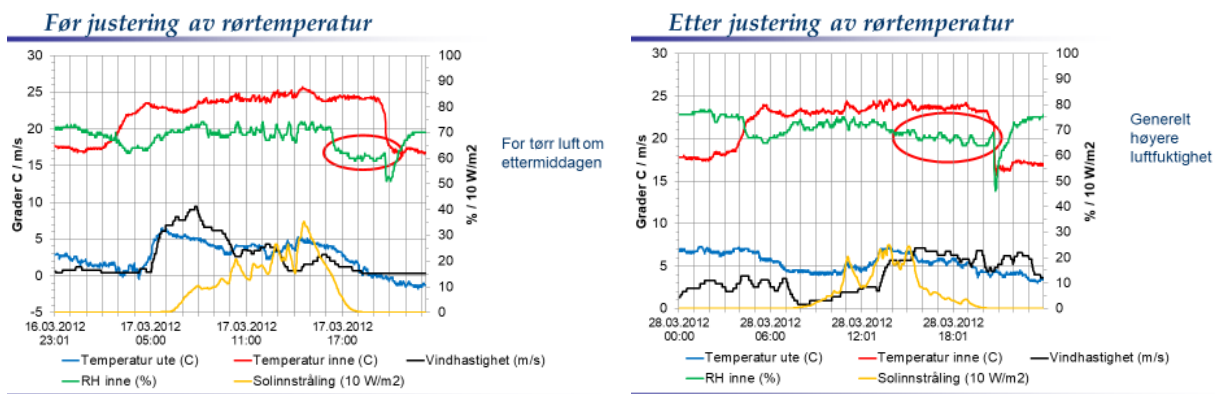
Figur 2. Grafer for settpunkt av oppvarming, rørtemperatur og lufting, i tillegg til åpning av lufteluker, gardinåpning og tilleggsbelysning før og etter justering av kjøling.

3.2.2 Justering av rørtemperaturen

For justering av settpunkt for rørtemperaturen gjelder:

- Den tidligere strategien var å holde en høy temperatur på undervarmerørene (varmerørene som går mellom radene med tomatplanter) i veksthuset for å ha kontroll med luftfuktigheten.
- Etter at varmepumpeanlegget ble installert observerte gartnerne at det var bedre kontroll med luftfuktigheten og kunne justere ned minimum rørtemperatur og innslaget for påvirkning fra luftfuktighet.
- Resultatet er redusert energiforbruk, mindre behov for å lufte med lukene og bedre klimabetingelser for plantene.

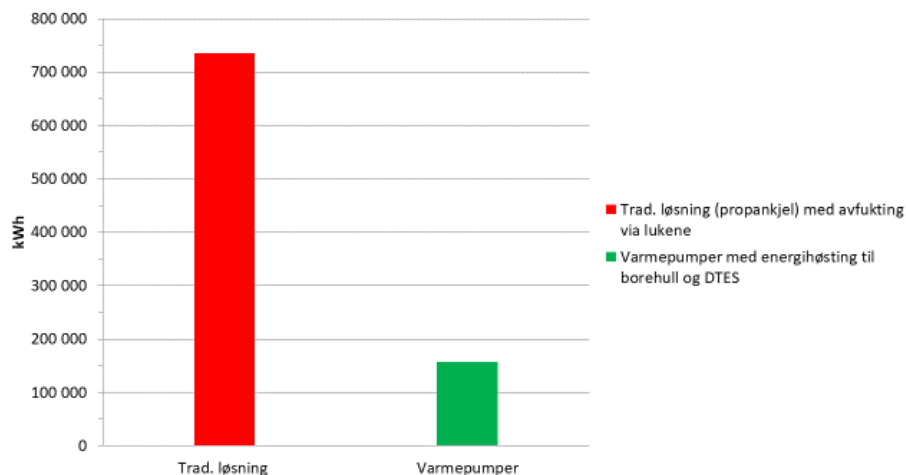
Figur 3 viser endringen i luftfuktighet om ettermiddagen før og etter justering av rørtemperatur.



Figur 3. Grafer for ute- og innetemperatur, relativ fuktighet, solinnstråling og vindhastighet før og etter justering av rørtemperatur.

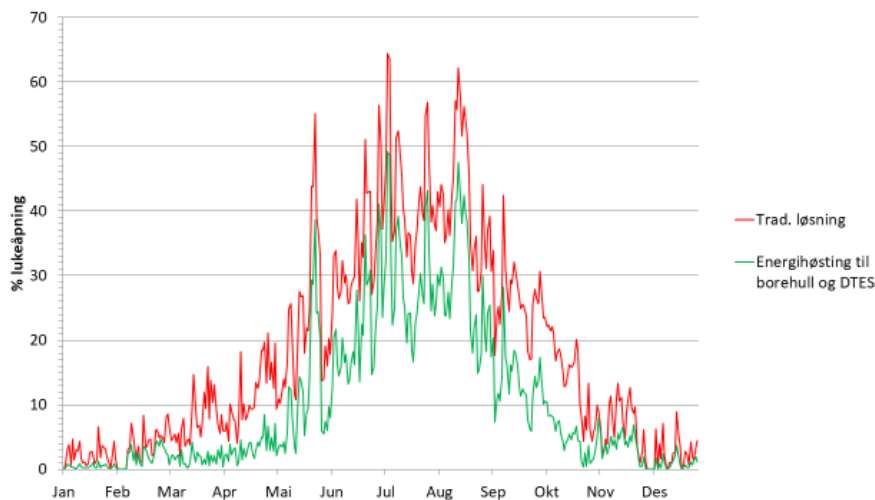
3.3 Fordeler ved teknologien

Bruk av varmepumper og termisk energilagring i veksthuset ved Mære landbruksskole har gitt gode resultater i form av redusert energiforbruk og økte avlinger. I Figur 4 er vist energiforbruket til en "tradisjonell" veksthusløsning, dvs. oppvarming med olje, gass, bio, etc. i forhold til energiforbruket til varmepumpeanlegget på Mære i løpet av ett år. Sammenligningen er gjort for bruk av gasskjel (propan) for den tradisjonelle løsningen siden det var det som tidligere ble benyttet på Mære. Datagrunnlaget er målte driftsdata og simulering med TRNSYS.



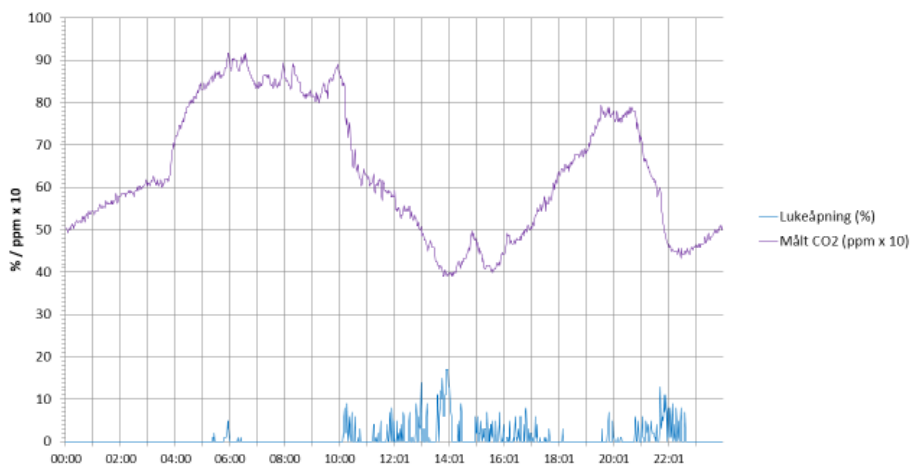
Figur 4. Energiforbruk over ett år for tradisjonell veksthusløsning (oppvarming med olje, gass, bio, etc.) og for varmepumpeanlegget på Mære.

Figur 5 viser gjennomsnittlig lukeåpning i løpet av ett år for tradisjonell veksthusløsning, dvs. avfukking ved bruk av lufteluker og økt varmepådrag, i forhold til lukeåpning ved bruk av varmepumper og avfukking med aerotempere. Grafene er fra simulering med TRNSYS ved bruk av reelle klimadata og transpirasjonsrater fra plantene.



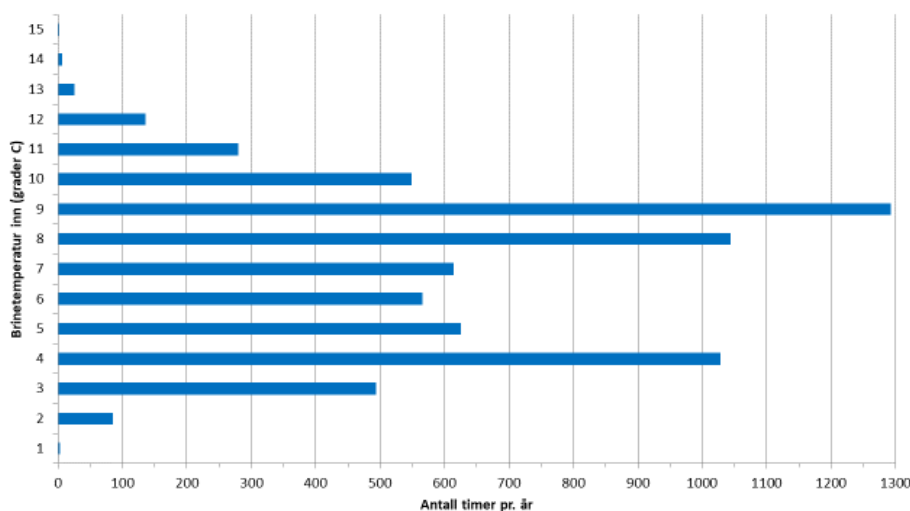
Figur 5. Gjennomsnittlig lukeåpning gitt i % over ett år for tradisjonell veksthusløsning (avfukting ved bruk av luker og økt varmepådrag) og ved bruk av varmepumper og avfukting med aerotempere.

Mindre bruk av lufteluker til avfukting og kjøling gir gevinst i form av redusert energiforbruk. I tillegg gjør dette at nivået av tilført CO₂ ligger på et jevnt høyere nivå. Varmepumpeanlegget klarer å holde lukene tilnærmet lukket vinter/vår/høst, mens et tradisjonelt anlegg lufter med 5-20 % åpning (jfr. Figur 5). Figur 6 viser målte verdier av CO₂ i løpet av ett døgn i veksthuset på Mære mot lukeåpning i %.



Figur 6. Lukeåpning og målte verdier av tilført CO₂ i veksthuset på Mære i løpet av ett døgn.

Energihøsting fra avfukting og kjøling og bruk av termiske energilagere gir gode arbeidsbetingelser for varmepumpene (høy COP). Figur 7 viser statistikk over hvor mange timer i løpet av ett år som varmepumpene kjører ved forskjellige brinetemperaturer (temperatur på varmepumpens kalde side). Til sammenligning arbeider tradisjonelle borehullbaserte varmepumper i temperaturområdet fra -1 °C til +6 °C.



Figur 7. Antall timer pr. år med forskjellige temperaturer inn på varmepumpenes kalde side (brinetemperatur).

3.4 Oppsummering fra veksthuset på Mære

Demonstrasjonsanlegget for bruk av varmepumper og termisk energilagring ved Mære landbruksskole har gitt følgende erfaringer:

- Energiforbruket i veksthuset på Mære er redusert med ca. 80 % i forhold til hva det var før teknologien med varmepumper og energihøsting ble iverksatt.
- Reduksjon i energiforbruk kommer som følge av bruk av varmepumper med gunstige arbeidsbetingelser i tillegg til at bedre kontroll med veksthusklimaet gjør at det kan driftes på en mer energieffektiv måte med mindre bruk av varme til fuktstyring.
- Det nye varmepumpeanlegget førte til økte tomatavlinger i forhold til tidligere.
- Plantefaglig og energifaglig ekspertise jobbet sammen for å forbedre resultatene med hensyn til både energieffektivitet og best mulige forhold for veksthusplantene.

4 Energieffektive veksthuskonsept i Norge

To energieffektive veksthuskonsept er beskrevet her, det første for et vanlig veksthus og det andre for et hybrid veksthus som kombinerer dyrking i flere lag (vertikaldyrking) med tradisjonell veksthusproduksjon. Installasjon av nye energieffektive konsepter for et gitt gartneri vil kreve en detaljert analyse for å optimalisere et nytt system. Dette vil innebære modellering av veksthuset og analyser av varmepumpe-systemer og termisk energilagring for best mulig dimensjonering av komponenter for å sikre god energibruk. I tillegg vil det være viktig med gode måledata knyttet til et klimastyrte anlegg. Systemene må også ta hensyn til hvilke planter som dyrkes siden forskjellige plantearter kan kreve differensierte klimatiske forhold for best mulig vekst.

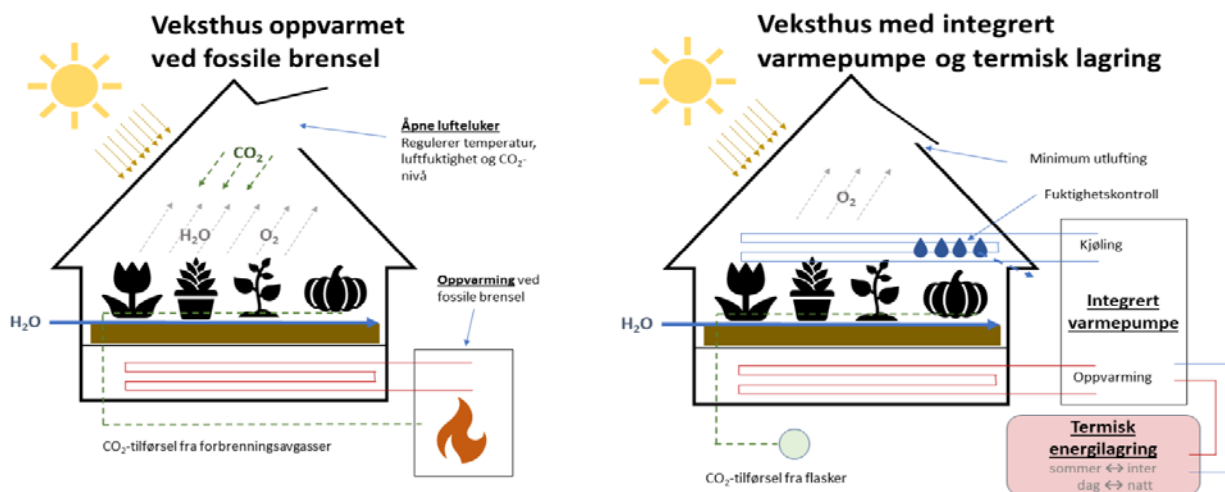
4.1 Veksthus med varmepumpeanlegg og termisk lagring

Som vist i avsnitt 2.1 har veksthusnæringen i Norge vært i en omstillingsprosess over flere år. Bruken av fyringsolje har gått drastisk ned, og det har vært en omlegging til økt bruk av fornybar energi (bioenergi og varmepumpeløsninger) og fjernvarme/spillvarme fra industrielle prosesser. Dette har ført til reduserte

utslipp av CO₂ på omtrent 75 % over de siste 30 år [22]. Det er imidlertid fortsatt behov for redusert bruk av fossile brensler, og målet er at næringen skal være tilnærmet fornybar innen 2030 [23].

En bærekraftig veksthusnæring krever veksthus med energieffektiv drift, optimalisert kontroll av vekstforholdene og minimale utslipp av CO₂ til omgivelsene. God kontroll av inneklimate i et veksthus er viktig for å oppnå høy kvalitet på produktene, men også for å opprettholde en god og høy produksjon. I Norge vil det som oftest være mest fokus på oppvarming for å opprettholde riktig temperatur for plantene, men utlufting med takluker blir også brukt både for avkjøling og avfuktning av inneklimate. Generelt er det derfor et behov både for oppvarming og kjøling for å kontrollere veksthusklimaet. I tillegg vil det være behov for å tilføre og opprettholde et høyt nivå av CO₂ uten at CO₂-gassen unødvendig blir luftet ut via taklukene.

Et integrert varmepumpesystem kan kontrollere både oppvarming og nedkjøling av et veksthus på en energieffektiv måte. Varmepumpesystemer vil også bidra til å regulere både luftfuktighet og CO₂-nivåer [11], [12]. Fuktigheten kan her kontrolleres gjennom et system for kondensering av fuktig luft, og det kondenserte vannet kan resirkuleres tilbake til plantene. Dette systemet fører til mindre behov for ventilasjon med lufteluker, som igjen gir mindre energitap og tap av CO₂. Tilsetning av CO₂ i veksthuset kan sikres ved tilførsel fra CO₂-flasker i stedet for å bruke avgassen fra forbrenning i en gasskjel. En illustrasjon av et integrert varmepumpesystem i et veksthus er vist i Figur 8, som også viser et tradisjonelt veksthus med bruk av fossilt brensel til oppvarming. I det integrerte varmepumpesystemet kan det i tillegg legges til rette for sesongmessig lagring av overskuddsvarme. Ved bruk av termisk energilagring i borehull kan sommerens overskuddsvarme lagres i grunnen til bruk om vinteren. I kombinasjon med borehull kan også dynamisk energilagring bli anvendt ved bruk av en stor underjordisk vanntank eller buffertank for å utnytte temperatursvingningene mellom dag og natt.



Figur 8. Illustrasjon av et typisk veksthus oppvarmet ved fossile brensel og et veksthus med en integrert varmepumpe for både kjøling og oppvarming. I varmepumpekonseptet blir fuktigheten i veksthuset kontrollert ved kondensering av fuktig luft. Konseptet kan også innebære termisk energilagring der overskuddsvarmen fra sommersesongen lagres for vinterbruk og temperatursvingninger mellom dag og natt utnyttes ved dynamisk termisk lagring. Tilsetning av CO₂ i veksthuset kan skje fra tilførsel fra CO₂-flasker.

4.2 Hybride veksthus med kombinert vertikaldyrking og tradisjonell veksthusproduksjon

I de senere år har innendørs vertikal produksjon av grønnsaker blitt lansert som et alternativ til veksthus og tradisjonell landbruksproduksjon, både internasjonalt og i Norge [30], [31], [32], [33]. Konseptet innebærer dyrking av planter i vertikale lag der sollyset er erstattet med LED-vekstlys, og der inneklimate blir kontrollert og regulert ved datastyrte systemer. Det finnes flere systemer for vertikaldyrking, men generelt kan plantene dyrkes i flere stablede lag over hverandre eller langs vertikale flater. Plantene spirer i et lukket miljø, enten i næringsrik jord med gjenbruk av resirkulert vann eller direkte i en mineralløsning som resirkuleres. Fordelene med spiring i et slikt kontrollert miljø er hurtig vekst og lavt vannforbruk, og det er begrenset behov for bruk av plantevern. Denne type etasjedyrking er arealeffektiv, og produksjonen kan foregå hele året beskyttet mot vær og vind, og uavhengig av sollys. Ulempene med vertikal produksjon er at det er dyrt og energikrevende sammenlignet med produksjon i veksthus. I tradisjonelle veksthus benyttes gratis sollys (i tillegg til supplerende vekstlys), og selv om LED-lamper er veldig effektive, krever de mye energi og genererer store mengder varme som man må bli kvitt med kjøleanlegg og ventilasjon for at det ikke skal bli for varmt for plantene. Energiforbruket blir da høyt per produsert plante og vertikal produksjon kan da, litt avhengig av hvor strømmen kommer fra, gi et høyere miljøavtrykk enn fra et tradisjonelt veksthus. Det har imidlertid vært en rivende utvikling og effektivisering av LED-teknologien de siste årene slik at LED-lamper både er blitt billigere, bruker mindre strøm, og avgir mindre varme enn tidligere [34].

To gartnerier i Norge, Viken Gartneri på Frosta^{1,2} og Snarum Gartneri^{3,4} i Lier har nylig installert vertikale produksjonsanlegg i kombinasjon med tradisjonelle veksthus. Gartneriet på Frosta dyrker både salat og urter, mens gartneriet i Lier har spesialisert seg på urter. I disse hybride veksthusene spirer og vokser småplanter i noen uker i vertikalanlegget før de flyttes over i de tradisjonelle veksthusene for endelig sluttvekst. Gevinsten med denne symbiosen er at overskuddsvarmen fra vertikalanleggene kan brukes direkte i veksthusene, der arealene er store og det er behov for stor tilførsel av varme. Den kombinerte bruken av vertikal- og veksthusproduksjon har vist seg å gi en større kapasitet, samtidig som det totale energiforbruket er redusert. I tillegg er det blitt lavere CO₂-utslipp som en følge av redusert bruk av propankjel til oppvarming.

Hovedutfordringen ved gartneriene på Frosta og i Lier er å få til en balansert og god bruk av overskuddsvarmen fra de respektive vertikalanlegg. Slik det er i dag må varmen fra vertikalanlegget brukes når den skapes, dvs. den er tilgjengelig kun når LED-lysene der er på. Når plantene i vertikalanlegget må hvile og lysene er avslått, er det derfor ingen overskuddsvarme som kan tilføres veksthuset og el-kjele eller gasskjele må tas i bruk. Det er også for mye overskuddsvarme til tider, dvs. varmen må slippes ut til omgivelsene for at temperaturen i vertikalanlegget ikke skal bli for høy. I tillegg er selve veksthuset en god energifanger av sollyset som gjør at det i perioder ikke er behov for oppvarming her. Da vil det være behov for utlufting av varm luft, men med følge at verdifull CO₂ til plantene går tapt. Løsningen på dette kan være termisk energilagring, der overskuddsvarmen fra vertikalanlegget eller også fra selve veksthuset blir lagret for senere bruk. Dette kan for eksempel skje ved installasjon av en buffertank slik at lagret varme brukes i veksthuset når lysene er avslått og ellers når direkte varme fra vertikalanlegget ikke er tilstrekkelig. Et slikt system kan muliggjøres ved et varmepumpesystem som kjøler ned vertikalanlegget (og veksthuset ved behov), samtidig som varme til veksthuset hentes både fra vertikalanlegget og buffertanken når det er behov for det. Med en bedre balansert energibruk vil også behovet for lufting reduseres, dvs. luftelukene åpnes mindre og man går over til et semilukket veksthus [35].

¹ <https://vikengartneri.no/2021/10/28/viken-gartneri-har-lansert-vertikalproduksjon/>

² <https://www.nrk.no/trondelag/viken-gartneri-pa-frosta-vil-halvere-stromforbruket-1.15736816>

³ <https://www.bama.no/her-produserer-vi-ost/snarum-gartneri-as/>

⁴ <https://kiwi.no/Artikler/Urteviskeren-fra-Lier/>

En optimalisert bruk av overskuddsvarmen fra vertikalanleggene på Frosta og i Lier krever en helhetlig utredning og analyse av driftssystemene ved de hybride veksthusene. Gartneriene planlegger både nye prosjekt som skal evaluere potensialet for en mer energieffektiv og optimalisert drift av veksthusene og søknader om støtte til investeringer til energisparende infrastruktur i den forbindelse. Formålet er å demonstrere et bærekraftig konsept for økt produktivitet og lønnsomhet i norske veksthus. Konseptet vil innebære økt konkurransekraft på sikt gjennom en redusert total bruk av energi, økt produksjonskapasitet og lavere utslipp av CO₂ ved redusert bruk av fossilt brensel til oppvarming.

5 Litteraturstudie på bruk av varmepumper

En serie av vitenskapelige artikler med søkelys på bruk av varmepumper i veksthus er gjennomgått i denne litteraturstudien. Varmepumper er karakterisert ved at de kan levere termisk energi (varme/kulde) til et gitt område ved en høyere (evt. kaldere) temperatur enn der energien tas fra. Denne temperaturendringen mellom varmekilden og varmesluket (området der varmen leveres) er mulig gjennom en kompresjon av varmepumpens arbeidsmedium. Energien til å drive varmepumpen er normalt elektrisk kraft til kompressoren. Fordelen med en varmepumpe er at den leverer mer termisk energi enn den tilførte elektriske kraften til kompressoren. Varmepumpens effektfaktor (COP = Coefficient of Performance) for oppvarming er gitt ved

$$COP = \frac{Q_H}{P},$$

der Q_H [kW] er den leverte varmen av varmepumpen og P [kW] er det totale effektforbruket, i hovedsak tilført elektrisk effekt til kompressoren. I tilfelle av kjøling er varmepumpens COP gitt ved

$$COP = \frac{Q_C}{P},$$

der Q_C [kW] er varmen som tas ut fra den kalde siden (f.eks. et kjøleskap).

5.1 Studier på bruk av luft-til-luft-varmepumper i veksthus

I dette avsnittet tar vi for oss en del studier på anvendelser av luft-til-luft-varmepumper i veksthus. Campen et al. [36] studerte avfukking i veksthus ved bruk av varmepumpe. Beregninger av energiforbruk og kostnader ble gjort for et veksthus i Nederland under tilsvarende klimatiske forhold og med en relativ fuktighet satt til 85 %. Varmepumpen gjorde det mulig å unngå kondensering på avlingene med et energiforbruk fra 20 til 31 W/ m² for kompressoren, med lavest forbruk for roser og høyest for agurk. Studien konkluderer med at bruk av varmepumpe for avfukking ikke er kostnadseffektiv med mindre den også brukes til oppvarming.

Chou et al. [37] anvendte en numerisk modell til å studere ytelsen til en varmepumpe for klimakontroll i et veksthus med typiske værdata fra Bangkok. Veksthuset i studien hadde et areal på 240 m² og et volum på 600 m³. Varmepumpen besto av en kompressor med elektrisk effekt på 3,7 kW, en 30 kW kondensator og en 37 kW fordampner. Dette var tilstrekkelig til å opprettholde en dagtemperatur på 27 °C, en natttemperatur på 18 °C, og en relativ fuktighet på 40 % i veksthuset. Basert på varierende klimatiske forhold ble varmepumpens COP estimert til å variere mellom 1,2 og 4,0 og varmepumpens SEC ble estimert til å være i intervallet 1 000-16 000 kJ/kg.

Tong et al. [38] studerte bruk av 10 luft-til-luft varmepumper i et eksperimentelt veksthus i Japan. Hovedmålet for analysen var å finne systemets COP. Veksthuset hadde et areal på 151 m² og et sal-formet tak med høyde 3,7 m. Ved å holde veksthuset temperatur på rundt 16 °C når utetemperaturen varierte mellom 5,6 °C og -4,5 °C ble den gjennomsnittlige COP for systemet funnet til å være 4,0. Tong et al. [39]

analyserte også redusert energiforbruk og CO₂-utslipp for varmepumpesystemet ved å sammenligne dette med tilsvarende forbruk og utslipp for et tvillingveksthus av samme størrelse og oppvarmet med en parafinovn. Med en konstant innetemperatur på 16 °C og en utetemperatur mellom -5 °C og 6 °C viste denne studien et redusert energiforbruk på 25-65 % for varmepumpesystemet sammenlignet med det for parafinovnen. Tilsvarende ble CO₂-utslippet redusert med 56-79 % ved bruk av varmepumpesystemet sammenlignet med det fossilbaserte parafinsystemet.

Chantoiseau et al. [12] studerte avfukting i veksthus ved bruk av varmepumpe. Strategien var å unngå kondensering på selve avlingen og samtidig begrense energiforbruket. Eksperimentet ble utført i løpet av vinteren i et 2 350 m² plastikk-veksthus i Frankrike. En sammenligning ble gjort med klassisk ventilasjonsmetode for avfukting og studien fant at avfukting med varmepumpe var 6-8,5 ganger mindre energikrevende enn ventilasjon. Oppvarmingsbehovet i veksthuset ble betraktelig redusert ved at varmen fra kondenseringen av luften kunne gjenbrukes i veksthuset. I høst og vårmånedene var denne varmen tilstrekkelig slik at bruk av gassfyrt oppvarming ikke nødvendig.

Cámara-Zapata et al. [13] evaluerte avfukting ved bruk av varmepumpe for et veksthus i et mildt klima. Studien brukte data fra et 877 m² stort veksthus i Spania med tomatdyrking. Resultatene viste at avfuktingen var mest effektiv ved en relativ fuktighet på mellom 84 % og 88 % og en lufttemperatur på over 15 °C. Under disse forholdene ble det produsert 14,2 kg kondensert damp per time, den spesifikke fuktutvinningsgraden var 2,3 kg/kWh og varmepumpens effektfaktor var på 2,5.

5.2 Sammenlignende studier på bruk av luft-til-luft- og grunnvarmepumper i veksthus

I det følgende tar vi for oss noen sammenlignende studier på bruk av luft-til-luft varmepumper og grunnvarmepumper i veksthus. Furuno et al. [15] sammenlignet COP'en av et luft-til-luft-varmepumpesystem og et varmepumpesystem basert på grunnvarme for oppvarming av veksthus i Japan. Målinger av systemene ble foretatt i løpet av en 8-ukers periode fra november til januar i to veksthus med et areal på 79 m² og en høyde på 2,7 m. Utetemperaturen varierte fra -1,4 °C til 12 °C under måleperioden. For luft-til-luft varmepumpen varierte COP fra 2,2 til 4,5, med et gjennomsnitt på 3,4. For grunnvarmepumpen varierte COP fra 4,0 til 5,7, med et gjennomsnitt på 4,9. Studien fant at COP for grunnvarmepumpen generelt var høyere enn COP for luft-til-luft varmepumpen uavhengig av utetemperaturen i veksthuset.

Nemś et al. [40] analyserte mulighetene for bruk av varmepumpe til oppvarming i et veksthus i Polen. Veksthuset hadde et areal på 420 m² og en mønehøyde på 4,77 m, og det ble dyrket blomster i veksthuset med en ønsket temperatur på 12-15 °C i vekstsesongen. Analysen viste at en 21,5 kW grunnvarmepumpe ville ha en COP i intervallet 5,53-5,83. For en luft-til-luft-varmepumpe med installert effekt 23 kW ville COP'en variere mellom 2,59 og 4,00. Med høyere investeringskostnader for en grunnvarmepumpe viste en økonomisk analyse at tilbakebetalingstiden for denne var på 18 år, mens tilbakebetalingstiden for en luft-til-luft-varmepumpe var på 5,5 år. På grunn av den mye lavere tilbakebetalingstiden for en luft-til-luft-varmepumpe konkluderte studien med at et luft-til-luft-varmepumpesystem er det mest gunstige for oppvarming av veksthus tilpasset de klimatiske forholdene i Polen.

5.3 Studier på bruk av grunnvarmepumper i veksthus

Vi ser her på noen studier på anvendelser av varmepumper i veksthus basert på grunnvarme. Kozai [7] analyserte bruk av et vann-til-vann-varmepumpesystem til oppvarming av et 333 m² stort veksthus i Japan. Varmekilden for varmepumpen var grunnvann ved 14 °C. Kozai fant en COP for varmepumpen i intervallet 1,76-2,16 og et halvert energiforbruk for veksthuset med bruk av denne.

Benli og Durmuş [16] og Benli [17] studerte en grunnvarmepumpe kombinert med termisk varmelagring for oppvarming av veksthus. Varmelagringen fant sted i en sylindrisk tank og et faseforandringsmateriale (phase change material = PCM) ble anvendt for maksimalt opptak av varme. Veksthuset hadde et areal på 30 m² og en høyde på 2,9 m. De to studiene tok måledata i litt forskjellige perioder fra høst til vår og viste begge en COP for varmepumpen i intervallet 2,3-3,8 i periodene. For systemet som helhet varierte COP i intervallet 2,0-3,5. Benli [17] skriver at energilagring for oppvarming av veksthus har vært studert siden 1980-tallet og referer til en rekke artikler med bruk av PCM i den forbindelse.

Benli [41] sammenlignet et varmepumpesystem med horisontal grunnvarme og vertikal grunnvarme for et modellveksthus i Tyrkia. Veksthuset hadde et areal på 30 m², og målinger ble foretatt over en 6-måneders periode fra november til april hvor den gjennomsnittlige utetemperaturen varierte fra -4,0 °C til 15,4 °C. Den horisontale varmeveksleren hadde en dybde på 2 m under grunnen, mens den vertikale varmeveksleren hadde en dybde på 60 m. Med noen variasjoner viste målingene en COP på 3,3 for varmepumpen i det horisontale systemet, mens varmepumpen i det vertikale systemet hadde en COP på 3,5. Resultatene viste at det vertikale varmepumpesystemet var mer effektivt enn det horisontale, men et vertikalt system har høyere installasjonskostnader enn et horisontalt system.

Boughanmi et al. [42] studerte et geotermisk varmepumpesystem for kjøling av veksthus i Tunis. To konisk-formede varmevekslere ble installert vertikalt ned til en dybde på 3 m under overflaten. Veksthuset var et lite kapell-drivhus med lengde 2,5 m, bredde 1,5 m og en høyde på 2 m. Målinger ble foretatt i juni måned og viste at systemet kunne senke temperaturen med 12 °C, fra et gjennomsnitt på 53 °C til 41 °C. Ytelsen av varmepumpesystemet ble estimert til en COP på 3,9 for varmepumpen og til 2,82 for hele systemet.

Anifantis et al. [43] studerte ytelsen til en geotermisk varmepumpe for oppvarming av et veksthus i Italia. Veksthuset hadde et areal på 48 m² og et volum på 144 m³. Eksperimentelle målinger ble foretatt i perioden november til mars og viste en gjennomsnittlig COP på 4,7 for varmepumpen. Grunnvarme til varmepumpen ble hentet opp gjennom et 120 m dypt borehull.

5.4 Studier på bruk av vann-til-vann-varmepumper i veksthus

Vi refererer her til noen studier på bruk av vann-til-vann varmepumper i veksthus. Yang and Rhee [44] evaluerte et varmepumpesystem for å utnytte overskuddsvarmen fra solstrålingen i et veksthus. Systemet inkluderte buffertanker, viftekonvektorer og elektriske ovner for supplerende oppvarming.

Agrebi et al. [45] gjorde en studie på bruk av en 10 kW solassistert varmepumpe i et 100 m² stort veksthus i Tunis. Studien fant at kombinasjonen av solenergi og varmepumpe hadde en positiv effekt på varmepumpens levetid, og at systemet var adekvat for oppvarming av veksthuset om vinteren og kunne opprettholde en stabil temperatur i veksthuset.

5.5 Oversiktsartikler på energieffektiv klimakontroll i veksthus

Cuce et al. [46] gir en omfattende oversikt over nøkkelstrategier for energisparetiltak og teknologier for klimakontroll i veksthus. Fornybare og bærekraftige teknologiske løsninger blir analysert med hensyn til kostnads- og energieffektivitet for bruk i veksthus. Formålet er redusert energibruk og lavere utslippsnivå. Teknologier som blir vurdert er energieffektive varmepumper, teknikker for undergrunns varmelagring, bruk av PCMs, solcelleanlegg, innovativ ventilasjon, effektive lyssystem, og bedre metoder for isolasjon og andre hybride løsninger.

Rabbi et al. [5] gir en oversikt over fuktighetskontroll og kjølemetoder for veksthus i områder med varmt klima der kjøling er nødvendig. Kjøleteknologier som blir diskutert er ventilasjonsbasert kjøling, kjøling ved fordampning, varmepumper, geotermiske kjølesystemer, og passive kjølemetoder basert på skyggelegging og refleksjon. Teknologier for fuktighetskontroll som blir omtalt er ventilasjonsbasert kontroll, avfukting ved bruk av varmepumper og metoder for adsorpsjon.

Ghoulem et al. [47] gir en oversikt over design og kjølemetoder for veksthus i varmt klima. Mekaniske systemer med vifter øker ventilasjonen i veksthus, men må kombineres med andre kjølemetoder for å senke temperaturen tilstrekkelig i den varmeste tiden i sommermånedene. En kombinasjon av naturlig ventilasjon, fordampningskjøling og solskjerming har potensial til å redusere energibehovet for å skape best mulige vekstforhold under varme klimatiske forhold.

Choab et al. [48] gir en litteraturoversikt over diverse veksthusystemer for effektiv klimakontroll. Data for tekkematerialer blir diskutert i detalj, og form og orientering blir sammenlignet under ulike forhold. Artikkelen konkluderer med at en øst-vest orientering er den beste for alle breddegrader siden dette bidrar til økt inngang av solstråler og lavere energibehov.

6 Oppsummering

Veksthusnæringen i Norge har vært igjennom en omfattende omstillingsprosess de siste 20-30 årene med strukturelle endringer i form av en sterk nedgang i antall bedrifter og en dreining mot større enheter med større vekstareal. Det har også vært en omstilling til økt bruk av fornybar energi og mer effektive løsninger for kontroll av veksthusklimaet. Dette har ført til mer effektivt energibruk og en samlet reduksjon i CO₂-utslippene på om lag 75 % for norske veksthus perioden 1989-2020. Det er imidlertid fortsatt behov for omstilling og mindre bruk av fossilt brensel, og Gartnerforbundet har som målsetting at næringen skal være tilnærmet 100 % fornybar innen 2030.

Bærekraftig og lønnsom drift er viktige faktorer for at norsk veksthusnæring skal kunne opprettholdes inn i fremtiden. Marginene for lønnsom veksthusdrift er imidlertid små, og med de økte prisene på strøm og gass som vi har opplevd den siste tiden har mange gartnerier sett seg nødt til å stenge ned eller utsette produksjonen for ikke å gå på altfor store økonomiske tap. Næringen ønsker seg både bedre forutsigbarhet og rammevilkår for å kunne sikre levedyktighet og lønnsomhet. Videre omstilling til bærekraftig drift krever også store investeringer, og det er viktig for næringen at myndighetene legger til rette for dette på en god måte. I tider med stor usikkerhet er det blitt tydeligere enn noen gang at større grad av selvforsyning bør være en viktig del av norsk beredskap og matforsyningsikkerhet. Veksthusproduksjon i Norge kan bidra til større andel av norskprodusert mat og mindre avhengighet av importerte matvarer.

Erfaringer fra demoanlegget for bruk av varmepumper og termisk energilagring ved Mære landbruksskole har vist at energiforbruket ble redusert med ca. 80 % i forhold til hva det var før varmepumpesystemet ble installert. Teknologien med varmepumper førte til mindre bruk av fuktstyring, bedre kontroll med veksthusklimaet og større tomatavlinger enn tidligere. Basert på dette er et energieffektivt veksthuskonsept beskrevet her med et integrert varmepumpesystem som kontrollerer både oppvarming og nedkjøling. Konseptet bidrar til bedre regulering av luftfuktigheten, mindre behov for ventilasjon med lufteluker, og mindre energitap og tap av CO₂. Termisk energilagring kan også være en integrert del av energisystemet som tar vare på overskuddsvarme til senere bruk. Dette kan innebære både sesonglagring av varme og lagring som utnytter temperatursvingningene mellom dag og natt. Et annet energieffektivt veksthuskonsept er basert på en kombinasjon av vertikaldyrking og tradisjonell veksthusproduksjon. I dette hybride konseptet spirer småplanter i noen uker i vertikalanlegget før de flyttes over til de tradisjonelle veksthusene for endelig sluttvekst. Energigevinsten her ligger i at overskuddsvarmen fra vertikalanlegget kan brukes til oppvarming av det tradisjonelle veksthuset. Hybridkonseptet bygger også på bruk av varmepumper og termisk lagring av overskuddsvarme. Erfaringene fra de to hybride veksthusene som finnes i Norge i dag er at konseptet har gitt større produksjonskapasitet samtidig som energiforbruket pr. produsert enhet er blitt redusert. I tillegg er det blitt lavere CO₂-utslipp som en følge av redusert bruk av propankjel til oppvarming.

Nye installasjoner av energisparende tiltak for gartnerier kan gjøres på ulike måter og må tilpasses de lokale forhold. For å optimalisere nødvendige investeringer og nye energieffektive konsepter vil det være

nødvendig med en detaljert analyse av det enkelte anlegg. Operasjonelle betingelser og klimatiske forhold i veksthusene vil også variere og avhenge av hvilke planter som dyrkes. Det er fortsatt behov for mindre bruk av naturgass/propan til oppvarming i norske veksthus, og systemer med bruk av varmepumper i kombinasjon med termisk energilagring vil være et godt alternativ for energieffektiv og klimavennlig veksthusproduksjon. Samtidig er CO₂ å betrakte som et næringsstoff for planter, og CO₂-tilsetning i veksthus kan øke produksjonen med 30-50 %. En overgang til mer effektive belysningsløsninger vil også kunne redusere energiforbruket, men må sees i sammenheng med påvirkning på plantene. Et energieffektivt veksthuskonsept krever også et godt system for kontroll og styring av de klimatiske forhold.

Referanser

- [1] Norsk Gartnerforbund Energistrategi 2012-2020: <http://ngfenergi.no/ngf/energistrategi-2012-2020/>
- [2] Shen, Y., Wei, R., Xu, L., Energy Consumption Prediction of a Greenhouse and Optimization of Daily Average Temperature, *Energies* **11**, Article Number: 65 (2018)
- [3] Gruda, N., Impact of Environmental Factors on Product Quality of Greenhouse Vegetables for Fresh Consumption, *Critical Reviews in Plant Sciences* **24**, 227-247 (2005)
- [4] Santosh, D. T., Tiwari, K. N., Singh, V. K., Reddy, A. R. G., Micro Climate Control in Greenhouse, *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* **6**, 1730-1742 (2017)
- [5] Rabbi, B., Chen, Z.-H., Sethuvenkatraman, S., Protected Cropping in Warm Climates: A Review of Humidity Control and Cooling Methods, *Energies* **12**, Article Number: 2737 (2019)
- [6] Nisbet, S. K., Chee, K.K., The application of heat pumps to glass houses, *Building and Environment* **12**, 165-174 (1977)
- [7] Kozai, T., Thermal performance of an oil engine driven heat pump for greenhouse heating, *Journal of Agricultural Engineering Research* **35**, 25-37 (1986)
- [8] Sami, S. M., Tulej, P.J., New design for an air-source heat pump using a ternary mixture for cold climates, *Heat Recovery System & CHP* **15**, 521-529 (1994)
- [9] Lee J.-Y., Current status of ground source heat pumps in Korea, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **13**, 1560-1568 (2009)
- [10] Litjens, G. B. M. A., Worrell, E., van Sark, W. G. J. H. M., Lowering greenhouse gas emissions in the built environment by combining ground source heat pumps, photovoltaics and battery storage, *Energy & Buildings* **180**, 51-71 (2018)
- [11] Kozai T., Ohyama, K., Tong, Y., Tongbai, P., Nishioka, N., Integrative Environmental Control Using Heat Pumps for Reductions in Energy Consumption and CO₂ Gas Emission, Humidity Control and Air Circulation, International Symposium on High Technology for Greenhouse Systems: GreenSys2009, *Acta Horticulturae* **893**, 445-462 (2011)
- [12] Chantoiseau E., Migeon, C., Chasseriaux, G., Bournet, P.-E., Heat-pump dehumidifier as an efficient device to prevent condensation in horticultural greenhouses, *Biosystems Engineering* **142**, 27-41 (2016)
- [13] Cámara-Zapata, J. M., Sánchez-Molina, J. A., Rodríguez, F., López, J., Evaluation of a dehumidifier in a mild weather greenhouse, *Applied Thermal Engineering* **146**, 92-103 (2019)
- [14] Wu, R., Energy Efficiency Technologies – Air Source Heat Pump vs. Ground Source Heat Pump, *Journal of Sustainable Development* **2**, 14-23 (2009)
- [15] Furono, S., Okushima, L., Sase, S., Comparison of coefficient of performance (COP) between an underground water source heat pump system and an air source heat pump system for greenhouse heating in cold and snowy areas in Japan, *Journal of Agricultural Meteorology* **72**, 173-177 (2016)
- [16] Benli, H., Durmus, A., Evaluation of ground-source heat pump combined latent heat storage system performance in greenhouse heating, *Energy and Buildings* **41**, 220-228 (2009)

- [17] Benli, H., Energetic performance analysis of ground-source heat pump system with latent heat storage for a greenhouse heating, *Energy Conversion and Management* **52**, 581-589 (2011)
- [18] Aye, L., Fuller, R. J., Canal, A., Evaluation of a heat pump system for greenhouse heating, *International Journal of Thermal Sciences* **49**, 202-208 (2010)
- [19] "Grønne" tomater ved Mære landbruksskole; <https://www.landbruk.no/baerekraft/maere-produserer-gronne-tomater/>
- [20] <https://www.ssb.no/statbank/table/12834>
- [21] <https://www.ssb.no/statbank/table/12830>
- [22] <https://ngfenergi.no/statistikk/co2-utslipp-2/>
- [23] <https://gartnerforbundet.no/wp-content/uploads/2020/11/NGFs-Energi-og-klimastrategi-2021-2030.pdf>
- [24] <https://gartnerforbundet.no/kompensasjonsnivaet-er-for-lavt/>
- [25] <https://www.fn.no/nyheter/cop26-her-er-alt-om-aarets-klimatoppmoete>
- [26] <https://ngfenergi.no/klimastyring/co2/>
- [27] <http://www.omafra.gov.on.ca/english/crops/facts/00-077.htm#suppl>
- [28] Verheul, M., Myter om veksthusproduksjon i Norge, Kronikk, Stavanger Aftenblad 9. februar 2019; se <https://gartnerforbundet.no/tre-myter-om-veksthusproduksjon-av-gronnsaker-i-norge/>
- [29] <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-09-30/your-tomatoes-may-cost-more-as-gas-prices-hit-dutch-greenhouses>
- [30] Beacham, A. M. et al., Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards, *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* **94**, 277-283 (2019)
- [31] van Delden, S.H. et al., Current status and future challenges in implementing and upscaling vertical farming systems, *Nature Food* **2**, 944–956 (2021)
- [32] <https://forskning.no/innovasjon-landbruk-miljoteknologi/vertikalt-landbruk-viser-potensial-skall-framtidens-gronnsaker-dyrkes-i-hoyhus/1775295>
- [33] <https://www.landbruk.no/baerekraft/norsk-gronnsaksproduksjon-skal-oke-med-nye-produksjonsmetoder/>
- [34] Kusuma, P. et al., From physics to fixtures to food: current and potential LED efficacy, *Horticulture Research* **7**:56, 1-9 (2020)
- [35] <https://ngfenergi.no/veksthuset/semilukket/>
- [36] Campen, J. B., Bot, G. P. A., de Zwart, H. F., Dehumidification of Greenhouses at Northern Latitudes, *Biosystems Engineering* **86**, 487-493 (2003)
- [37] Chou, S.K., Chua, K. J., Ho, J. C., Ooi, C. L., On the study of an energy-efficient greenhouse for heating, cooling and dehumidification applications, *Applied Energy* **77**, 355-373 (2004)
- [38] Tong, Y., Kozai, T., Nishioka, N., Ohyama, K., Greenhouse heating using heat pumps with a high coefficient of performance (COP), *Biosystems Engineering* **106**, 405-411 (2010)
- [39] Tong, Y., Kozai, T., Nishioka, N., Ohyama, K., Reductions in energy consumption and CO₂ emissions for greenhouses heated with heat pumps, *Applied Engineering in Agriculture* **28**, 401-406 (2012)
- [40] Nemś, A., Nemś, M., Świder, K., Analysis of the Possibilities of Using a Heat Pump for Greenhouse Heating in Polish Climatic Conditions – A Case Study, *Sustainability* **10**, 3483 (2018)
- [41] Benli, H., A performance comparison between a horizontal source and a vertical source heat pump system for a greenhouse heating in the mild climate Elaziğ, Turkey, *Applied Thermal Engineering* **50**, 197-206 (2013)
- [42] Boughanmi, H., Lazaar, M., Bouadila, S., Farhat, A., Thermal performance of a conic basket heat exchanger coupled to a geothermal heat pump for greenhouse cooling under Tunisian climate, *Energy and Buildings* **104**, 87-97 (2015)
- [43] Antifantis, A. S., Pascuzzi, S., Scarascia-Mugnozza, G., Geothermal source heat pump performance for a greenhouse heating system: an experimental study, *Journal of Agricultural Engineering* **XLVII:544**, 164-170 (2016)



- [44] Yang, S.-H., Rhee, J., Utilization and performance evaluation of a surplus air heat pump system for greenhouse cooling and heating, *Applied Energy* **105**, 244-251 (2013)
- [45] Agrebi, S., Chargui, R., Tashtoush, B., Guizani, A., Comparative performance analysis of a solar assisted heat pump for greenhouse heating in Tunisia, *Int. Journal of Refrigeration* **131**, 547-558 (2021)
- [46] Cuce, E., Harjunowibowo, D., Cuce, P. M., Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **64**, 34-59 (2016)
- [47] Ghoulem, M., El Moueddeb, K., Nehdi, E., Boukhanouf, R., Calautit, J. K., Greenhouse design and cooling technologies for sustainable food cultivation in hot climates: Review of current practice and future status, *Biosystems Engineering* **183**, 121-150 (2019)
- [48] Choab, N., Allouhi, A., El Maakoul, A., Kousksou, T., Saadeddine, S., Review on greenhouse microclimate and application: Design parameters, thermal modelling and simulation, climate controlling technologies, *Solar Energy* **191**, 109-137 (2019)