

HØGSKOLEN I OSLO
OG AKERSHUS

GRUPPE NR.

TILGJENGELIGHET

Åpen

Institutt for Bygg- og energiteknikk
Postadresse: Postboks 4. St. Olavs plass, 0130 Oslo
Besøksadresse: Pilestredet 35, Oslo

Telefon: 67 23 50 00
www.hioa.no

MASTEROPPGAVE

MASTEROPPGAVENS TITTEL Solenergi for bygg i nordisk klima: <i>Hvordan lufttemperatur og klima påvirker den årlige energiutnyttelse til solfangere og solcellepanel i bygg.</i>	DATO 7. januar 2018
	ANTALL SIDER/ANTALL SIDER I VEDLEGG 54/29
FORFATTER Torgeir Berre	VEILEDERE Habtamu Bayera Madessa
UTFØRT I SAMARBEID MED HiOA	KONTAKTPERSON Habtamu Bayera Madessa

SAMMENDRAG

Ved bruk av klimadata og velkjente matematiske funksjoner for varmetapstall og solposisjon, er det utviklet script i Matlab for energiberegninger av solceller og solfanger i løpet av et år. Dette ble gjort for å se hvordan klima og temperatur påvirker energiutbytte. Med et 4 m^2 solfangerareal og en 0.39 m^3 akkumuleringstank, viser beregningene at 50% av energibehovet til forbruksvann kan dekkes. Ved å føre ventilasjonsluft på undersiden av solcellepanelet vil den årlige elektriske energiutnyttelsen øke fra 95 kWh/m^2 til 101.1 kWh/m^2 . Samtidig beregnes det å være 295.15 kWh/m^2 termisk energi som kan utnyttes til å varme opp ventilasjonsluften.

3 stikkord:

Solfanger

Solcellepanel

Matlab

Forord

Det har vært en omfattende prosess å jobbe med denne oppgaven. Å lage modeller for å undersøke noe jeg har lurt på i flere år har vært givende. Mye har blitt løst som jeg så for meg, men det har også vært mange overraskelser og utfordringer på veien. Det er fint å slutføre nå, og kjenne at jeg har fått til noe jeg selv kan være fornøyd med. Det er fint å tenke på at jeg har oppnådd det jeg personlig ønsket å få ut av å skrive en masteroppgave. Jeg føler jeg nå behersker grunnleggende programmering, som var ett av de store målene med oppgaven. At jeg også har klart å fullføre og gjøre meg ferdig er en stor seier.

Jeg skylder en stor takk for hjelp til min veileder Habtamu Bayera Madessa. Hans forståelse og tålmodighet har vært uunnværlig for å fullført denne oppgaven. Jeg er veldig takknemelig for tiden han har satt av til veiledning. Disse samtalen har vært utrolig inspirerende.

Tusen takk til HiOA for mange flotte medstudenter og ansatte som har hjulpet og inspirert meg i alle år jeg har gått her. Tusen takk Yvonne Groseth for hjelp med illustrasjoner. Takk til Tore for støtte og hyggelige avbrekk. Takk til August og Aksel for å latt meg lufte utfordringene med koden. Takk til Helga og Kristoffer og oppmuntrende og tekniske forklaringer. Takk til Yngvar for å få meg bort fra det teoretiske og abstrakte, og inn på sporet av praktiske størrelser. Tusen takk til Nora Holand for gode samtaler og hjelp med programvare. Tusen takk til Erlend Abrahamsen for hjelp til korrektur og gode samtaler. Tusen takk til Botner for alltid å kunne holde kontakten og inspirere. Tusen takk til Tønna for å passe på at lunsjen ikke drar ut dagen. Tusen takk Martin for inspirasjon og virkelig kunne gå i dybden på temaet. Tusen takk Tora for at du ikke gjesper hver gang jeg skravler i vei om koden. Tusen takk til Ingrid, Pål og Einar for hjelp til å gå igjennom oppgaven. Til sist vil jeg gi en veldig stor takk til mine foreldre Frode og Kari Anne, dere er best.

Torgeir Berre

Oslo, 7. januar 2018

Nomenklatur

Symbol	Betydning	Verdi	Enhet
A	Solas azimuth vinkel	Variabel	[°Deg]
a_{cell}	er curve fitting parameter	Variabel	[°Deg]
A_{ss}	Azimuth vinkel for solnedgang	Variabel	[°Deg]
AM_a	Luftmasse	Variabel	[–]
Cp_f	Varmekapasitet vann	Variabel	[J/(kg · K)]
DHI	Diffuse horisontal radiation	Input	[W/m ²]
DNI	Direkte normal bestråling	Input	[W/m ²]
E_a	Extraterrestrial radiation	Variabel	[W/m ²]
f_f	Friksjonsfaktor rør	Variabel	[–]
$h_{c,f}$	Konveksjonstall for vannet i rør	Variabel	[W/m ² · K]
$h_{c,g1g2}$	Konveksjonstall mellom glass 1 og 2	Variabel	[W/m ² · K]
$h_{c,g2a}$	Konveksjonstall mellom glass 2 og luft	Variabel	[W/m ² · K]
$h_{c,pg1}$	Konveksjonstall mellom plate og glass 1	Variabel	[W/m ² · K]
$h_{r,g1g2}$	Strålingstall mellom glass 1 og 2	Variabel	[W/m ² · K]
$h_{r,g2a}$	Strålingstall mellom glass 2 og luft	Variabel	[W/m ² · K]
$h_{r,pg1}$	Strålingstall mellom plate og glass 2	Variabel	[W/m ² · K]
HOD	Timer med dagslys	Variabel	[Time]
I_{diff}	Diffuse bestråling	Variabel	[W/m ²]
$I_{direktel}$	Direkte bestråling	Variabel	[W/m ²]
I_{total}	Total bestråling	Variabel	[W/m ²]
$I_{total,horisontal}$	Total horisontal bestråling	Variabel	[W/m ²]
I_0	er the diode rc strøm	Variabel	[A]
I_l	er strøm drevet av stråling	Variabel	[A]
Nu_f	Nussel-tallet for vann i rør	Variabel	[–]
Nu_{g2a}	Nussel-tallet mellom glass 2 og luft	Variabel	[–]
Nu_{g1g2}	Nussel-tallet mellom glass 1 og 2	Variabel	[–]
$Nu_{nat,g2a}$	Nussel-tallet naturlig konveksjon mellom glass 2 og luft	Variabel	[–]
Nu_{pg1}	Nussel-tallet mellom plate og glass 1	Variabel	[–]
$Nu_{tot,g2a}$	Nussel-tallet tvungen og naturlig konveksjon glass 2 og luft	Variabel	[–]
$Pr_{air,g1g2a}$	Prantle-tallet mellom glass 1 og 2	Variabel	[–]
$Pr_{air,pg1}$	Prantle-tallet mellom plate og glass 1	Variabel	[–]
Pr_f	Prantle-tallet for vannet i røret	Variabel	[–]
Pr_{g2a}	Prantle-tallet mellom glass 2 og luft	Variabel	[–]
R_s	Termisk motstand siden av solfanger	Variabel	[m ² · K/W]
R_{topp}	Termisk motstand oversiden av solfanger	Variabel	[m ² · K/W]
$R_{topp,g1g2}$	Termisk motstand mellom glass 1 og 2	Variabel	[m ² · K/W]
$R_{topp,g2a}$	Termisk motstand glass 2 og luft	Variabel	[m ² · K/W]
R_{pg1}	Termisk motstand plate og glass 1	Variabel	[m ² · K/W]
Pr_{g1g2}	Prantle-nummer mellom glass 1 og 2	Variabel	[–]
$Pr_{nat,g2a}$	Prantle-nummer naturlig konveksjon g2 og luft	Variabel	[–]

Pr_{pg1}	Prantle-nummer mellom plate og glass 1	Variabel	[—]
$Pr_{cr.g2a}$	Prantle-nummer for turbulent strømning glass 2 og luft	Variabel	[—]
Re_f	Reynholds-nummer for vann i rør	Variabel	[—]
Re_{g2a}	Reynholds-nummer mellom glass 2 of luft	Variabel	[—]
R_s	er serie resistanse	Variabel	[ohm]
T_a	Temperatur på luft ute	Input	[°K]
T_{fi}	Temperatur på vann inn i solfanger	Input	[°K]
T_{fo}	Temperatur på vann ut av solfanger	Variabel	[°K]
T_{g1}	Temperatur på glass 1	Variabel	[°K]
T_{g2}	Temperatur på glass 2	Variabel	[°K]
T_K	Temperatur i Kelvin	Konstant	[°K]
T_{pm}	Temperatur plate	Variabel	[°K]
T_{sky}	Temperatur på himmelen	Variabel	[°K]
Tid_s	Solar tid, 12.00 er sola i sør	Variabel	[Time]
Tid_{sr}	Tid for soloppgang	Variabel	[Time]
Tid_{ss}	Tid for solnedgang	Variabel	[Time]
U_l	Samlet U-verdi solfanger	Variabel	[W/m ² · K]
v_{wind}	Vindhastighet	Input	[m/s]
$Vind_{retning}$	Vindretning	Input	[°DEG]

Symbol	Betydning	Verdi	Enhet
$A_{cross-tube}$	Tverrsnitt-areal rør	Input	[m ²]
A_p	Areal plate	4	[m ²]
D_i	Inde diamet	0.0124	[m]
D_o	Ytre diameter	0.0134	[m]
H_{pg1}	forhold mellom lengde mellom plate og glass 1	100	[m ²]
H_{pg2}	Forhold mellom lengde mellom plate og glass 2	100	[—]
L_1	Lengde	2	[m]
L_2	Bredde	2	[m]
L_3	Høyde	0.075	[m]
L_{cr}	Lengde der strømningen blir turbulent	Variabel	[m]
L_{g1g2}	Avstand mellom glass 1 og glass 2	0.02	[m]
L_{pg1}	Avstand mellom plate og glass 1	0.02	[m]
L_{mf}	Massestrøm til fluidet	0.1	[m]
n	Antall rør i solfanger	20	[—]
N	Dag i året	Variabel	[m]
$Thicknes_s$	Tykkelse på siden av solfangeren	0.149	[m]
$Thickness_b$	Tykkelse under solfanger	0.05	[m]
$Thickness_p$	Tykkelse på plate i solfangere	0.01	[m]
W	Avstand mellom rør	10	[m]

Symbol	Betydning	Verdi	Enhet
α	Vinkel på solhøyde	Variabel	[Deg]
α_{max}	Maksimal vinkel på solhøyde	Variabel	[Deg]
β	Solfangers helningsvinkel	34	[Deg]
ε_{diff}	Brukes til difuse bestråling	Variabel	[Deg]
ε_{g1}	Emissivitet til glass	0.95	[–]
ε_p	Emissivitet til plate	0.05	[–]
γ	Solfangers azimuth vinkel	Input	[Deg]
$k_{air-g1g2}$	Konduktivitet til luft mellom glass 1 og 2	Variabel	[W/(m · K)]
$k_{air-pg1}$	Konduktivitet til luft mellom plate og glass 1	Variabel	[W/(m · K)]
k_f	Konduktivitet til vann i rør	Variabel	[W/(m · K)]
k_{g2a}	Konduktivitet til luft mellom glass 1 og luft	Variabel	[W/(m · K)]
k_{glass}	Konduktivitet til glass	0.96	[W/(m · K)]
λ_b	Konduktivitet bak solfanger	0.036	[W/(m · K)]
λ_p	Konduktivitet plate solfanger	237	[W/(m · K)]
λ_s	Konduktivitet side solfanger	0.036	[W/(m · K)]
λ_t	Konduktivitet tank	0.013	[W/(m · K)]
μ_f	Dynamisk viskositet vann	Variabel	[kg/(m · s)]
ω	Timesvinkel	Variabel	[?]
ω_{sr}	Timesvinkel soloppgang	Variabel	[?]
ω_{ss}	Timesvinkel solnedgang	Variabel	[?]
ϕ	Breddegrad	Input	[Deg]
σ	Stefan-Boltzmanns konstant	5.67×10^{-8}	[J/(s · m ² · K ⁴)]
θ_i	Vinkel på innstrålt bestråling	Variabel	[Deg]
θ_z	Zenith vinkel	Variabel	[Deg]
δ	Jordens deklinasjonsvinkel	Variabel	[Deg]
δ_f	Tetthet vann i rør	Variabel	[kg/m ³]
$\delta_{reflektans}$	Refleksjon av stråling fra bakken	Variabel	[kg/m ³]
$\nu_{air-g1g2}$	Kinematisk viskositet mellom glass1 og glass 2	Variabel	[m ² /s]
ν_{g2a}	Kinematisk viskositet mellom glass 2 og luft	Variabel	[m ² /s]

Sammendrag

I denne oppgaven har det blitt utarbeidet matematiske modeller for å beregne energibalansen til både en solfanger og et solcellepanel. Det er benyttet et standardisert klimadatasett, fra NS:3031, med timesverdier av temperatur, vindhastighet, direkte og diffus solstråling. Det er gjort simuleringer med klimadata, solens posisjon og energibalanse for hver time i løpet av et helt år.

Ved hjelp av programmet Matlab har det vært mulig å gjøre store beregninger. Blandt annet ble det gjort beregninger av energibalansen til solfangerens akkumuleringstank, inndelt i tre forskjellige temperatursjikt. Det har også blitt gjort beregninger av den maksimale effekten til et solcellepanel for innstrålt sollys, temperatur og spenning på solcellepanelet.

Det vil være en ca 20 % større energiutnyttelse i året for en solfanger med to glass i stedet for ett. En helningsvinkel på 34 grader går høyest årlig energiutnyttelse, solfangerarealet bør dimensjoneres etter akkumuleringsvolum for anlegget. Med en 390 liters tank og et solfangerareal på 4 m² viser beregningene at det er mulig å dekke 50% av et gjennomsnittlig energibehov til forbruksvann med solfangere. Dette stemmer godt med tommelfingeregelen til (Andresen, 2008). Den årlige energiutnyttelsen er beregnet til gi 1006 kWh/m², dette resultatet viser det dobbelte av gjennomsnittet fra målingene i (Lappegard, 2014). Det kan delvis forklares med bruk av dobbelt glass, men likt sammenligningsgrunnlag må benyttes for å avgjøre hvor nøyaktige beregningene i denne oppgaven er. Antall variabler i solfangermodellen gjør også at det er større sannsynlighet for feil. Det nordiske klimaet har kalde vintre, lite sol. Om sommeren er det mye sol og høy temperatur. Dette gjør det krevende å få dekket mer enn 50% av energibehovet til forbruksvann i bygg.

For et solcellepanel med kun naturlig konveksjon på undersiden, vil den årlige energiutnyttelsen være 95 kWh/m². På de varmeste dagene vil solcelletemperaturen nærme seg 80°C. Føres ventilasjonsluften med en hastighet 5 m/s under solcellepanelet, vil den årlige energiutnyttelsen øke til 101.1 kWh/m², som følge av økt elektrisk virkningsgrad. Den maksimale solcelletemperaturen synker da til litt over 60°C. Det vil kun gi en årlig økning på ca. 6 kWh/m² ved å føre ventilasjonsluften under solcellepanelet. Den termiske energien som kan utnyttes til oppvarming med å gjøre dette vil derimot være på 295.15 kWh/m². Dette er et betydelig energitilskudd, som kan utnyttes for bygninger i nordisk klima med et oppvarmingsbehov. Det termiske energitilskuddet fra solcellepanel bør derfor bli tatt med i betraktning ved utforming av solcelleanlegg.

Det er forsøkt å lage et siste program som gjør beregningene med et vannkjølt solcellepanel. Disse resultatene er enda ikke troverdige, da det innenfor tidsrammen i denne oppgaven ikke lot seg gjøre å finjustere en ny modell, basert på de to modellene til solcellepanelet og solfangeren.

Modellen er detaljert, det øker sannsynligheten for menneskelig feil og resultatene må verifiseres med faktiske forhold for å benyttes i praktisk sammenheng. En detaljert modell gir stor frihet til å endre variabler og design for optimalisering av solfanger og solceller.

Innhold

Forord	i
Nomenklatur	ii
Sammendrag	v
1 Innledning	1
1.1 Problemstilling	2
Prosjektbeskrivelse	2
2 Teori	3
2.1 Energibevaring	3
2.1.1 Konduksjon	3
2.1.2 Konveksjon	3
2.1.3 Stråling	4
2.1.4 Strøm	4
2.2 Solens Energi	4
2.2.1 Solfanger	5
2.2.2 Solceller	5
2.3 Sammenligningsgrunnlag til årlig energiutnyttelse	5
3 Metode	6
3.1 Instrumenter og data	6
3.1.1 Matlab	6
3.1.2 Klima og klimadata	6
3.1.3 Termodynamiske egenskaper	7
3.1.4 Varmtvannsforbruk	7
3.2 Solens posisjon	8
3.3 Solens energi	10
3.4 Diffus stråling	10
3.5 Matematisk modell for platesolfanger	12
3.5.1 Varmetap fra toppen av solfangeren	12
3.5.2 Varmeovergang fra plate til vann	16
3.5.3 Varmtvannsbereder	18
3.5.4 Numerisk beregningsmetode	21
3.6 Matematisk modell for solcelle	22
3.6.1 Solcellepanelets energibalanse	25
3.6.2 Numerisk beregningsmetode solcellepanel	26
3.7 Matematisk modell for vannkjølt solcellepanel	27
3.7.1 Det vannkjølte solcellepanelets energibalanse	27
3.7.2 Numerisk beregningsmetode for vannkjølt solcellepanel	28

4	Resultat og diskusjon	29
4.1	Variabler for en Platesolfanger	29
4.2	Årssimulering av platesolfanger	33
4.3	Solcelle	38
4.4	Solcellepanel med luftkjøling	43
4.5	Solcellepanel med vannkjøling	48
5	Konklusjon	50
5.1	Konklusjon solfanger	50
5.2	Konklusjon solcellepanel	50
5.3	Konklusjon vannkjølt solcellepanel	51
6	Videre arbeid	51
6.1	Videre arbeid solfanger	51
6.2	Videre arbeid solcelle	51
6.3	Videre arbeid solcelle med vannkjøling	52
7	Kilder	53
A	Matlascript solfanger	55
B	Matlascript solcellepanel	68
C	Solcellepanel med vannkjøling	75

Figurer

1	Varmtvannsbehov i løpet av et døgn	7
2	Varmetapstall i en platesolfanger	14
3	Akkumuleringstank	18
4	Varmetapstall på et solcellepanel	25
5	Varmetapstall for et vannkjølt solcellepanel	27
6	Energiutnyttelse og avstand luftsjikt mellom glass	29
7	Årlige energiutnyttelse og solfangerareal	30
8	Årlig energiutnyttelse og volum på akkumuleringstank	31
9	Årlig energiutnyttelse og helningsvinkel	31
10	Årlig energiutnyttelse og massestrøm til vannet	32
11	Temperatur i akkumuleringstanken	33
12	Forstørret bilde av temperaturen i akkumuleringstanken på vinteren .	34
13	Forstørret bilde av temperaturen i akkumuleringstanken på sommeren	35
14	Årlig energibruk av støm til forbruksvann	35
15	Årlig energiutnyttelse ut av solfangeren	36
16	Strøm-spenning for et solcellepanel med varierende innstrålt effekt . .	38
17	Effekt-spenning for et solcellepanel med varierende innstrålt effekt . .	38
18	Strøm-spenning for et solcellepanel med varierende temperatur	39
19	Effekt-spenning for et solcellepanel med varierende temperatur	39

20	Energiutnyttelse, virkningsgrad, strøm og spenning for et solcellepanel i løpet av et år	40
21	Temperatur på på solcellepanelet i en periode på 200 timer i Februar	41
22	Temperatur på på solcellepanelet i løpet av et år	42
23	Temperatur på på solcellepanelet med 5 m/s lufthastighet på undersiden i en periode på 200 timer i februar	43
24	Temperatur på solcellepanelet i løpet av et år, med en 5 m/s lufthastighet på undersiden	44
25	Årlig elektrisk og termisk energiutnyttelse for et solcellepanel	44
26	Årlig elektrisk energiutnyttelse for et solcellepanel og lufthastigheter på undersiden	45
27	Årlig termisk energiutnyttelse for et solcellepanel og lufthastigheter på undersiden	46
28	Årlig energiutnyttelse for det vannkjølte solcellepanelet	48
29	Temperatur på luft, Vann og solcellpanelet for det vannkjølte solcellepanelet	49

Tabeller

4	Ulike f-verdier for ε_{diff}	11
5	Oppsummeringen av hovedresultatene	47

1 Innledning

Det har vært en økning av drivhusgassene karbondioksid, metan og NO_x siden før-industriell tid. Konsentrasjonen av karbondioksid i atmosfæren har økt fra 280ppm i 1850, til rett under 400ppm i dag. I samme periode er det observert en økning i temperatur i atmosfæren og i havet. Havnivået har steget og mengden is og snø har minket. At menneskene påvirker klimaet er blitt konkludert i (IPPC, 2014). Fortsetter menneskelig utslipp av drivhusgasser i samme tempo vil oppvarmingen av jorda tilta, noe som vil gi langvarige og irreversible påvirkninger på mennesker og økosystemer.

På klimatoppmøtet i Paris 2015 ble en internasjonal klimaavtale underskrevet av 175 land. Det er tre overordnede mål i Parisavtalen (Jakobsen, 2017) og ett er å unngå global oppvarming med $2^{\circ}C$, og helst holde nivået under $1.5^{\circ}C$.

Norge har forpliktet seg til avtalen, og den 27.09.2017 la regjeringen ut et forslag på høring som vil innebære å lovfeste klimamål for 2030 og 2050. (Klima- og miljødepartementet, 2017) Klimamålet er å redusere klimagassutslippene med minst 40 % i forhold til nivåer i 1991 og innen 2050 skal målet være en 80 til 95 % reduksjon. Lovforslaget vil gjøre at regjeringen hvert år må rapportere til stortinget om utviklingen av klimagassutslippene.

Når 40 % av Norges netto sluttforbruk av energi på fastlandet går til bygninger (Dokka, Hauge, Marit, Klinski & Kirkhus 2009), må byggenæringen bidra med sitt for å kunne redusere energibruken og drivhusgassutslippene. Klimaet og breddegraden til Norge gjør at strømforbruket pr. innbygger er blandt de høyeste i verden (Bøeng, 2014 s.9). God norsk økonomi og lave strømprisen bidrar også til det store strømforbruket pr. innbygger. Årlige tall fra Statistisk sentralbyrå viser at fornybarandelen i brutto strømforbruk er på 109.6 % (med eksport), varme og kjøling er på 32,5 % og transport 4.8 % (Statistisk sentralbyrå 2016).

For bygninger er det da mulig å øke fornybarandelen av energibruk. Kyotopyramiden er en prioriteringsliste for energiøkonomisering av bygninger. Punkt 3. på listen, etter reduksjon av varmetap og strømforbruk, er utnyttelse av solenergi. Solenergi kan utnyttes gjennom passive tiltak, for eksempel ved store vindusflater, eller aktive tiltak, som solfangere eller solceller.

På verdensbasis har det vært en eksponensiell vekst i installert effekt fra solcellepanel, samtidig som prisene har falt drastisk (World Energy Council (2016) s. 23). I tillegg har også virkningsgraden til solceller hatt en stabil økning over mange år.

Når Norge har en overproduksjon av fornybar strøm gjør det at strømprisene er lave og solcellepanel ofte ikke har vært økonomisk lønnsomt. Dersom den globale økningen av installert solenergi fortsetter, vil prisene falle ytterligere. Da kan det bli mer økonomisk gunstig også i Norge. Det er også mulig å benytte seg av solfangere til å dekke energibehov til oppvarming av forbruksvann. Det medfører redusert strømforbruk til bygninger i tråd med punkt 2. og 3. I Kyotopyramiden. Å benytte seg av solenergi i bygg vil øke fornybarandelen og redusere klimagassutslipp.

1.1 Problemstilling

Tittel: Solenergi for bygg i nordisk klima

Problemstilling: Hvordan påvirker lufttemperatur og klima solcellepanel og solfangere for bygg?

1. Solfangere er effektivite til å utnytte energi fra solen og energien som blir utnyttet er i form av varme. Oppvarmingsbehovet er størst ved lav utetemperatur, mens varmtvannsforbruket er relativt konstant hele året. Ved lav utetemperatur er også energiutnyttelsen til solfangere lavere.
2. Solceller har lavere effektivitet enn solfangere og energien som blir utnyttet er i form at elektrisk strøm. Effektiviteten øker med synkende temperatur.
3. Kan man kombinere solcellepanel til strømproduksjon og benytte overskuddsvarmen til oppvarming i bygg?

Energiberegningsprogrammer til bygg har liten frihet til å endre systemdesign på en annen måte enn vinkling og virkningsgrad. Ved å benytte klimadata for temperatur, vind, direkte og diffus solstråling i matematiske modeller for soleenergisystemer i bygg, kan man få undersøkt den fysiske oppbygging av en solfanger og se hvor de største tapene er. Det gir mulighet for å se hvordan valg av materiale og design kan øke energiutbyttet.

2 Teori

"*There is nothing to writing. All you do is sit down at a typewriter and bleed*" - Ernest Hemingway, 1961.

Teorikapitlet i denne oppgaven baserer seg på generell teori om varmeovergang og energibevaring som benyttes til å utlede mer spesifikke uttrykk i metodekapitlet.

2.1 Energibevaring

Masse og energi er bevart. For et system vil alle masser inn og ut av systemet være lik endringen av massen til systemet

$$\sum \text{massestrom} = \frac{\partial m}{\partial t} \quad (2.1)$$

Ved stasjonære forhold er:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = 0 \quad (2.2)$$

Det samme gjelder for bevaring av energi. For termisk energi vil summen av termisk energi inn og ut av systemet være lik endringen av indre energi til systemet.

$$\sum Q = \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.3)$$

Ved stasjonære forhold er:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = 0 \quad (2.4)$$

2.1.1 Konduksjon

Konduksjon er overføring av energi fra mer energirike partikler til mindre energirike partikler der det er kontakt mellom partiklene (Cengel & Ghajar, 2011) kodusjon kan foregå i gasser, væsker og i faste stoff.

Fouriers lov om varmekonduksjon for konstant konduktivitet, sier:

$$Q_{\text{konduksjon}} = -k \cdot A_s \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.5)$$

Der k er den termiske egenskapen til stoffet og A er arealet der varmetransporten forekommer.

2.1.2 Konveksjon

Konveksjon er energioverføring i form av varme mellom en fast overflate og et fluid. Energioverføringen skjer ved en kombinasjon av konduksjon og massestrøm (Cengel & Ghajar 2011). Newtons avkjølings lov viser sammenhengen mellom temperatur på fluidet og flaten og energistrømmen, som vises:

$$Q_{konveksjon} = h \cdot A \cdot (T_{overflate} - T_{\infty}) \quad (2.6)$$

Der h er den konvektive varmeoverføringskonstanten.

2.1.3 Stråling

Stråling er energi emittert i form av fotoner på grunn av atomenes endring i elektronkonfigurasjonen (Cengel & Ghajar, 2011). Denne energistrømmen trenger ikke noe stoff eller gass for å overføre energien. Det er på denne måten energi fra solen når jorden gjennom universet. Den maksimale energimengden som kan overføres ved stråling mellom to flater er gitt av *Stefan-Boltzmanns lov*, som sier:

$$Q_{strling} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (T_{overflate}^4 - T_{\infty}^4) \quad (2.7)$$

Der ε er emissiviteten til overflaten, σ er 5.67×10^{-8} som er *Stefan-Boltzmanns konstant* og T er temperaturene i $^{\circ}K$.

2.1.4 Strøm

Ohm's lov sier at den elektriske strømmen gjennom en leder er avhengig av spenningen.

$$V = R \cdot I \quad (2.8)$$

Der V er spenning i volt, I er strømmen i ampere og R er motstanden. Den elektriske effekten P , er produktet av strøm og spenning.

$$P = I \cdot V \quad (2.9)$$

For forgreningspunkter vil energien være bevart. Kirchhoffs strømlov beskriver hvordan den elektriske strømmen er bevart:

$$\Sigma I_n = 0 \quad (2.10)$$

Der I_n er alle strømmer inn eller ut av forgreningspunktet. Strøm inn i punktet har positivt fortegn og strøm ut av punktet har negativt fortegn. Kirchhoffs spenningslov sier at summen av alle spenninger (potensialforskjell) i en lukket kurs er lik null.

$$\Sigma V_n = 0 \quad (2.11)$$

Der V_n er spenningsendringer over komponenter og er negativ over motstander og positiv over kilder.

2.2 Solens Energi

Solens blackbodytemperatur er ca $5770^{\circ}K$ i følge (Duffie & Beckman 1991). Solens energi blir avgitt i form av elektromagnetisk stråling til omgivelsene. Den elektromagnetiske strålingen består av forskjellige bølgelengder. Det synlige lys utgjør ca 45 % (Stine & Harrigan 1986) av energien vi mottar og har en bølgelengde fra 300-700 nm. Hvilken bølgelengde energien fra solen består av har påvirkning på hvor

mye energi et glass slipper igjennom eller hva teoretisk maksimal effektivitet til en solcelle av et stoff vil være.

2.2.1 Solfanger

Solfangere baserer seg på prinsippet om at glass er transparent for kortbølget stråling, men ikke for langbølget stråling. Det vil si at elektromagnetisk stråling fra solen slipper gjennom glasset, absorberes av en plate og energien denne platen emitterer blir reflekter av glasset. For å kunne benytte seg energien må strålingstapet og det konvektive tapet fra absorberingsplaten minimeres. Dette gjøres med å benytte glassdekke som hindrer varm luft i å stige fra platen og reduserer strålingen da glass er transparent for høyenergisk kortbølgestråling, men ikke lavbølgestråling i det infrarøde spekteret. Den temperaturøkningen i solfangeren kan bli utnyttet ved at vann eller andre medier varmes opp og fraktes bort fra solfangere.

2.2.2 Solceller

Solceller benytter seg av halvlederteknologien. Det vanligste er å benytte silisium som blir n og p dopet får å få egenskaper som er ønskelig for kunne omgjøre fotoner fra solen til elektrisk strøm hjelp av den fotoelektriske effekten. Fotoner gjør at det dannes et elektrisk felt, det gjør at elektroner drifter mot n-delen, mens hullene drifter mot p-delen (Duffie & Beckman 1991) Flere celler settes sammen i serie til et panel og flere solcellepanel kan settes sammen i serie eller pallellel til et "array".

2.3 Sammenligningsgrunnlag til årlig energiutnyttelse

Får å kunne gjøre sammenligninger av resultatene, er det undersøkt forventede verdier på energiutnyttelsen til solfangere og solcellepanel i Norge. I regi av Sintef, har (Lappegard, Hauge, Sørnes, Godbolt, Kristjansdottir, Lekang Sørensen & Fredrikse 2014 s. 15) sammenlignet årlig energiutbytte fra 7 solfangeranlegg i Norge. Gjennomsnittsverdien ligger på $450 \text{ kWh/m}^2\text{r}$ To av anleggene ligger opp mot $800 \text{ kWh/m}^2\text{r}$, to litt under $600 \text{ kWh/m}^2\text{r}$ og to på $300 \text{ kWh/m}^2\text{r}$. Disse tallene er ikke kvalitetsikret og er stort sett målte verdier fra styringsenheten.

I en annen publikasjon nevner (Andresen 2008 s.20) en tommelfinger-regel for solfangeranlegg. Den går ut på at man årlig vil få $300\text{-}700 \text{ kwh/m}^2$ som skal varme vann til en gjennomsnittsfamilie på 3-4 personer med 4m^2 solfangerareal og en 300 literstank. Dette vil dekke dekke 50 % av varmtvannsbehovet med solvarme.

I følge hjemmesiden til Norsk solenergiforening (Norsk solenergiforening, 2018) vil solcellepanel årlig lever $100\text{-}170 \text{ kWh/m}^2$. I Oslo, med 30 graders vinkel vil solcellepanel typisk kunne produsere 140 kWh/m^2 i året (Norges vassdrags- og energidirektorat, 2017). Tallene $100\text{-}170 \text{ kWh/m}^2$ og 140 kWh/m^2 kan sies å være de samme når variasjon til været spiller inn. De benyttes kun til å sammenligne om resultatene fra beregningen i denne oppgaven vil være troverdige

3 Metode

I dette kapitlet beskrives instrumentene og datasett i denne oppgaven som er klimadata, termodynamiske egenskaper og beregningsprogrammet Matlab. Videre beskrives uttrykkene som er benyttet for å kunne beregne solens posisjon og energien som vil være tilgjengelig fra solen. Så beskrives uttrykk og fremgangsmåte for å beregne varmetapstall til både solfanger og til solcellepanel.

Oppsettet til algoritmene benyttet i energiberegningene for solcellepanelet og solfangeren forklares detaljert og stegvis, i den grad det er mulig. Det er også en detaljert beskrivelsen av akkumuleringstanken og fremgangsmåten for å finne det maksimale effektpunktet, (MPP). Til slutt blir fremgangsmåten for å kombinere algoritmene for solfanger og solcelle beskrevet.

Dette kapitlet forsøker så godt det lar seg gjøre å dokumentere hvordan beregningene i denne oppgaven har blitt utført.

3.1 Instrumenter og data

Det som er benyttet av instrumenter i denne oppgaven er beregningsprogrammet Matlab. Data som er benyttet er klimadata fra Fornebu, energibehov til forbruksvann og termodynamiske egenskapene til luft og vann.

3.1.1 Matlab

For å undersøke problemstillingen, blir timesverdier av klimadata brukt i beregningsprogrammet Matlab. Dette programmet blir benyttet fordi det har funksjoner som "while, for og else/if". Det er også et brukervennlig program med muligheter for grafisk framstilling av resultater. Ved å benytte datasimuleringer til energiberegningene, er det vesentlig enklere å endre på variabler og designløsninger sammenlignet med ombygging av fullskala anlegg. I tillegg kan ulike scenarier undersøkes raskere og billigere.

3.1.2 Klima og klimadata

Lokalt klima vil påvirke energiutbyttet for installasjonene. Vær og skyer endrer direkte og indirekte solstråler. Samtidig vil refleksjon, snø, klarhet i lufta, vind og lufttemperatur påvirke virkningsgraden.

Ved beregning av varmetap vil det være konveksjon til omgivelsestemperaturen T_a og stråling mot himmeltemperaturen T_{sky} . Atmosfæretemperaturen kommer fra målinger og himmeltemperaturen kan bli beregnet etter et en sammenheng av (Paradise, 2017 s.317):

$$T_{sky} = 0.0552 \cdot T_a^{1.5} \quad (3.1)$$

I denne oppgaven blir det gjort en forenkling og antatt at $T_{sky} = T_a$. Klimadata i denne oppgaven er fra Fornebu, og er det samme som benyttes i NS:3031. Det er timesverdiene for direkte normal stråling, diffus horisontal stråling, lufttemperatur og vindhastighet som benyttes. Disse verdiene blir lastet inn i Matlab fra en Exceltabell og det er laget ekstra søyler i tabellen for *solartid*, og dagene er nummerert.

3.1.3 Termodynamiske egenskaper

De termodynamiske egenskapene varierer med temperatur og trykk. Det er antatt et konstant atmosfæretrykk. For tetthet, varmekapasitet og konduktivitet til vann, ble det utarbeidet et funksjonsuttrykk utfra tabellverier fra (Cengel & Ghajar, 2011, s 878).

$$\rho = 4 \cdot 10^{-6} \cdot T_{avg}^3 - 0.007 \cdot T_{avg}^2 + 2.8474 \cdot T_{avg} + 664.6 \quad (3.2)$$

$$k = -6 \cdot 10^{-9} - 09 \cdot T_{avg} \cdot T_{avg}^3 - 3e - 06 \cdot T_{avg} \cdot T_{avg}^2 + 0.005 \cdot T_{avg} - 0.4695 \quad (3.3)$$

$$cp = 0.0138 \cdot T_{avg}^2 - 8.8387 \cdot T_{avg} + 5595.6 \quad (3.4)$$

For å få Prantel nummer og dynamisk viskositet, ble det utført lineær regresjon mellom hvert temperaturintervall fra tabellverdier i (Cengel & Ghajar, 2011, s 884). De termodynamiske egenskapene til luft blir beregnet etter uttrykkene:

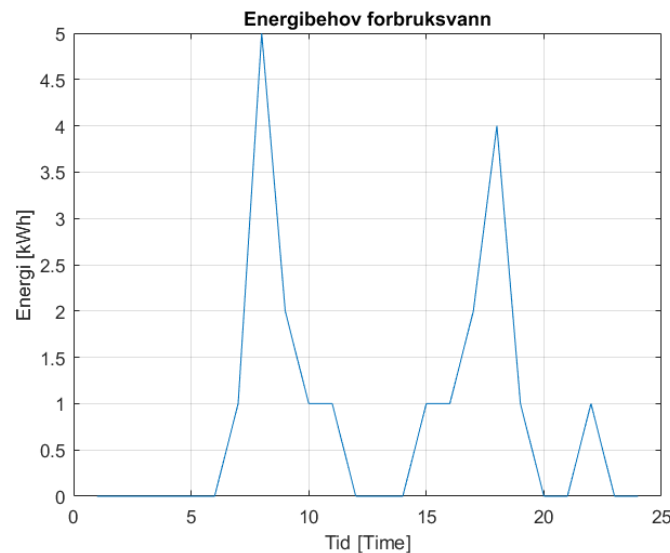
$$k_{air} = 0.0002067 \cdot T_{avg}^{0.85} \quad (3.5)$$

$$Pr_{air} = 1.057 - 0.06 \cdot \log(T_{avg}) \quad (3.6)$$

$$Vu_{air} = (9 \cdot 10^{-5} \cdot T_{avg}^2 + 0.04 \cdot T_{avg} - 4.17) \cdot 10^{-6} \quad (3.7)$$

3.1.4 Varmtvannsforbruk

Energibruk til forbruksvann varierer i stor grad fra hushodning til husholdning. Det blir påvirket av bruk og av antall personer i husholdningen. Veiledende verdier som blir benyttet er hentet fra (Thyholt & Dokka, 2003 s.34) og er på $35kWh/(m^2 \cdot year)$. I løpet av et døgn, vil et hus på $200 m^2$ trenge ca $20kWh/(-dgn)$. I beregningene vil dette ble fordelt på tidspunkt det er forventet forbruk av varmtvann.



Figur 1: Viser effektbehovet til varmtvannsforbruket i løpet av et døgn som benyttes i beregningene.

3.2 Solens posisjon

Jorden beveger seg rundt sin egen akse og i en elliptisk bane rundt solen. Fra et fast punkt på jorden oppfattes det som man er i ro og solen beveger seg over horisonten. Solinnstråling til et gitt punkt avhenger av punktets plassering og vinkling samt solens posisjon på himmelen (Stine & Harrigan, 1986 kap. 4.) Variablene som er nødvendig for å finne solens posisjon i forhold til en solfanger eller et solcellepanel, er listet opp under:

1. β Helningsgrad plate , $[Deg]$
2. γ Plates azimuth angle, $north = 0$, $[Deg]$
3. N Nummer på dag i løpet av året, $1 = 1.Jan$
4. ϕ Latitudeangle, Høydegrad, $Oslo = 59$ $[Deg]$
5. ρ Deklinasjonsvinkel $[Deg]$
6. t_s Solar tid $[Timer]$
7. ω Times vinkel $[Deg]$
8. α Vinkel på solens høyde $[Deg]$
9. A Azimuth vinkelen til solen $[Deg]$
10. θ_i Vinkelen mellom solens posisjon og plate $[Deg]$

Deklinasjonsvinkelen mellom jorden og solen:

$$\rho = \sin 0.39795 \cdot \cos(0.98563 \cdot (N - 173)) [Deg] \quad (3.8)$$

ω er timesvinkelen til solen og den vil endre seg med 15° for hver time. Der solar tid er klokken tolv når solen er høyest på himmelen og står rett i sør. Før tolv er ω negativ.

$$\omega = 15 \cdot (T_s - 12) [Deg] \quad (3.9)$$

Solhøyden α er vinkel solen har i forhold til horisonten. Den beregnes etter:

$$\alpha = \sin^{-1}[\sin(\rho) \cdot \sin(\phi) + \cos(\rho) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\phi)] [Deg] \quad (3.10)$$

Azimuth vinkelen A er vinkelen solen har i forhold til øst/vest. Den beregnes etter:

$$\acute{A} = \sin^{-1} \left[\frac{-\cos(\rho) \cdot \sin(\omega)}{\cos(\alpha)} \right] [Deg] \quad (3.11)$$

Der

$$A = 180 - \acute{A} \quad (3.12)$$

for

$$\cos(\omega) \geq \frac{\tan(\rho)}{\tan(\phi)} \quad (3.13)$$

Ellers er $A = 360^\circ + \acute{A}$

Med en fastsatt vinkel og plasing på solfangeren, kan man beregne vinkelen på solstrålene som treffer denne platen etter:

$$\cos \Theta_i = \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) + \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma - A) \quad (3.14)$$

En tilsvarende metode er litt mer omfattende og har litt flere ledd:

$$\cos \Theta_i = AA + BB - CC + DD - EE \quad (3.15)$$

Der variablene AA til EE er listet opp under for å få plass på en side.

- $AA = \cos(\beta) \cdot \sin(\rho) \cdot \sin(\phi)$
- $BB = \cos(\beta) \cdot \cos(\rho) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\omega)$
- $CC = \sin(\beta) \cdot \cos(\rho) \cdot \sin(\omega) \cdot \sin(\gamma)$
- $DD = \sin(\beta) \cdot \sin(\rho) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\gamma)$
- $EE = \sin(\beta) \cdot \cos(\rho) \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\gamma)$

For horisontale flater er $\beta = 0$, og uttrykket endres til:

$$\cos \Theta_i = \sin(\alpha) \quad (3.16)$$

For vertikale flater:

$$\cos \Theta_i = \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma - A) \quad (3.17)$$

Vinkelen for når solen går ned er ω_{sn}

$$\omega_{sn} = \cos^{-1}(-\tan(\rho) \cdot \tan(\phi)) \quad (3.18)$$

Tidspunkt for sol oppgang:

$$T_{sn} = \frac{\omega_{sn}}{15} + 12 \quad (3.19)$$

3.3 Solens energi

Den energien fra solen som når atmosfæren til jorda kalles ekstraterrestriel stråling. Den vil variere med året siden jorden har en elliptisk bane rundt solen. Med en gjennomsnittlig *solkonstant* på $1367W/m^2$ for et år (Stine og Harrigan, 1986), kan man beregne hva strålingen på en normal flate utenfor atmosfæren vil være for en dag i året. Der dag 1 er den første januar.

$$E_a = \text{Solkonstant} \cdot \left[1 + 0.034 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot \text{Dag}}{365.25}\right) \right] \quad (3.20)$$

Når solstrålenene når atmosfæren til jorden, vil noe bli reflektert tilbake til verdensrommet, og noe vil bli absorbert av molekyler i atmosfæren. Når solen står lavt på himmelen vil strålene gå gjennom et tykkere lag av atmosfæren og en mindre andel energi når overflaten på jorden (Stine og Harrigan, 1986). Hvor mye atmosfære sollyset beveger seg AM_a , kan beregnes etter:

$$AM_a = \frac{1}{\cos(\Theta_z) + 0.50572 \cdot (96.07995 - \Theta_z)^{-1.6364}} \quad (3.21)$$

Den andelen energi som vil nå overflaten på jorden og vil nå en vinklet solfanger er I_{total} . Den består av de tre delene:

- I_{dir} Direkte solstråling mot en flate
- I_{diff} Diffuse solstråling mot en flate
- $I_{t,h}$ Total horisontal stråling reflektert fra bakken

I_{total} Beregnes etter:

$$I_{total} = I_{dir} \cdot \cos(\Theta_i) + I_{diff} \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right) + \rho_{reflectanse} \cdot I_{t,h} \cdot \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right) \quad (3.22)$$

Der $\rho_{reflectanse}$ er refleksjonen til bakken og er satt konstant til 0.2 i denne oppgaven.

3.4 Diffus stråling

Perez sin diffuse sky modell benyttes til å beregne den diffuse strålingen I_{diff} mot en vinklet plate. Beregningen er gjort etter framgangsmåten til (PVPerformance,2017).

$$I_{diff} = DHI \cdot \left[(1 - F_1) \cdot \frac{1 + \cos(\beta)}{2} + F_1 \cdot \frac{a_{diff}}{b_{diff}} + F_2 \cdot \sin(\beta) \right] \quad (3.23)$$

Der DHI er diffus horisontal innstrålt energi. a_{diff} og b_{diff} beregnes etter:

$$a_{diff} = \max(0, \cos(\Theta_i)) \quad (3.24)$$

$$b_{diff} = \max(\cos(85^\circ), \cos(\Theta_z)) \quad (3.25)$$

Tabell 4: Ulike f-verdier for ε_{diff}

bin	Nedre ε_{diff}	Øvre ε_{diff}	f11	f12	f13	f21	f22	f23
1 Overskyet	1	1.065	-0.008	0.588	-0.062	-0.06	0.072	-0.022
2	1.065	1.230	0.13	0.683	-0.151	-0.019	0.066	-0.029
3	1.230	1.500	0.33	0.487	-0.221	0.055	-0.064	-0.026
4	1.500	1.950	0.568	0.187	-0.295	0.109	-0.152	-0.014
5	1.950	2.800	0.873	-0.392	-0.362	0.226	-0.462	0.001
6	2.800	4.500	1.132	-1.237	-0.412	0.288	-0.823	0.056
7	4.500	6.200	1.06	-1.6	-0.359	0.264	-1.127	0.131
8 Skyfritt	6.200	—	0.678	-0.327	-0.25	0.156	-1.377	0.251

ε_{diff} benyttes til å lese av f verdiene i tabell 4

$$\varepsilon_{diff} = \frac{\frac{DHI+DNI}{DHI} + k_{diff} \cdot \Theta_z^3}{1 + k_{diff} \cdot \Theta_z^3} \quad (3.26)$$

Der $k_{diff} = 5.535e - 6$, DNI er direkte normal innstrålt energi og Θ_z er zenit vinkelen til sola som beregnes ved hjelp av α fra ligning 3.10

$$\Theta_z = 90 - \alpha \quad (3.27)$$

$$\Delta_{diff} = \frac{DHI \cdot AM_a}{E_a} \quad (3.28)$$

Δ_{diff} og f-verdiene benyttes til å beregne F_1 og F_2 .

$$F_1 = \max(0, f_{11} + f_{12} \cdot \Delta_{diff} + \frac{\pi \cdot \Theta_z}{180^\circ} \cdot f_{13}) \quad (3.29)$$

$$F_2 = f_{21} + f_{22} \cdot \Delta_{diff} + \pi \cdot \frac{\pi \cdot \Theta_z}{180^\circ} \cdot f_{23} \quad (3.30)$$

3.5 Matematisk modell for platesolfanger

Den matematiske modellen for solfangeren består i stor grad av uttrykk for varmetapstall i form av stråling, konveksjon og konduksjon. Dette er nødvendig for å finne det samlede varmetapet, for så å finne hvor mye energi man kan nyttegjøre seg av. Varmetap for solcellepanelet baserer seg på mange av de samme uttrykkene og det blir nevnt i teksten når det gjelder for begge.

Den energien man kan nyttegjøre seg av Q_u vil enkelt være;

$$Q_u = I_{total} \cdot A_p - Q_l \quad (3.31)$$

Der A_{plate} er arealet på absorpsjonsplaten, I_{total} er energi fra solen og Q_l er varmetapet til omgivelsene. Det samlede varmetapet beregnes etter:

$$Q_l = U_l \cdot A \cdot (T_{pm} - T_a) \quad (3.32)$$

Der U_l er det samlede varmetapstallet i $[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$, T_{pm} er den gjennomsnittlig temperaturen på platen, T_a er omgivelsestemperaturen og A er arealet. Det samlede varmetapet kan deles opp i tap fra solfangerens side, som er i kontakt med omgivelsene:

$$Q_{topp} = \frac{1}{R_{topp}} \cdot A_{topp} \cdot (T_{pm} - T_a) \quad (3.33)$$

$$Q_{side} = \frac{1}{R_{side}} \cdot A_{side} \cdot (T_{pm} - T_a) \quad (3.34)$$

$$Q_{bunn} = \frac{1}{R_{bunn}} \cdot A_{bunn} \cdot (T_{pm} - T_a) \quad (3.35)$$

Samlet varmetap blir $Q_l = Q_{topp} + Q_{side} + Q_{bunn}$ og det samlede varmetapstallet:

$$U_l = \frac{1}{R_{topp} + R_{side} + R_{bunn}} \quad (3.36)$$

$$\frac{1}{R_{bunn}} = \frac{k}{\Delta x} \quad (3.37)$$

Der Δx er gods-tykkelse og k er termisk konduktivitet på isolasjonen. I denne oppgaven ses det bort fra konvektiv varmetap på undersiden av solfangeren.

$$\frac{1}{R_{side}} = 2 \cdot L_3 \cdot \frac{L_1 + L_2}{L_1 \cdot L_2} \cdot \frac{k}{\Delta x} \quad (3.38)$$

Der L_1, L_2 og L_3 er lengde, bredde og høyde for solfangeren. Det konvektive varmetapet fra sidene blir også sett bort ifra både for solfangeren og for solcellepanelet.

3.5.1 Varmetap fra toppen av solfangeren

Fra toppen vil det være stråling og konvektive tap. Dette kan minimeres med flere glassjikt. En metode som benyttes etter (Duffie og Beckman, 1991 s. 260) og (Kharseh, 2017). Den metoden beregner varmetapstallet U_t og tar for seg alle motstandene

ved hjelp av flere faktorer.

$$U_t = \left[\frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \cdot \left[\frac{T_{pm} - T_a}{N + f} \right]^e + \frac{1}{a_a}} \right]^{-1} + \frac{\sigma \cdot (T_{pm}^2 + T_a^2) \cdot (T_{pm} + T_a)}{\frac{1}{\varepsilon_p + 0.00591 \cdot N \cdot a_a} + \frac{2 \cdot N + f - 1 + 0.133 \cdot \varepsilon_p}{\varepsilon_g} - N} \quad (3.39)$$

Der N er antall glasssjikt, ε er emissiviteten til glass og plate. Det konvektive tapet fra glasset til omgivelsene er a_a og beregnes:

$$a_a = 5.7 + 3.8 \cdot v_{wind} \quad (3.40)$$

Eventuelt kan a_a beregnes $Nu = 0.86 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$ eller $a_a = 2.8 + 3 \cdot v_{wind}$ Variabelen f beregnes etter:

$$f = (1 + 0.089 \cdot a_a - 0.1166 \cdot a_a \cdot \varepsilon_p) \cdot (1 + 0.07866 \cdot N) \quad (3.41)$$

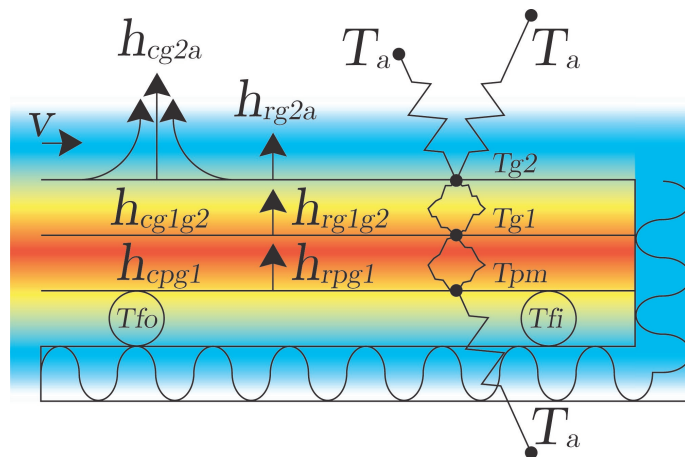
β er helningsvinkelen for solfangeren og for $0 < \beta < 70$ beregnes C

$$C = 520 \cdot (1 - 0.000051 \cdot \beta^2) \quad (3.42)$$

$$e = 0.43 \cdot \left(1 - \frac{100}{T_{pm}} \right) \quad (3.43)$$

Metoden fra Duffie og Beckman beregner det samlede varmetapstallet og det samlede varmetapet. For å finne temperaturen på glasset som trengs for å beregne det konvektive varmetapstallet etter vindhastighet og temperaturdifferanse, ble en litt mer omfattende metode fra (Bisen, Jain & Dass, 2011) benyttet. Denne metoden deler opp motstandene hver for seg istedet et samlet uttrykk, men begge bygger på det samme utgangspunktet.

Ved å separere hver enkelt motstand, kan også metoden til Bisen, Jain & Dass benyttes for solcellepanelet. Man bare fjerner de leddene som ikke er aktuelle. Det gir også muligheten til å skille mellom omgivelsestemperaturen og himmeltemperaturen. Det ble til slutt sett bort ifra i denne oppgaven på grunn av alle problemene det medførte i beregningene, da glassplaten kunne bli kaldere enn lufttemperaturen under visse forhold.



Figur 2: Retning og navn på varmetapene på platesolfanger og navn på temperaturerne mellom varmetapene (figur fra Yvonne Groseth).

I figur 2 kan man se at det er en del ulike former for varmetap i en platesolfanger. For å holde oversikt er det forsøkt å bruke navn på varmetapstallene som beskriver med bokstaven c og r og det er konvektiv eller stråling tapet gjelder. Det er også navngitt hvilke deler den gjelder, om det er plate, glass, glass2 og lufttemperatur det er snakk om.

- $R_{pg1} = \frac{1}{h_{cpg1} + h_{rpg1}}$
- $R_{g1g2} = \frac{1}{h_{cg1g2} + h_{rg1g2}}$
- $R_{g2a} = \frac{1}{h_{cg2a} + h_{rg2a}}$
- $R_{glass} = \frac{L_{glass}}{k_{glass}}$

Det samlede varmemotstandstallet vil da bli

$$U_{top} = \left(\frac{1}{R_{pg1} + R_{g1g2} + R_{g2a} + 2 \cdot R_{glass}} \right) \quad (3.44)$$

Konvektivt varmetapstall for luftsjiktet avgrenset av to vinklede plater

Dersom lengden på solfangeren, delt på tykkelsen på luftsjiktet er større en 12, beregnes Nussel-tallet, ved hjelp av Raligth-tallet fra (Cengel & Ghajar (2011) s.540). Dette uttrykket benyttes, siden den også gjøres av Bisen, Jain & Dass, med unntak at det tar hensyn til helningsvinkelen β til solfangeren også.

$$Ra = \frac{g \cdot (T_{pm} - T_{g1}) \cdot L_{spacing}^3 \cdot Pr_{air}}{V u_{air}^2 \cdot T_{avg}} \quad (3.45)$$

$$Nu = 1 + 1.44 \cdot \left[1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos(\beta)} \right]^+ \cdot \left(1 - \frac{1708 \cdot \sin(1.8 \cdot \beta)^{1.6}}{Ra \cdot \cos(\beta)} \right) + \left[\frac{Ra \cdot \cos(\beta)^{1/3}}{18} - 1 \right]^+ \quad (3.46)$$

Der alle verdier i $[\]^+$ skal settes lik 0, om verdien er negativ. Dette er for å sikre at $Nu = 1$ for $Ra \cdot \cos(\beta) < 1708$.

$$h_{cpg1} = \frac{k_{air} \cdot Nu}{L_{spacing}} \quad (3.47)$$

Akkurat det samme uttrykket benyttes for å beregne det konvektive varmeovergangstallet h_{cg1g2} mellom glass 1 og glass to, utenom at temperaturene endres til T_{g1} og T_{g2} . Varmeovergangstallet mellom platen og det første glasset pga. stråling er:

$$h_{rpg1} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_g} + \frac{1}{\epsilon_p} - 1} \cdot (T_{pm}^2 + T_{g1}^2) \cdot (T_{pm} + T_{g1}) \quad (3.48)$$

Varmeovergangstallet for stråling beregnes etter:

$$h_{rg1g2} = \frac{\sigma}{\frac{2}{\epsilon_g}} \cdot (T_{g1}^2 + T_{g2}^2) \cdot (T_{g1} + T_{g2}) \quad (3.49)$$

Varmetapet fra glasset på grunn av stråling vil skje mellom temperaturen på glasset og mot luft-temperaturen. Denne metoden benyttes også for solcelleberegningene i oppgaven og er avgjørende for å finne temperaturen på solcellen. Det er også viktig å vite temperaturen på glasset for å beregne de konvektive varmetapstallene. Det blir da benyttet et kombinert varmetapstall for stråling og konveksjon og $h_r g 2a$ har ikke temperaturene i fjerde potens.

$$h_r g 2a = \sigma \cdot \epsilon_g \cdot (T_{g2}^2 + T_a^2) \cdot (T_{g2} + T_a) \quad (3.50)$$

Det konvektive varmeovergangstallet fra glasset til omgivelsestemperaturen blir sett på som utvendig tvungen konveksjon. Det er blir påvirket av vindhastigheten, strømningsforhold, temperaturdifferansen mellom glasset og luften. Vindretningen avgjør hvilken lengde av solfanger som blir utsatt for vinden. En forenkling i denne oppgaven er at vinden kommer fra samme retning hele tiden. Det vil være de samme tapene for på oversiden for solcellepanelet som for solfangeren.

$$Re_L = \frac{v_{wind} \cdot L_1}{\nu} \quad (3.51)$$

Reynoldstallet avgjør om strømmingen er turbulent eller laminær. Dette vil påvirke virke størrelsen på varmeovergangstallet og ved noen tilfeller vil strømmingen være en blanding av disse to. Man antar at strømmingen er turbulent ved et Reynoldstall på $5 \cdot 10^{-5}$ (Cengel & Ghajar, 2011). Det er mulig å da beregne ved hvilken lengde L_{cr} dette vil inntreffe.

$$L_{cr} = \frac{5 \cdot 10^{-5} \cdot \nu}{v_{wind}} \quad (3.52)$$

Fra (Cengel & Ghajar, 2011 s.425) benyttes ulike uttrykk for Nussel-tallet. Ved laminære forhold over hele flaten der $Re_L < 5 \cdot 10^{-5}$ og $L_{cr} > L_1$ er:

$$Nu_{for} = 0.664 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{1/3} \quad (3.53)$$

Dersom strømmingen anses som turbulent over store deler av flaten $Re_L > 5 \cdot 10^{-5}$ og den laminære delen $\frac{L_{cr}}{L_1} < 0.1$, anses strømmingen som turbulent og:

$$Nu_{for} = 0.037 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \quad (3.54)$$

Når det er blandingsforhold mellom laminær og turbulent strømming blir uttrykket for Nusseltallet beregnet etter

$$Nu_{for} = (0.037 \cdot Re^{0.8} - 871) \cdot Pr^{1/3} \quad (3.55)$$

Siden oversiden av solfangeren vil bli utsatt for naturlig konveksjon ved liten vind, og en blanding av konveksjonen ved vind, kan man benytte et samlet varmeoverføringstall. Et uttrykk som gjelder både oversiden og undersiden av en varm plate er utledet av (Cianfrinia, Corcione, D'Oraziob & Habiba, 2008):

$$Nu_{nat} = 1 + \frac{0.635}{\left[1 + \left(\frac{0.618}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{9}{25}}} \cdot (Ra \cdot \cos(90 - \beta))^{0.25} \quad (3.56)$$

Dette uttrykket er gyldig for $-75^\circ > \beta > 60^\circ$, $50 > Ra > 10^8$ og $0.7 > Pr > 70$. Uttrykket kan benyttes på oversiden og undersiden av en varm plate. Gjelder beregningene på undersiden, vil vinkelen være $\beta - 90$. Det samlede Nusseltallet kan da beregnes ved hjelp av uttrykket fra ligning 3.57, der $n = 3$ for vertikale overflater, $n = 2$ for horisontale flater og \pm gjelder om konveksjonen jobber i samme retning eller mot hverandre.

$$Nu_{kombinert} = (Nu_{for}^n \pm Nu_{nat}^n)^{1/n} \quad (3.57)$$

Samlet varmeovergangstallet for naturlig og tvungen utvendig konveksjon blir da:

$$h_{cg2a} = \frac{Nu_{kombinert} \cdot k_{air}}{L_1} \quad (3.58)$$

$$h_{comb2a} = h_{cg2a} + h_{rg2a} \quad (3.59)$$

3.5.2 Varmeovergang fra plate til vann

Solenergien i platesolfangere varmer opp vannet som sirkulerer i kursen. Den energien blir overført fra absorpsjonsplaten i solfangeren, gjennom rørveggen og over til fluidet.

Ved å benytte ligningen under, fra (Duffie og Beckman (1991) blir energien beregnet ved hjelp av teperaturen på vannet inn solfangeren T_{fi} og lufttemperaturen til omgivelsene. Det er da etterpå mulig å regne seg tilbake til exittemperaturen til vannet T_{fo} og temperaturen på platen til solfangeren T_a .

$$Q_u = A_p \cdot F_r \cdot [S - U_l \cdot (T_{fi} - T_a)] \quad (3.60)$$

Det krever en del mellomregninger for F_r og F_{mrk} , som beregnes med:

$$F_r = \frac{\dot{m} \cdot c_p}{U_l \cdot A_p} \cdot \left(1 - \exp \left(\frac{-F_{mrk} \cdot U_l \cdot A_p}{\dot{m} \cdot c_p} \right) \right) \quad (3.61)$$

$$F_{mrk} = \frac{1}{W \cdot U_l \cdot \left[\frac{1}{U_l \cdot (F \cdot (W - D_o) + D_o)} + \frac{1}{\pi \cdot D_i \cdot h_f} \right]} \quad (3.62)$$

Og F er beregnet ved hjelp av tangens hyperbolicus:

$$F = \tanh \left(\frac{m \cdot (W - D_o) \cdot 0.5}{m \cdot (W - D_o) \cdot 0.5} \right) \quad (3.63)$$

Der W er avstanden mellom vannrørene, m er beregnet med den termiske konduktiviteten til platen k_p og tykkelsen på platen Δx_{plate} :

$$m = \left(\frac{U_l}{k_p \cdot \Delta x_{plate}} \right)^{0.5} \quad (3.64)$$

Det konvektive varmeovergangstallet h_f for vannet i røret, beregnes etter:

$$h_f = k_f \cdot \frac{Nu_f}{D_i} \quad (3.65)$$

Nussel-tallet Nu_f er avhengig av strømningsforholdet i røret og temperaturen til fluidet. Strømningsforholdet beskrives etter Reynolds-tallet, der:

$$Re = \rho \cdot \frac{D_i}{\mu} \quad (3.66)$$

For $Re < 2300$ anses strømmingen som laminær og Nussel-tallet $Nu = 4.36$. For $3000 < Re < 5 \cdot 10^6$ kan Nussel-tallet beregnes etter uttrykket hentet fra (Cengel & Ghajar, 2011):

$$Nu = \frac{f}{8} \cdot \frac{(Re - 1000) \cdot Pr_f}{1 + 12.7 \cdot \frac{f}{8} \cdot 0.5 \cdot Pr_f^{\frac{2}{3}} - 1} \quad (3.67)$$

Der friksjonsfaktor f beregnes etter den første Petukhov ligningen

$$f = (0.790 \cdot \ln(Re) - 1.64)^{-2} \quad (3.68)$$

Exit-temperaturen på fluidet T_{fo} , kan beregnes med kjent lengde på røret.

$$T_{fo} = \left(T_{fi} - T_a - \frac{S}{U_l} \right) \cdot \exp \left(\frac{U_l \cdot A_t \cdot F_{mrk}}{\dot{m} \cdot c_p} \right) + T_a + \frac{S}{U_l} \quad (3.69)$$

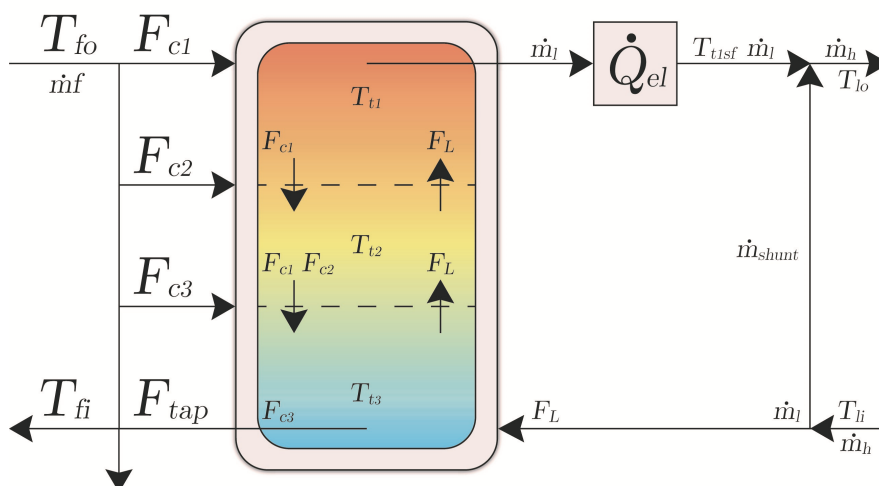
Der

$$A_t = n \cdot W \cdot Lengde \quad (3.70)$$

3.5.3 Varmtvannsbereder

Varmtvannsbehovet er størst i løpet av noen få perioder i døgnet. Solenergien er variabel avhengig av årstid og skydekke. Det er derfor enklere med en varmtvannsbereder som lagrer energien. Disse er utformet på en sånn måte at det blir en temperaturgradient der varmt vann holder seg i toppen, mens vann med lavere temperatur synker når tettheten er høyere. Hvordan denne temperaturprofilen varierer, avhenger av hvilken temperatur vannet fra solfangeren har, hvor mye vann det er, hvor stort forbruket er og til hvilken temperatur. En annen ting som påvirker temperaturgradienten er utformingen av innløpet der det varme vannet kommer inn i tanken. I følge Duffie og Beckman (1991) holder det å dele opp en varmtvannsbereder i tre eller fire noder, siden det vil samsvare bedre med hvordan temperaturgradient og stratifikasjonen vil være.

Ved å dele opp i tre noder, blir vannet fordelt inn i hver node med en kontrollfunksjon. Denne passer på at vannet legger seg der det er lik temperatur inne i tanken. Så blir ny temperatur i noden beregnet ved hjelp av en energibalanse i hver node.



Figur 3: Viser hvor vannet beveger seg i tanken i forhold til hva de ulike temperatu-
rene er og hva styringsparameterne F representerer (figur fra Yvonne Groseth).

1. $F_{c1} = 1, F_{c2} = 0, F_{c3} = 0$ og $F_{tap} = 0$ Når $T_{fo} > T_{t1}$ og $T_{t1} < 95^{\circ}C$
2. $F_{c1} = 0, F_{c2} = 1, F_{c3} = 0$ og $F_{tap} = 0$ Når $T_{t2} < T_{fo} \leq T_{t1}$
3. $F_{c1} = 0, F_{c2} = 0, F_{c3} = 1$ og $F_{tap} = 0$ Når $T_{fo} \leq T_{t2}$
4. $F_{c1} = 0, F_{c2} = 1, F_{c3} = 0$ og $F_{tap} = 0$ Når $T_{fo} > T_{t1}$ og $T_{t1} > 90^{\circ}C$ og $T_{t2} < 65^{\circ}C$
5. $F_{c1} = 0, F_{c2} = 0, F_{c3} = 1$ og $F_{tap} = 0$ Når $T_{fo} > T_{t1}, T_{t1} > 90^{\circ}C$ og $T_{t2} > 90^{\circ}C$ og $T_{t3} < 65^{\circ}C$
6. $F_{c1} = 0, F_{c2} = 0, F_{c3} = 0$ og $F_{tap} = 1$ Når $T_{fo} > T_{t1}$ og $T_{t1} > 95^{\circ}C$

Faktoren F_{tap} har blitt lagt inn for å dumpe varm når tanken har for høy temperatur. Dette er praktisk å se slik at man velger størrelse på solfanger og på akkumulerings-tank som unngår overoppheting. Når det er egen variabel for dette, kan man da se hvor mye energi fra solfangeren som ikke kan benyttes. Det gjør det mulig å kanskje få nytte av energien om man regulerte ned hastigheten og masse-strømmen til vannet. Det er også benyttet en logisk test som passer på at vann som blir avkjølt i solfangeren ikke slipper inn i tanken. Denne testen skal representere av- og på-regulering for massestrømmen så den bare skrur seg på når det er energi å hente. Det vil også være et varmetap fra tanken til omgivelsene innendørs, som er satt konstant til $20^\circ C$. Tykkelse på isolasjonsjiktet blir satt til 5 cm og konduktiviteten til isolasjonen (polyuretanskum) er på $0.013 W/m \cdot K$.

$$R_{tank} = \left[2 \cdot \pi \cdot \lambda_t \cdot \frac{h_{tank}}{\log\left(\frac{r_{tank,ytre}}{r_{tank}}\right)} \right]^{-1} \quad (3.71)$$

$$R_{tank,topp} = \left[A_{tank,topp} \cdot \frac{\lambda_t}{tykkelse_{tank}} \right]^{-1} \quad (3.72)$$

$$Q_{l1} = \left(\frac{A_{tank}}{R_{tank}} + \frac{A_{tank,topp}}{R_{tank,topp}} \right) \cdot (T_{t1s} - T_{ai}) \quad (3.73)$$

$$Q_{l2} = \left(\frac{A_{tank}}{R_{tank}} \right) \cdot (T_{t2s} - T_{ai}) \quad (3.74)$$

$$Q_{l3} = \left(\frac{A_{tank}}{R_{tank}} + \frac{A_{tank,topp}}{R_{tank,topp}} \right) \cdot (T_{t3s} - T_{ai}) \quad (3.75)$$

Det blir også lagt til ett ledd som skal representere konduktiviteten gjennom vannet nedover. Det antas at det varme vannet legger seg øverst, men det vil gi en liten energiutveksling nedover. Der $k_{tank,w} = 0.635$, som er konduktiviteten til vann.

$$Q_{k1} = k_{tank,w} \cdot \pi \cdot r_{tank}^2 \cdot (T_{t1s} - T_{t2s}) \cdot \frac{1}{3 \cdot h_{tank}} \quad (3.76)$$

$$Q_{k2} = k_{tank,w} \cdot \pi \cdot r_{tank}^2 \cdot (T_{t2s} - T_{t3s}) \cdot \frac{1}{3 \cdot h_{tank}} \quad (3.77)$$

De nye temperaturene i de tre nodene i tanken kan da beregnes etter energibalansen for hver node, hvor man ser på varmetap og varmetilførsel i form av konduksjon og massestrøm.

1. $T_{t1} = T_{t1,s} + [F_{c1} \cdot m_f \cdot c_p \cdot (T_{fo} - T_{t1,s}) + m_l \cdot c_p \cdot (T_{t2,s} - T_{t1,s}) - Q_{l1}] \cdot \frac{3600}{c_p \cdot m_{node}}$
2. $T_{t2} = T_{t2,s} + (F_{c2} \cdot m_f \cdot c_p \cdot (T_{fo} - T_{t2,s}) + F_{c1} \cdot m_f \cdot c_p \cdot (T_{t1,s} - T_{t2,s}) + m_l \cdot c_p \cdot (T_{t3,s} - T_{t2,s} - Q_{l2} - Q_{k1} - Q_{k2})) \cdot \frac{3600}{c_p \cdot m_{node}}$
3. $T_{t3} = T_{t3,s} + (m_f \cdot c_p \cdot ((F_{c3} \cdot T_{fo} \cdot (F_{c1} + c_1)) \cdot T_{t3} - (F_{c1} + F_{c2} + F_{c3}) \cdot T_{t3,s}) + m_l \cdot c_p \cdot (T_{t3} - T_{t3,s}) - Q_{l3} - Q_{k2}) \cdot \frac{3600}{c_p \cdot m_{node}}$

De nye beregnede temperaturene i noden benyttes videre til neste time. Siden det er noen perioder det vil komme mye energi, kan temperaturen bli høyere i en node enn i noden ovenfor. For å kompensere for dette blir rekkefølgen sortert til slutt så det alltid vil være økende temperatur i varmtvannsberederen med økende høyde.

$$T_{t1,s} = \max(T_{t1}, T_{t2}, T_{t3}) \quad (3.78)$$

$$T_{t2,s} = \text{median}(T_{t1}, T_{t2}, T_{t3}) \quad (3.79)$$

$$T_{t3,s} = \min(T_{t1}, T_{t2}, T_{t3}) \quad (3.80)$$

Temperaturen i toppen av varmtvannsberederen vil forandre seg etter hvor mye effekt som er tilført fra solfangeren, og hvor stort varmtvannsforbruket er. Det vil da være tider av døgnet og av året hvor denne temperaturen vil være lav. For å passe på at temperaturen ikke ender opp under 65°C blir det benyttet et elektrisk element som ettervarmer vannet ved å tilføre energi. Med en variabel temperatur i toppen av akkumuleringstanken T_{t3} , vil massestrømmen variere for å dekke behovet av forbruksvann. Det antas at forbruksvannet blir tilført T_{li} med en temperatur på 7°C og at det alltid vil ha en temperatur på 37°C etter shunten T_{lo} . Med en treveisventil etter det elektriske elementet, vil massestrømmen til forbruksvannet være;

$$m_l = \frac{\text{TimeLoad}}{c_p \cdot (37 - 7)} \cdot \frac{c_p \cdot (T_{lo} - T_{li})}{c_p \cdot (T_{t1,sf} - T_{li})} \quad (3.81)$$

Dette gjelder for $T_{t1,s} < 65$ og da vil $T_{t1,fs} = 65$, som er temperaturen etter varmelementet. Om temperaturen på vannet i toppen av tanken er høyere enn dette, vil $T_{t1,sf} = T_{t1,s}$. Da vil det ikke være behov for ettervarme varmtvannet og massestrømmen til forbruksvannet vil være:

$$m_l = \frac{\text{TimeLoad}}{c_p \cdot (37 - 7)} \cdot c_p \cdot \frac{T_{lo} - T_{li}}{c_p \cdot (T_{t1,sf} - T_{li})} \quad (3.82)$$

Når det er behov for en elektrisk effekt, vil den være:

$$Q_{el} = m_l \cdot c_p \cdot (T_{t1,sf} - T_{t1,s}) \quad (3.83)$$

For å beregne middeltemperaturen til platen T_{pm} benyttes ligningen:

$$T_{pm} = \frac{\frac{q_u}{A_p} - S}{-U_l} + T_a \quad (3.84)$$

3.5.4 Numerisk beregningsmetode

Siden middeltemperaturen til platen T_{pm} er ukjent og exit-temperaturen til fluidet T_{fo} er ukjent, kan ikke nyttig energi Q_u beregnes siden det samlede varmetapstallet avhenger av disse to temperaturene som er ukjente. Begningene må utføres flere ganger der det tippes en start verdi på U_l . Dette kan gjøres med en while løkke i Matlab som først gjøre en beregning, for så å finne en ny verdi på U_l . Den nye verdien benyttes til neste beregning og prosessen gjentar seg selv helt til differansen mellom disse to er så lav at det ses på som nøyaktig nok. Denne while-løkken er plasert i en for-løkke som henter timesverdiene til klimadata og beregningene kan gjøres for hver time i løpet av et år. Steg for steg fremgangsmåte er:

1. Benytt de beregnede verdiene for I_{total} og klimadata for den aktuelle dagen og timen.
2. Er $I_{total} \leq 0$ hopp til steg 13. så beregningstid spares.
3. Benytt $T_{fi} = T_{t3}$, som er temperaturen i bunn av akkumuleringstanken.
4. Tipp verdi for det samlede varmetapstaller U_l .
5. Tipp verdi for utløpstemperaturen til fluidet i røret T_{fo} .
6. Tipp verdi for temperatur på glass 1 og glass 2 T_{g1} og T_{g2} .
7. Finn de termodynamiske egenskapene til fluidet ved en temperatur som er gjennomsnittet av T_{fi} og T_{fo} .
8. Beregn alle varmetapstall.
9. Beregn middeltemperaturen T_{pm} til platen.
10. Beregn ny verdi av T_{fo} , T_{g1} og T_{g2} ved hjelp av varmetapstallene og T_{pm} .
11. Beregn ny verdi på U_l
12. Gjenta steg 3. til 10. med de nye verdiene til ønsket nøyaktighet er oppnådd.
13. Beregne energibalanse til de tre nodene i akkumuleringstanken.
14. Begynn på steg 1. igjen for neste time i året, helt til alle timene i året er beregnet

3.6 Matematisk modell for solcelle

Det er sett på en metode fra (Messenger & Ventre, 2010) og en fra (Duffie & Beckmann, 1991) for å beregne strøm og spenning for en solcelle og et solcellepanel. Det er for å se hvordan temperatur påvirker solcellen og hvordan det er mulig beregne temperaturen til solcellen.

For en ideell celle er I-V karakteristikken utledet ved hjelp Kirchoffs strøm og spenningslov av (Messenger & Ventre, 2010 s.49)

$$I = I_l - I_0 \cdot \left(\exp \left(\frac{q_{cell} \cdot V}{k_{cell} \cdot T_{cell}} \right) - 1 \right) \quad (3.85)$$

Der I_l er celle-strømmen fra fotoner, $q_{cell} = 1.6 \cdot 10^{-19}$, $k_{cell} = 1.38 \cdot 10^{-23}$ og T_{cell} er temperaturen til cellen i Kelvin. Ved å sette $V = 0$ vil $I_{SC} = I_l$, som er kortslutningsstrømmen. Når en celle er testet under standardforhold med en stråling på $G_0 = 1kW$ og $AM = 1.5$ kan I_l ved ulik innstrålt effekt beregnes etter:

$$I_l(G) = \frac{G}{G_0} \cdot I_l \cdot (G_0) \quad (3.86)$$

I (Messenger & Ventre, 2010) brukes G for solstråling istedet for I_{total} . Det er mer oversiktlig for solceller da det er mange strømmer med I som tegn. De kan da komme litt om hverandre i metodekapitlet. For å finne open-circuit spenningen blir cellestrømmen satt til null og ligningen blir:

$$V_{OC} = \frac{k_{cell} \cdot T_{cell}}{q_{cell}} \cdot \ln \frac{I_l}{I_0} \quad (3.87)$$

Den maksimale effekten man kan hente ut av en solcelle eller et solcellepanel er strøm ganger spenning. Siden strømmen for en solcelle er avhengig av spenningen er det i praksis en regulator, som undersøker ved hvilken spenning effekten er størst. Den jobber da kontinuerlig med å holde spenningen på det nivået som gir størst energiutbytte. En måte å beregne den maksimale spenningen kan gjøres etter:

$$P_{max} = F_F \cdot I_{SC} \cdot V_{OC} \quad (3.88)$$

F_F er cellens fillfaktor som varierer fra celle til celle, og viser hvor ideell en celle er. Det er ofte resistansen som påvirker fillfaktor i solcellen og den vil være avhengig av temperaturen. Siden temperaturen i cellen påvirker V_{OC} og da effekten man får ut kan temperaturen til cellen estimeres etter :

$$T_{cell} = T_a + \left(\frac{NOCT - 20}{0.8} \right) \cdot G \quad (3.89)$$

$NOCT$ er temperaturen cellen oppnår, når den opereres under open-circuit ved $T_a = 20$ grader Celsius, $AM = 1.5$, $G = 0.8kW/m^2$ og en lufthastighet under $1m/s$. Dette er forhold som ikke nødvendigvis er vanlige utendørs i løpet av et år ved nordisk klima. Derfor blir det benyttet en lignende modell av (Duffie & Beckmann 1991) som kan benyttes for en celle, et panel av flere celler eller en modul av flere

panel. Denne modellen baserer seg også på diodeligningen, og er:

$$I = I_l - I_0 \cdot \left(\exp^{\frac{V+I \cdot R_s}{a_{cell}}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (3.90)$$

- I_l er strøm drevet av stråling.
- I_0 er the diode re strøm.
- R_s er seriemotstand.
- R_{sh} er shuntmotstand.
- a_{cell} er "curve fittingparameter.

Den samme ligningen benyttes av (Paradis, Rousse, Lamarche og Nessredine 2017 s 6.). De neglissgjører ikke R_{sh} , selv om at $R_{sh} \gg R_s$ og dette leddet vil bli veldig lite. I denne oppgaven blir det bakerste leddet i ligning 3.90 utelatt. Egenskapene til en solcelle varierer fra produsent til produsent. Følgende liste av referanseverdier er benyttet i beregningene i denne oppgaven:

- $I_{sc,ref} = 2.9$
- $V_{oc,ref} = 20$
- $I_{mp,ref} = 2.67$
- $V_{mp,ref} = 16.5$
- $\mu_I = 0.001325$
- $\mu_V = -0.0775$

Ved bruk av de oppgitte verdiene for dette spesifikke panelet og temperaturen, kan kortslutningsstrømmen I_{sc} og den åpne kretsspenningen V_{oc} beregnes

$$I_{sc} = \mu_I \cdot (T_{celle} - T_{cell,ref}) + I_{sc,ref} \quad (3.91)$$

$$V_{oc} = \mu_V \cdot (T_{celle} - T_{cell,ref}) + V_{oc,ref} \quad (3.92)$$

De neste tre ligningene er mellomregninger for å kunne beregne verdier på parametrene i ligning 3.90.

$$I_{L,ref} = I_{sc,ref} \quad (3.93)$$

$$a_{cell,ref} = \frac{\mu_I \cdot V \cdot T_{cell,ref} - V_{oc,ref} + \varepsilon_{cell} \cdot N_s}{\frac{\mu_I \cdot T_{cell,ref}}{I_{L,ref}} - 3} \quad (3.94)$$

$$I_{0,ref} = I_{L,ref} \cdot \exp^{\frac{-V_{oc,ref}}{a_{cell,ref}}} \quad (3.95)$$

Det er nå mulig å beregne verdier på parameterne i ligning 3.90 og at strøm og spenning for solcellen kan løses.

$$a_{cell} = a_{cell,ref} \cdot \frac{T_{celle}}{T_{cell,ref}} \quad (3.96)$$

$$I_L = \frac{I_{total}}{I_{ref}} \cdot (I_{L,ref} + \mu_I \cdot (T_{celle} - T_{cell,ref})) \quad (3.97)$$

Der I_{total} stråling som når solcellen fra solen og $I_{T,ref}$ er referansestrålingen under testing av solcellepanelet som gjerne er på $1000W/m^2$.

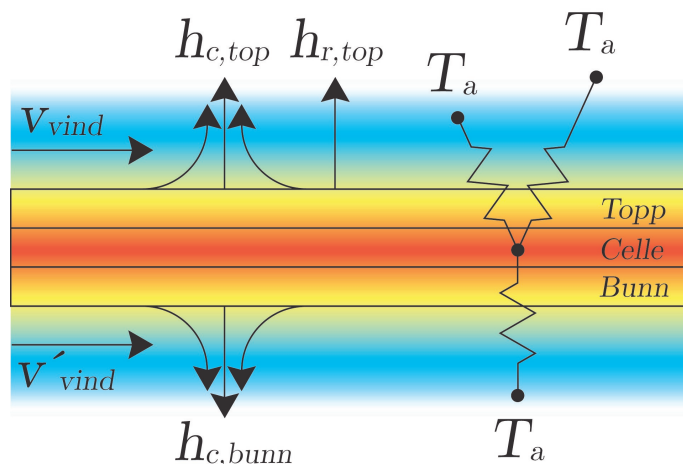
$$R_s = \frac{a_{cell,ref} \cdot \ln(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{l,ref}}) - V_{mp,ref} + V_{oc,ref}}{I_{mp,ref}} \quad (3.98)$$

$$I_0 = I_{0,ref} \cdot \left(\frac{T_{celle}}{T_{cell,ref}} \right)^3 \cdot \exp \left[\frac{\varepsilon_{cell} \cdot N_s}{a_{cell,ref}} \cdot \left(1 - \frac{T_{cell,ref}}{T_{celle}} \right) \right] \quad (3.99)$$

Det er nå mulig å løse ligning 3.90 numerisk. Det gjøres ved hjelp av en funksjon i Matlab kalt *fzero*. For å finne MPP, løses da ligningen for spenninger fra null til V_{oc} med et intervall på 0.1. Alle disse verdiene er avhengig av temperaturen på solcellepanelet. Den kan beregnes ved hjelp av *NOCT* i ligning 3.89. Det gir derimot liten frihet til å undersøke hvordan design påvirker varmetapstallene og temperaturen til et solcellepanel.

3.6.1 Solcellepanelets energibalanse

Det er beregnet varmetapstall for tvungen og naturlig konveksjon på oversiden av solcellen. Det er ikke tatt hensyn til vindretningen da det ville ha komplisert beregningene betraktelig. Energitalpet i form av stråling blir utvekslet mot atmosfæretemperaturen. På undersiden ble varmetapstallet for vinklet naturlig konveksjon benyttet. Ser man på figur 4 kan man se illustrasjon av hvilke varmetap det er fra en solcelle.



Figur 4: Viser hvordan hvilke varmetapstall som er benyttet til solcellepanelets energibalanse (figur fra Yvonne Groseth).

For varmeovergangstallet til stråling er $h_{r,top} = h_{rg2a}$, fra ligning 3.50 benyttet. For kombinert naturlig og tvungen konveksjon, $h_{c,top}$ på oversiden av solcellepanelet, ble ligning 3.59 benyttet. På undersiden ble ligning 3.56 benyttet der $\beta - 90$ er helningen til flaten. Variabelen v' ble benyttet som lufthastighet på undersiden av solcellepanelet, for å undersøke muligheten for oppvarming av ventilasjonsluft ved tvungen konveksjon, og om det kan bidra til nedkjøling av solcellepanelet. I en energibalanse for et solcellepanel vil systemet motta energi i form av den innstrålte effekten I_{total} . Systemet vil avgi energi i form av elektrisitet P_{max} og samlet varmetap til omgivelsene. Det samlede varmetapstallet UA kan beregnes etter:

$$UA = \frac{Q_{topp} + Q_{bunn}}{T_{celle} - T_a} \quad (3.100)$$

Og solcelletemperaturen T_{celle} kan beregnes etter energibalansen:

$$T_{celle} = \frac{I_{total} - P_{max}}{UA} + T_a \quad (3.101)$$

Siden T_{celle} er avhengig av UA og P_{max} , og de er avhengige av T_{celle} , må beregningen gjøres numerisk.

3.6.2 Numerisk beregningsmetode solcellepanel

Fremgangsmåten for beregning av solcellepanelet er relativt likt som for solfangeren. Først blir timesverdien fra værdata lest av klimadatatabellen. Den direkte, diffuse og reflekterte innstrålte solenergien blir justert i forhold til vinkling på panelet og plassering mot solen. For å finne varmetapstallene og hva solcelle temperaturen er, blir en startverdi tippet på 40°C og en while-løkke kjøres i Matlab. Varmetapet fra naturlig konveksjon under solcellen beregnes. Fra toppen beregnes varmetap i form av stråling, naturlig og tvungen konveksjon. Elektrisk effekt i solcellen beregnes for alle spenningene med et intervall på 0.1 og den største effekten plukkes ut som MMP. Alt dette summeres opp i energibalansen og en ny temperature på solcellen kan beregnes etter:

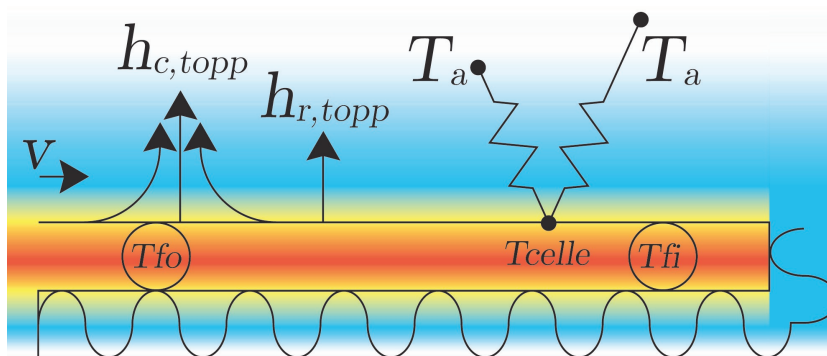
1. Benytt de beregnede verdiene for I_{total} og klimadata for den aktuelle dagen og timen.
2. Er $I_{total} \leq 0$ begynn på steg 1. for neste time i året så beregningstid spares.
3. Tipp verdi for temperatur på solcellepanelet T_{celle} .
4. Beregn strømmen for alle spenninger til V_{oc} med et intervall på 0.1 med fzero-funksjonen i Matlab.
5. Beregn alle effektene for spenningene og strømmen beregnet, og plukk ut den største effekten.
6. Finn de termodynamiske egenskapene for gjennomsnittetstemperaturen til luft og T_{celle} .
7. Beregn alle varmetapstall, $h_{r,top}$, $h_{c,top}$ og $h_{c,bunn}$
8. Beregn UA for solcellepanelet varmetapstallene
9. Beregn ny T_{celle} , sammenlign med den tippede verdiene
10. Gjenta steg 3. til 10. med de nye verdiene til ønsket nøyaktighet er oppnådd.
11. Begynn på steg 1. igjen for den neste timen i året, helt til alle timene i året er beregnet

3.7 Matematisk modell for vannkjølt solcellepanel

Det ble også utviklet et program for å beregne solcellepanel som nedkjøles av vannrør. Planen var å bruke solcelleberegningen sammen med deler av solfangerberegningene. Pga mangel på tid, og ikke optimal metode for flere solcellepanel ble det gjort en liten forenkling der akkumuleringstanken ble utelatt og solcellepanelet ble nedkjølt med vann med konstant temperatur inn i solfangeren og massestrøm når det var sol tilgjengelig.

3.7.1 Det vannkjølte solcellepanelets energibalanse

Det er de samme varmetapene og matematiske sammenhengene for energibalanse for et vannkjølt solcellepanel. Ser man på figur 5 er det skissert opp sannsynlige varmetap som benyttes i en energibalanse for systemet.



Figur 5: Viser hvordan energibalansen er for et vannkjølt solcellepanel

Det blir sett bort ifra varmetap i bunn og siden av anlegget for enkelthetskyld

$$UA = \frac{Q_{topp}}{T_{celle} - T_a} \quad (3.102)$$

Og solcelletemperaturen T_{celle} kan beregnes etter energibalansen:

$$T_{celle} = \frac{I_{total} - (P_{max} + Q_u)}{UA} + T_a \quad (3.103)$$

3.7.2 Numerisk beregningsmetode for vannkjølt solcellepanel

Beregningsmetoden er en blanding av metoden for solcellepanelet og solfangeren. For å unngå å gjenta for mye er det listet opp steg under:

1. Benytt de beregnede verdiene for I_{total} og klimadata for den aktuelle dagen og timen.
2. Er $I_{total} \leq 0$ hopp til steg 1. så beregningstid spares.
3. Tipp verdi for temperatur på Solcellepanelet T_{celle} .
4. Tipp verdi for det samlede varmetapstaller U_l .
5. Tipp verdi for utløpstemperaturen til fluidet i røret T_{fo} .
6. Finn de termodynamiske egenskapene til fluidet ved en temperatur som er gjennomsnittet av T_{fi} og T_{fo} .
7. Beregn Q_u og T_{fo} ved hjelp $T_{pm} = T_{celle}$.
8. Beregn strømmen for alle spenninger til V_{oc} med et intervall på 0.1 med `fzero`-funksjonen i Matlab.
9. Beregn alle effektene for spenningene og strømmen beregnet, og plukk ut den største effekten.
10. Finn de termodynamiske egenskapene for gjennomsnittstemperaturen til luft og T_{celle} .
11. Beregn UA for solcellepanelet og varmetapstallene fra toppen.
12. Beregn ny T_{celle} , ved hjelp av energibalansen, sammenlign med den tippede verdiene
13. Gjenta steg 3. til 10. med de nye verdiene til ønsket nøyaktighet er oppnådd.
14. Beregne energibalanse til de tre nodene i akkumuleringstanken.
15. Begynn på steg 1. igjen for neste time i året, helt til alle timene i året er beregnet

4 Resultat og diskusjon

For å undersøke denne oppgavens problemstilling om "Hvordan påvirker lufttemperatur og klima solcellepanel og solfangere for bygg?", fremstilles det resultater av simuleringer gjort for hver time i løpet av et år.

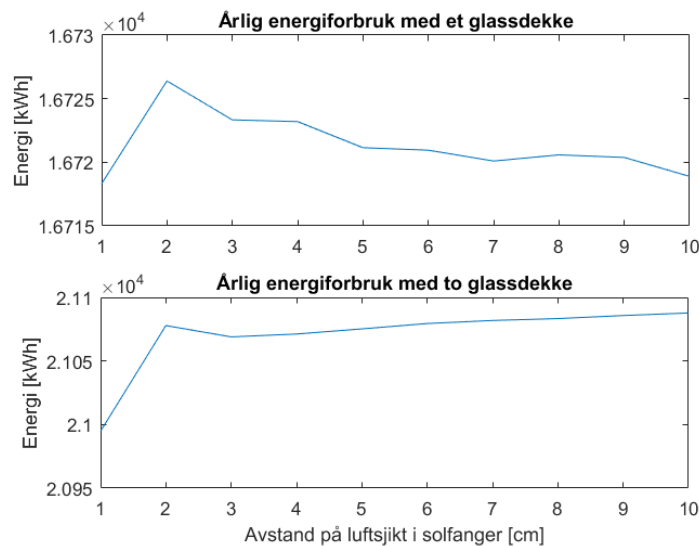
Det presenteres først resultater hvor det er undersøkt hvordan antall glass, avstand på glass, areal på solfanger, helningsvinkel, massestrøm til vann og volum til akkumuleringstanken påvirker den årlige energiutnyttelsen til en solfanger.

Disse resultatene benyttes til å velge riktige parametere til en årssimulering. For årssimuleringen av en solfanger blir det undersøkt temperaturnivåer i akkumerings-tanken og energiutnyttelsen til solfangerannlegget.

For solcellepanelet presenteres det resultater for hvordan temperatur og solinnstråling påvirker strøm, spenning og effekt. Så vises energisimuleringene gjort i løpet av et år, der det er mulig å se spennings- og strømnivå, energiutnyttelse og temperatur. For å vurdere hvordan solcellepanelet kan benyttes til å dekke deler av oppvarmingsbehovet, blir det presentert resultater av elektrisk og termisk årlig energiutbytte i forhold til lufthastigheter under solcellepanelet.

Til slutt blir det presentert en årssimulering av et forsøk med et solcellepanel som blir nedkjølt med vann.

4.1 Variabler for en Platesolfanger

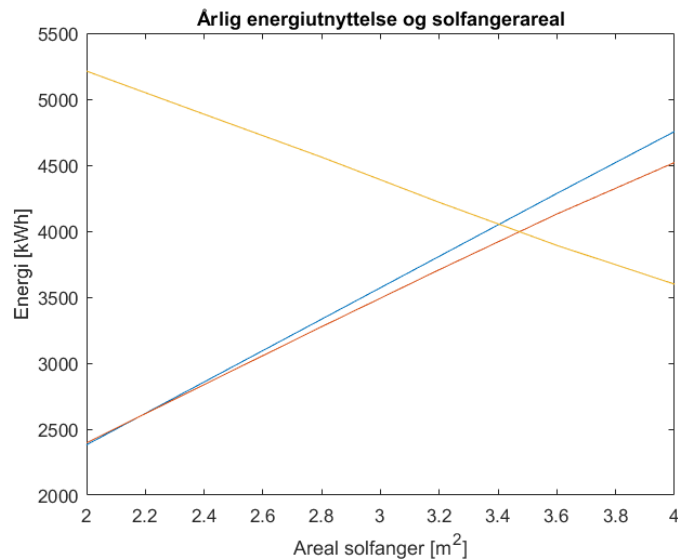


Figur 6: Viser årlig utnyttet energi i forhold til avstand på luftsjukt under glasset i solfangeren.

I den øverste grafen i figur 6 kan man se hvordan energiutnyttelsen er i løpet av ett år med ett glass i solfangeren. Det er minimale endringer i energiutbyttet i forhold til avstanden på luftsjiktet I grafen under er det to luftsjikt og to glass. Begge glassene er på én cm hver med en emmisivitet lik 0,95. Som man ser i grafene er den en brå økning i begge tilfellene fra 1 til 2 cm. Alikevill er det en minimal endring på

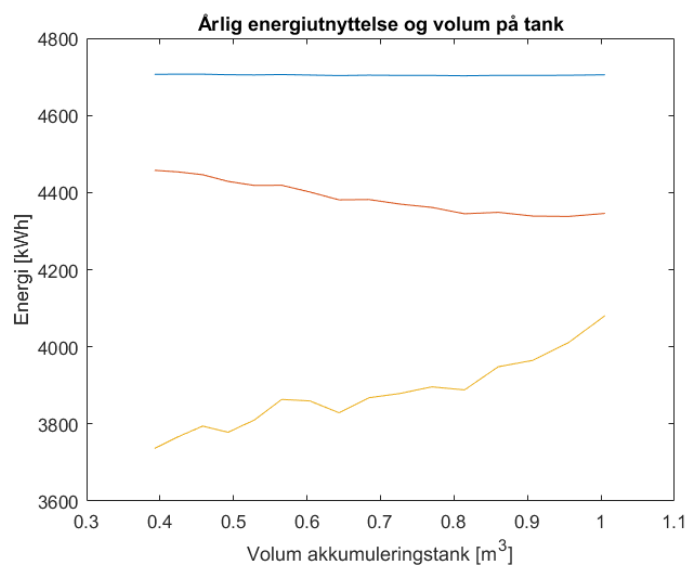
energiutbytte i forhold til sjiktavstand. Det som er av interesse er å sammenligne disse to grafene, for så å se at det vil være over 20% økning av energiutbytte i løpet av et år ved bruk av to glass i stedet for ett. Videre i resultatene benyttes da to glass, med en sjiktavstandt på 2 cm hver.

Dette resultatet ble gjort tidlig i oppgaven for å bestemme om det var ønskelig å benytte ett eller to glass. Det var for et scenario med et stort solfangerareal og derfor er den årlige energiutnyttelsen så høy i forhold til de neste resultatene.



Figur 7: Viser med blå graf energien fra solfanger, den røde grafen viser energien fra solfanger der varmetap i akkumuleringstanken er fratrukket og den gule grafen viser strømforbruket for solfanger areal fra 2 til 4 m²

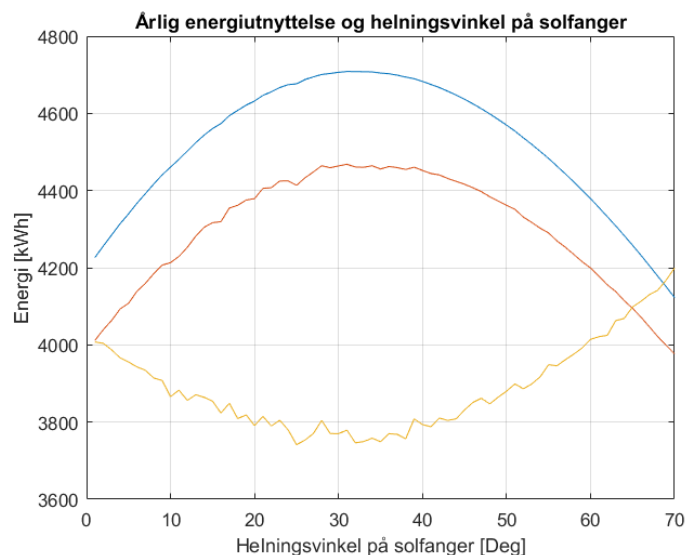
I figur 7 øker energiutnyttelsen fra solfangeren med økende solfangerareal, som er vist med den blå grafen. Den gule grafen representerer det elektriske energiforbruket, og synker tilsvarende. Den røde grafen tar hensyn til energitap fra akkumuleringstanken. Energitapet i akkumuleringstanken øker med større solfangerareal fordi temperaturnivået i tanken blir høyere, noe som gjør at varmestrømmen i form av konduksjon blir større. Ved 3.5 m² vil solfangeren stå for 50% energibehovet. Økes arealet over 4 m² vil vannet kunne oppnå temperaturer over 100 °C. Derfor benyttes 4 m² solfangerareal videre i oppgaven.



Figur 8: Viser med blå graf energien fra solfanger, den røde grafen viser energien fra solfanger der varmetap i akkumuleringstanken er fratrukket og den gule grafen viser strømforbruket. Dette er for et 4 m^2 areal på solfangeren

Sammenlignes grafene i figur 8, kan man se at energien fra solfangeren holder seg relativt konstant, mens strømforbruket øker for større volum på tanken. Strømforbruket vil trolig øke på grunn av at det blir lavere temperaturnivå i en stor tank, og elektrisk energi er nødvendig for å få temperaturen til forbruksvannet over $65 \text{ }^\circ\text{C}$. Varmetapet til akkumuleringstanken øker også, som gjør at den røde grafen minker med økt volum. Det kommer av at UA verdien blir større for en større tank.

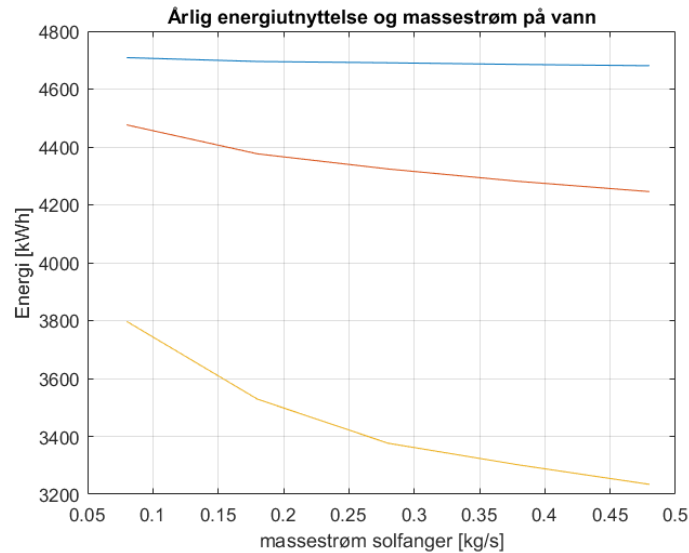
Det vil ifra denne grafen være gunstig med et lavt volum, og 0.39 m^3 benyttes videre i beregningene.



Figur 9: Viser med blå graf energien fra solfanger, den røde grafen viser energien fra solfanger der varmetap i akkumuleringstanken er fratrukket og den gule grafen viser strømforbruket for varierende helningsvinkler på solfangeren

I figur 9 ser man at det vil være størst energiutbytte ved rundt 35 graders helningsvinkel, vist med den blå og røde grafen. Det er ikke stor forskjell på fra 20 til 45 graders vinkling og det vil kun være rundt 12 % lavere energiutnyttelse for en horisontal flate. 70 grader er den kritiske vinkelen for hvor det konvektive varmeovergangstallet har gyldighet og energiutnyttelsen ved denne vinkelen er energiutnyttelsen litt lavere en for en horisontal flate.

Videre i oppgaven benyttes en helningsvinkel på 34 grader.



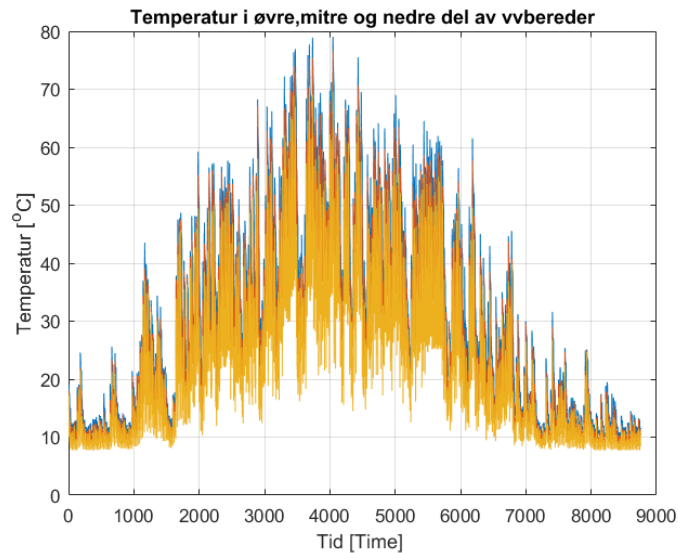
Figur 10: Viser med blå graf energien fra solfanger, den røde grafen viser energien fra solfanger der varmetap i akkumuleringstanken er fratrukket og den gule grafen viser strømforbruket ved ulike massestrømmer på vannet

Som man ser i den blå grafen i figur 10 har massestrømmen til vannet i solfangeren en liten påvirkning på hvor mye energi det er mulig å hente fra solen. For massestrømmer under 0.1 kg/s er det problemer ved utregningene i programmet og over 0.1 kg/s vil det være temperaturer i varmtvannsberederen som overskrider $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Det er trolig derfor den røde grafen synker, da den blir påvirket varmetabet til akkumuleringstanken, og det varmetapet er større for høyere temperaturer.

Videre i oppgaven benyttes en massestrøm på vannet i solfangeren på 0.1 kg/s . Dette gjøres kun på grunnlag av temperaturnivåer som vil bli belyst videre.

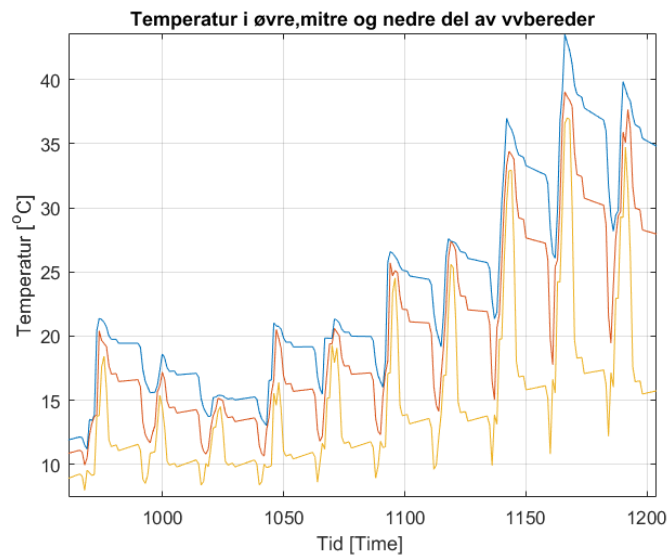
4.2 Årssimulering av platesolfanger

Utifra de foregående resultatene, er det gjort en simulering over et år med fastsatte variabler. Solfangerareal på 4 m^2 , massestrøm 0.1 kg/s , helningsvinkel 34 Deg , antall glass er to og volum på akkumuleringstanken er 0.39 m^3 . Akkumuleringstanken er delt opp i tre deler og det er mulig å se hvordan temperaturen i disse delene vil være for hver time i løpet av et år.



Figur 11: Viser hva temperaturen i de ulike delene av akkumuleringstanken vil være for hver time av et år. Den blå grafen er øvre del, den røde grafen er mitredel og den gule er nedre del.

Som man ser i figur 11 vil det være stor forskjell på temperaturnivået i tanken i vintermånedene og i sommermånedene. Det er mye mindre energi å hente fra solen om vinteren på grunn av antall timer solen skinner. Det vil også være større varmetap for solfangeren pga. den lave lufttemperaturen. I simuleringene blir det tilført elektrisk energi når vannet forlater akkumuleringstanken, og ikke inne i tanken. Siden det da vil være lave temperaturer i tanken i vintermånedene, er det letter å hente ut litt energi fra solen på vinterstid også. Det kan man se i starten og slutten av året da temperaturen ligger rundt $10 \text{ }^\circ\text{C}$ og den vil nærme seg temperaturen på $^\circ\text{C}$, som er temperaturen på forbruksvannet inn i tanken.

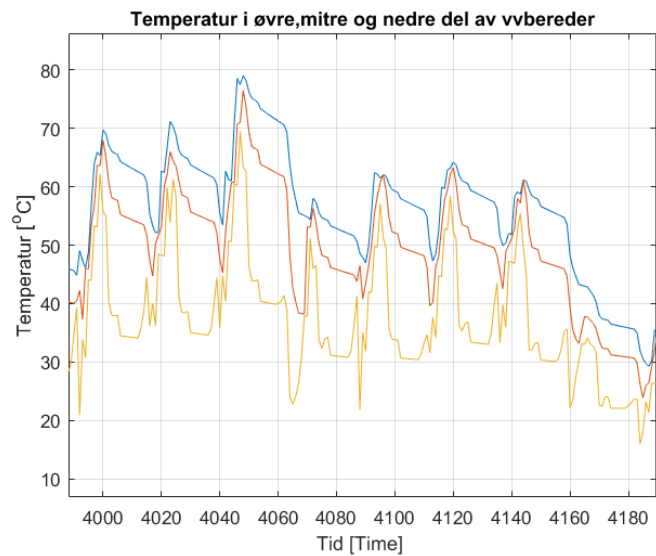


Figur 12: Viser hva temperaturen i de ulike delene av akkumuleringstanken vil være for hver i en periode på 200 timer om vinteren. Den blå grafen er øvre del, den røde grafen er mitre del og den gule er nedre del.

Plottet fra figur 11 er forstørret i et mindre tidsintervall i figur 12. Det viser litt bedre hvordan forbruket av vann og tilførselen av energi påvirker temperaturnivåene i tanken. Simuleringen av temperatur prøver å ta hensyn til at vannet fra solfangeren vil legge seg der det er lik temperatur i tanken.

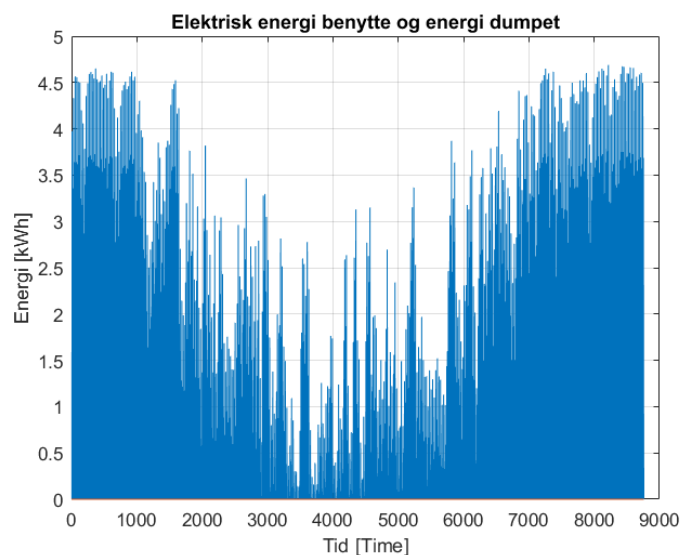
Perioden i figur 12 vil være rundt midten av februar. Det er en ganske kort periode da temperaturen såvidt stiger over $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dette er unntaket og energiutnyttelsen til solfangeren er så lav i vintermånedene at temperaturene i er rundt $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ i tanken..

Det var problematisk å finne en løsning på å sette den elektriske kolben inne i akkumuleringstanken. Det er en mer vanlig metode, og hadde den vært inne i akkumuleringstanken ville temperaturnivået ha økt. Da ville det blitt enda lavere energiutnyttelse for solfangeren i vintermånedene og man kan vurdere om det er verdt å drifte den mtp. frostproblemer og varmetap om reguleringen ikke er tilstrekkelig.



Figur 13: Viser hva temperaturen i de ulike delene av akkumuleringstanken vil være for hver i en periode på 100 timer om sommeren. Den blå grafen er øvre del, den røde grafen er mitre del og den gule er nedre del.

Plottet i figur 13 er et annet forstørret bilde fra figur 11, men i sommermånede. Det viser et temperaturen i toppen av tanken ikke overskriver $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ på det varmeste. Det er mulig å se etter time 4040 og da vil temperaturen i bunn av tanken ligge opp mot $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. I simuleringene er det et fast varmtvannsforbruk hver dag hele året. I perioder da det ikke er noen hjemme og det ikke er noe forbruk, vil temperaturen i akkumuleringstanken bli høy og det er viktig å passe på trykkendringene som kan oppstå om vannet stiger over $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

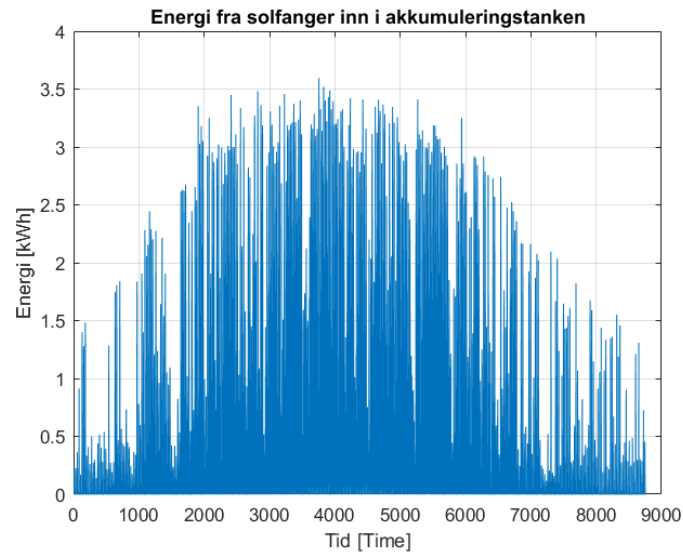


Figur 14: Viser hvor mye elektrisk energi som må benyttes for hver time i løpet av et år

Ser man i figur 14 er det elektriske energiforbruket vist i blått. Det er lagt inn en

funksjon i beregningsprogrammet som dumper varme om temperaturen overskrider 95°C . Det skjer ikke med parameterne i denne beregningen.

Det er i vintermånedene det er størst bruk av elektrisk energi. Når det elektriske elementet er utenfor akkumuleringstanken blir vannet varmet opp direkte. Den maksimale elektriske effekten ligger rundt 4.5 kW og at det vil være sansynlig med et 2 kW element i akkumuleringstanken, for å dekke behovet på de dagene det er lite tilgjengelig solenergi. Det er også deler av sommermånedene hvor det er behov for elektrisk energi. Samlet elektrisk energibruk i løpet av et år vil bli 4060 kWh



Figur 15: Viser hvor mye energi som utnyttet ved hjelp av solfangeren for hver time i løpet av året

Ser man på figur 15, er det stor forskjell i energiutnyttelsen, ettersom hvilken tid på året det er. Det er som forventet ettersom det er lav lufttemperatur og lite lys i vintermånedene. Toppunktene følger en jevn bue som samsvarer med hva man kan forvente. Det er interessant å se at værforholdne gjør at det er perioder på vinteren hvor det er lite energi tilgjengelig. Det er synlig i form av stor avstand mellom topppunktene i grafen.

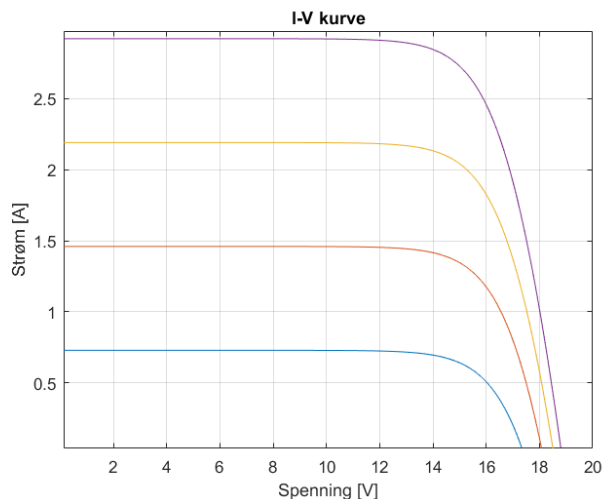
I denne beregningen vil solfangeren utnytte $42066\text{ kWh}/\text{m}^2$ og trekker man fra varmetapene i akkumuleringstanken er energiutnyttelsen på 4025 kWh som vil gi $1006\text{ kWh}/\text{m}^2$. Dette er over gjennomsnittet av verdier som (Lappegard et al. 2014 s. 15) har målt til $450\text{ kWh}/\text{m}^2$. De målingene varierer fra 100 til $800\text{ kWh}/\text{m}^2$ og gjelder for vakuumsolceller og platesolfangerer. Det er mange faktorer som kan forklare forskjellen i beregningene og de målte verdiene. Det vil ikke være riktig å sammenligne resultatene direkte, for da må det brukes samme klimadata og fysiske parametere for solfangerene. Men det gir en pekepinne på at energiutnyttelsen i disse beregningene kan være for høye og ikke bør tas vurderes som sikre før det er gjort sammenligninger der det er likt grunnlag. Mest sannsynlig vil en reguleringsfunksjon gjøre at det er større margin før pumpen i solfangeranlegget slår inn. Med et elektrisk element i akkumuleringstanken øker temperaturen og varmetapet, samt øke temperaturen i bunn av akkumuleringstanken som går at solfangeren får utnyttet

mindre energi. Disse forholdene kan bidra til at beregningene i denne oppgaven får en høy årlig energiutnyttelse.

Etter tommelfingerregelen til (Andresen, 2008 s.20) for solfangeranlegg, vil man årlig få 300-700 kWh/m^2 fra solfangeren og dekke 50 % av energibehovet til fire personer med en 400 liters tank. Dette stemmer ganske godt med årsberegningen der volumet på tanken er 390 liter, solfanger arealet er på 4 m^2 , den utnyttede energien på 4025 kWh og den elektriske energien på 4060 kWh . Den høye energiutnyttelsen på 1006 kWh/m^2 kan da kanskje delevis forklares med at det er benyttet to lag med glass som vil rundt 20% høyere energiutnyttelse en enkeltglass solfangere.

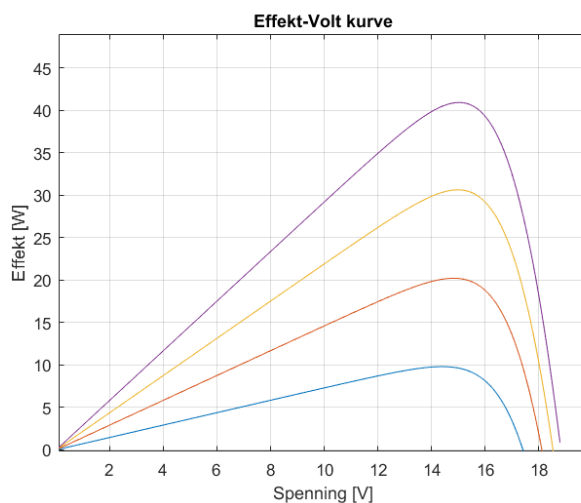
4.3 Solcelle

I dette delkapitlet blir det presentert beregninger der et spesifikk solcellepanel er det undersøkt mtp. hvordan strømmen vil være ved ulike spenninger, temperaturer og innstrålt lys. Dette er gjort så det er mulig å se hvordan klimaet vil påvirke den maksimale effekten (MPP) til solcellepanelet. Det er gjort energiberegninger for hver time i løpet av et år. Dette er gjort for å se hvordan energiutbyttet fra et solcellepanel vil være, og hvilken temperatur solcellepanelet vil ha.



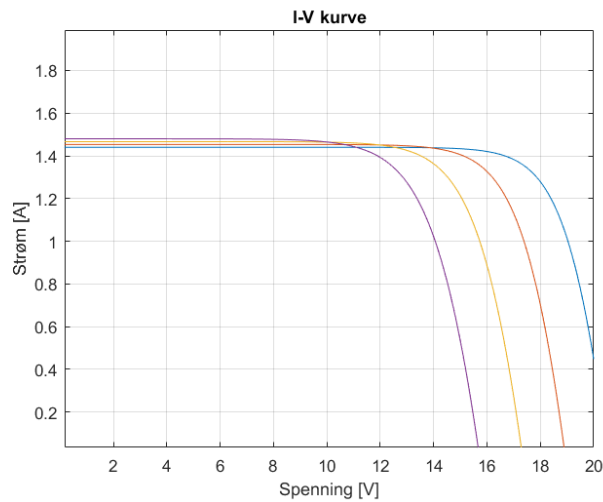
Figur 16: Strøm i forhold til spenning. Innstrålt energi er lilla 1000, gul 750, rød 500 og blå 250 W/m^2 .

Grafene i figur 16, viser hva strømmen i solcellepanelet vil være for ulike spennin-ger. Dette er for et solcellepanel med en temperatur på $40 \text{ }^\circ\text{C}$. De fire ulike grafene viser at det i hovedsak er strømmen som endrer seg i forhold til innstrålt energi.



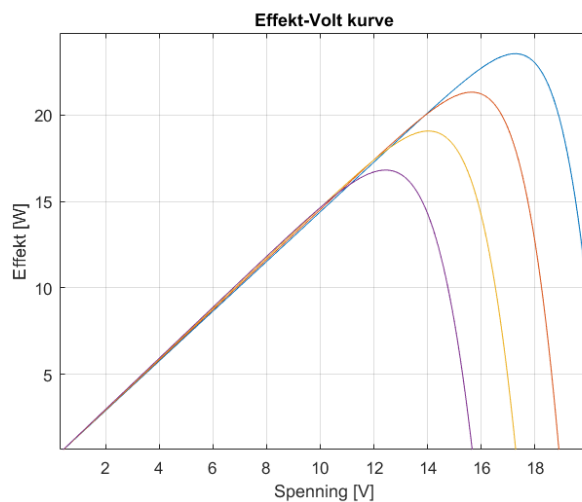
Figur 17: Effekt i forhold til spenning. Innstrålt energi er lilla 1000, gul 750, rød 500 og blå 250 W/m^2 .

For de samme innstrålingene er effekten vist i forhold til spenningen. De grafene har lik farge for innstrålt effekt som i figur 16. Det er liten variasjon i spenningen ved toppunktet og den går bare fra 14 til 16 Volt. Det er ca fire ganger så stor økning i effekt med fire ganger så stor innstrålt effekt. Dette kan man se ved å sammenligne toppunktet til den blå og den lilla grafen.



Figur 18: Strøm i forhold til spenning. Solcelletemperaturer er blå 10, rød 30, gul 50 og lilla 70°C.

Med en innstrålt effekt på 500 W/m^2 holder strømmen seg rimelig konstant ved lave spenninger. I figur 18 vil den åpne kretsspenningen V_{oc} , endrer seg mer med temperatur enn med innstrålt effekt.

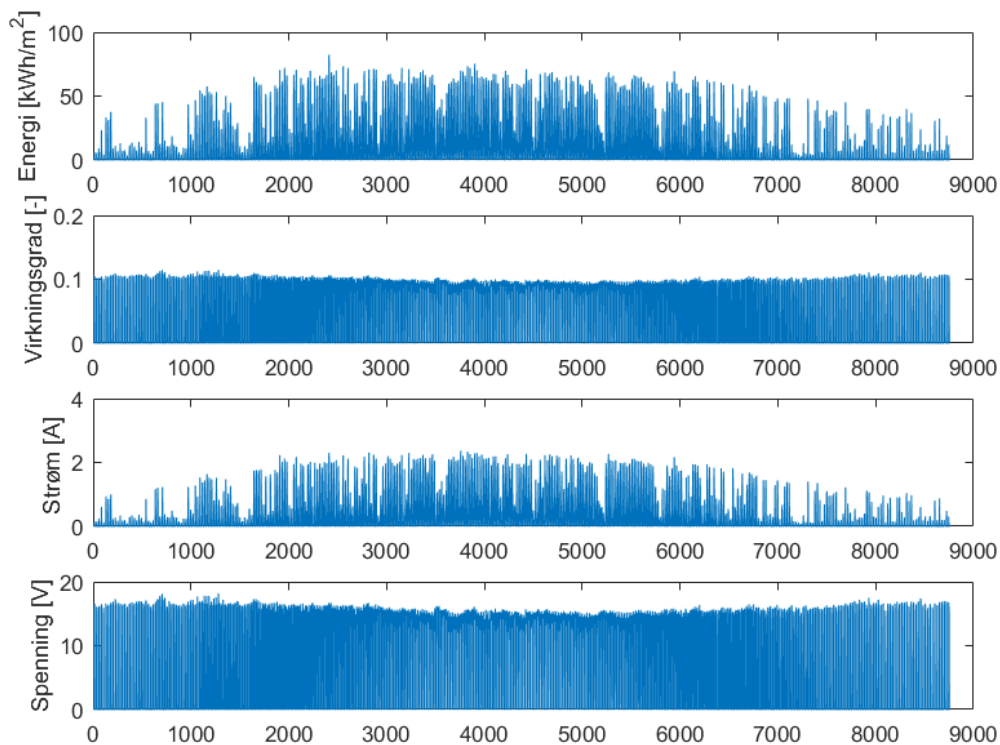


Figur 19: Effekt i forhold til spenning. Solcelletemperaturer er blå 10, rød 30, gul 50 og lilla 70°C.

Grafene som viser effekt i forhold til spenning i figur 19 har samme farge som temperatur som i grafene i figur 18.

Som man ser i figur 19 og 17 blir effekten i stor grad påvirket av temperaturen på cellen og hva solinnstrålingen er. Spenningen som gir den høyeste effekten blir også påvirket av de to variablene. Strømmen i solcellepanelet ble beregnet med fzero funksjonen i Matlab, som er en iterativ metode. Dette ble gjort for mange spenninger og så ble den maksimale effekten plukket ut. Dette er en tidkrevende prosess.

For årssimuleringene ble benyttet en iterativ metode for å finne varmetapstallet, temperaturen på solcellepanelet og den maksimale effekten til solcellepanelet. Dette ble gjort for hver time det var sol.



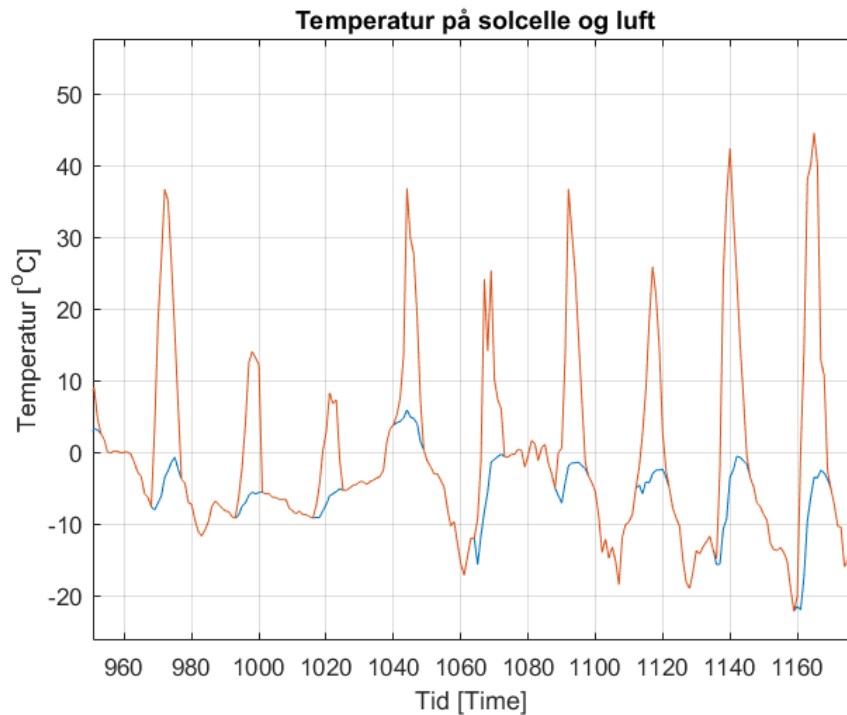
Figur 20: Årsimulering der den øverste grafen er Energiutnyttelsen. Den nest øverste er virkningsgrad. Den nest nederste er Strøm og den nederste er spenning for solcellepanelet

Ser man på øverste graf i figur 20, vil energiutbyttet være størst i sommermånedene. Plottet følger en jevn bue med lavest nivå i starten og slutten av året. Det er interessant å se at nivået holder seg relativt jevnt fra time 2000 til 6000. I denne perioden er det ikke noe klart topp-punkt selv om den innstrålte effekten fra sola har det. Det kan forklares ved at temperaturene til luften og for solcellepanelet øker, noe som gjør at energiutnyttelsen holder seg jevn.

Sammenligner man energiutnyttelsen fra solcellen med energiutnyttelsen fra solfangeren i figur 15, ser man at et solcellepanel har mindre variasjon i løpet av året. Det er som forventet da solceller er mer effektive ved lavere temperaturer, mens solfangere blir mindre effektive. Energiutbytte man får i løpet av et år er på 95 kWh/m^2 , som er ca.en diendel mindre en det beregningene viser for solfangeren.

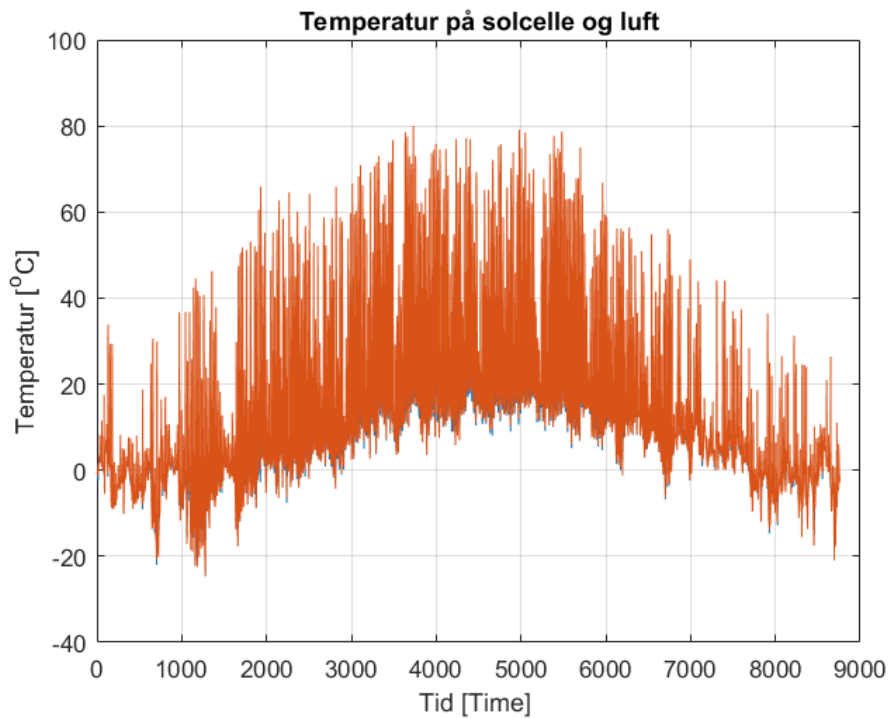
Den andre grafen viser virkningsgraden til solfangeren for hver time i året. Det er ikke mulig å se hvordan den endrer seg for hver time, men at den maksimalt ligger på ca. 10 %. Ved å summere opp elektrisk energi og dele den på den totale innstrålte energien fra solen vil den årsgjennomsnittlige virkningsgraden være på 7,3 %.

Det to grafene under viser hva strømmen og spenning vil være ved MPP for hver time. Det gir mening at det er så synlig forskjell mellom disse to, da strømstyrken synker mer for MMP ved lavere innstråling enn spenningen.



Figur 21: Temperatur for luft vist med den blå grafen, og solcelletemperatur vist med den oransje grafen, i en periode på 200 timer i februar.

Selv ved negative lufttemperaturer i figur 21 kan solcelletemperaturen overskride 40 °C. Det er på en dag da lufttemperaturen går fra -20 °C til rundt 5 °C og det vil være et oppvarmingsbehov i bygget.

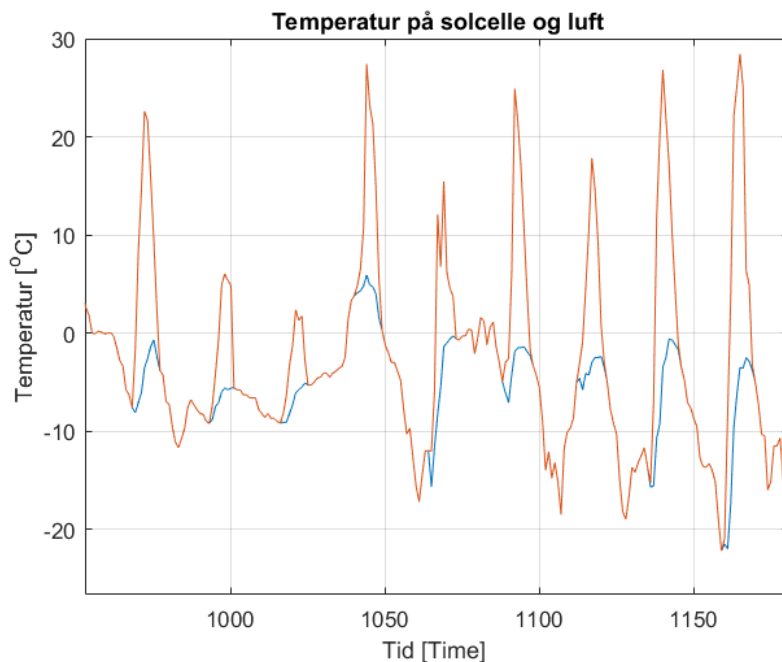


Figur 22: Temperatur for luft vist med den blå grafen (såvidt synlig på undersiden av grafen), og solcelletemperatur vist med den oransje grafen, i løpet av et år.

Det er større endringer i temperaturen til en solcelle enn i forhold til energiutbytte i løpet av et år. Det tyder på at det er mye energi som går til spille i form av varme og det kan være muligheter for å utnytte denne til oppvarming. Det er vesentlig lavere temperatur i vintermånedene som vil være gunstig for effektiviteten. Dette er vanskelig og lese utifra virkningsgraden i figur 20. I løpet av året vil det være perioder da temperaturen på et solcellepanel kan oppnå $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dette virker i overkant høyt og det kan tyde på at det er feil i energibalansen eller varmetapstallene ved beregningene. Samtidig er det kun naturlig konveksjon som er varmetapet på undersiden av solcellepanelet. Det er ikke tatt hensyn til at vind påvirker hvor mye varme som tapes på undersiden av solcellepanelet

4.4 Solcellepanel med luftkjøling

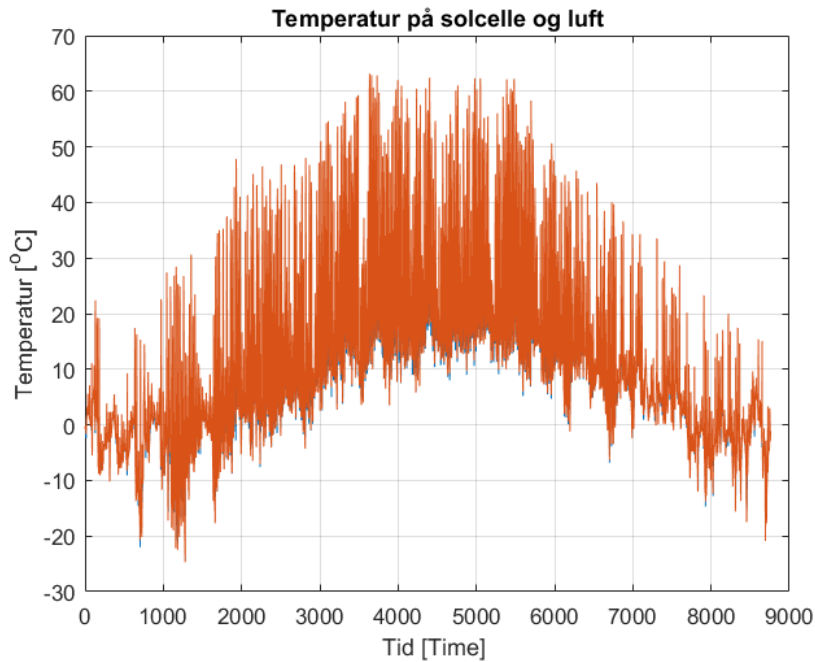
Det er gjort årsberegninger med konstant lufthastighet på undersiden av solcellepanelet. Årsberegningene er gjort for 0,5,10,15 og 20 m/s . Dette er gjort for å se hvor mye energi som kan være tilgjengelig ved eksempelvis å varme opp ventilasjonsluft. Samtidige vil det kunne kjøle ned solcellene som gir en bedre energiutnyttelse.



Figur 23: Temperatur for luft vist med den blå grafen, og solcelletemperatur vist med den oransje grafen, med en 5 m/s lufthastighet på undersiden i en periode på 200 timer i februar.

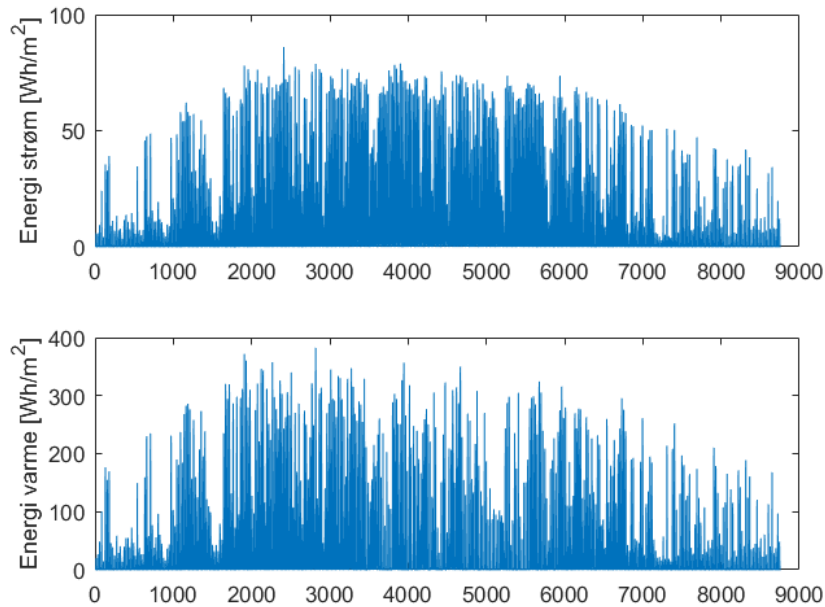
Sammenligner man grafene i figur 23 og 21 har temperaturen ved topp-punktene sunket med rundt ti grader for solcellen som har lufthastighet på 5 m/s på undersiden. Dette er også i perioder der lufttemperaturen er negativ, mens solcellepanelet kan ha en temperatur over 20 $^{\circ}C$. Man kan se at det er få timer i døgnet hvor det er sol da de oransje grafene er smale og avstanden mellom de er stor. Dette vil påvirke hvor mye energi som kan utnyttes, både elektrisk og termisk

Det dette plottet viser, er at det er mulig å utnytte spillvarme fra solcellepanelet til oppvarming av luft. Og det er på dager da det er oppvarmingsbehov.



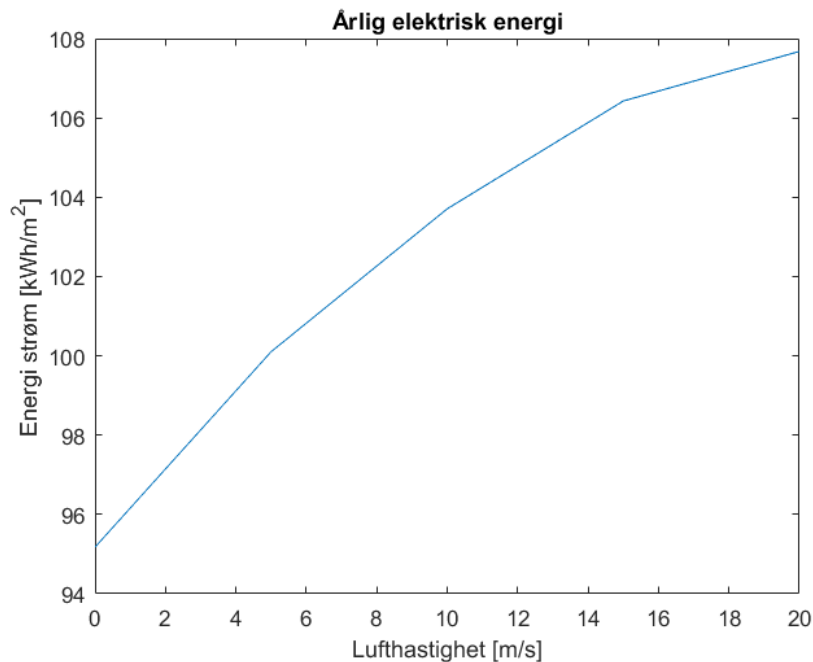
Figur 24: Temperatur for luft vist med den blå grafen, og solcelletemperatur vist med den oransje grafen, med en 5 m/s lufthastighet på undersiden i løpet av et år

Det er mulig å se forskjell i makstemperaturen på solcellepanelet i figur 24 og i figur 22. Makstemperaturene går fra litt under $80 \text{ }^\circ\text{C}$ til litt over $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Solcelletemperaturen reduseres med ca $10 \text{ }^\circ\text{C}$ i snitt i løpet av året.



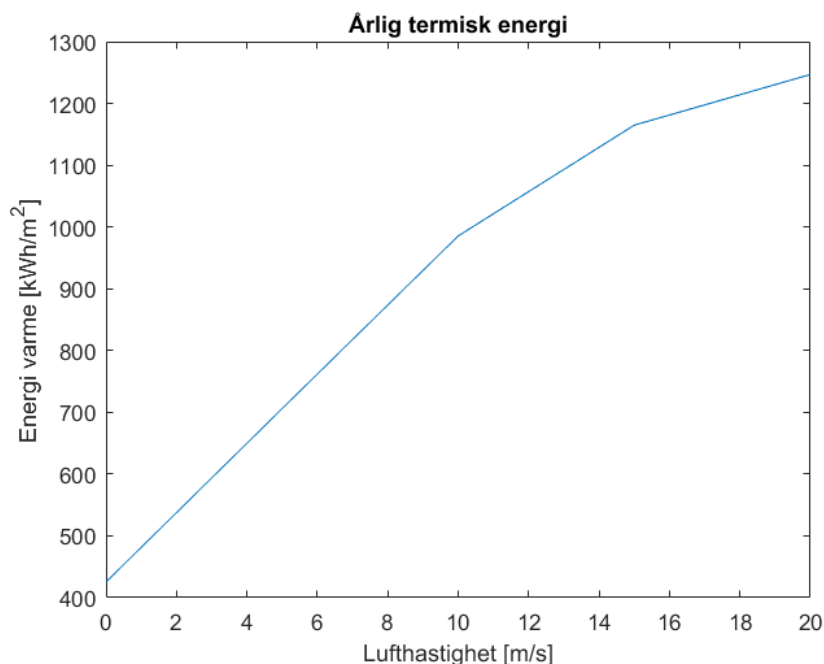
Figur 25: Energi for et solcellepanel i løpet av et år, i form av strøm i den øverste figuren og i form av termisk oppvarming av luft i den nederste figuren.

Energien i form av varme, nederst i figur 25, vil ha et toppunkt ved time 3000. Det er rundt mai måned og rundt tiden da oppvarmingsbehovet til bygg er over. Det er tilnærmet likt toppunkt ved time 2000. Dette er i slutten av februar og da er det oppvarmingsbehov for bygninger i nordisk klima. Ved å sammenligne den øverste og nederste grafen i 25 kan man se at det er muligheter for å kunne få utnytte den termiske energien fra et solcellepanel og at den vil kunne være vesentlig høyere enn den elektriske energien fra et solcellepanel. Det som er avgjørende er hvordan oppvarmingsbehovet til et bygg vil være i løpet av året og om energien lar seg utnytte.



Figur 26: Årlig elektrisk energiutnyttelse for solcellepanelet i forhold til lufthastighet på undersiden.

Det er ca 12% større elektrisk energiutnyttelse for et solcellepanel, med en økning på lufthastighet fra 0 til 20 m/s . Dette er en høy maksimal lufthastighet og ikke praktisk gjennomførbart. Men det ble gjort for å se hvordan den matematiske modellen reagerte. Det ble også gjort en beregning der man brukte vindhastighet fra klimadata på undersiden av solcellpanelet. Da ble den årlige energiutnyttelsen på $97.8kWh/m^2$ som tilsvarer en gjennomsnittshastighet på 3 til 4 m/s . Det gir en 2 til 3 % økning i utnyttet elektrisk energi for solcellepanelet i løpet av et år. Med en konstant hastighet på undersiden av panelet hele året på 5 m/s vil energiutnyttelsen for solcellepanelet øke med 4 til 5 %. Begge deler er lave nivåer, men med tanke på at solceller har så lave virkningsgrader kan det utgjøre en merkbar forskjell.



Figur 27: Årlig termisk energiutnyttelse for solcellepanelet i forhold til lufthastighet på undersiden.

Ser man på den termiske energiutnyttelsen ved 0 m/s er det litt over $400\text{ kW/m}^2\text{r}$. Dette kommer av den naturlige konveksjonen på undersiden som avgir varme. Ved $3\text{--}4\text{ m/s}$, som er det den gjennomsnittlige vindhastigheten fra klimadata, vil den termiske energiutnyttelsen være mellom 5 til $600\text{ kW/m}^2\text{r}$. Det er høyere enn den gjennomsnittlige energiutnyttelsen fra solfangeranlegg i (Lappegard 2014) og vil være urealistisk høyt. I beregningene i figur 27 ble det laget en rask test som ikke summerte opp den termiske energien om lufttemperaturen fra klimafilen var over $18\text{ }^\circ\text{C}$. Det ble valgt med tanke på at tilluftstemperaturen ofte blir satt rundt det nivået. Dette er et ugunstig settpunkt, og kan forklare den høye termiske energiutnyttelse.

Det ble derfor gjort en ny beregning der det termiske tapet på undersiden av solcellepanel ikke ble summert opp om lufttemperaturen var over $8\text{ }^\circ\text{C}$. Dette kan være et nivå på lufttemperaturen da det ikke er behov for oppvarming, eller at varmegjenvinner i ventilasjonsagregatet øker lufttemperaturen tilstrekkelig. Med denne metoden var den årlige termiske energiutnyttelsen for solcellepanelet 295.15 kWh/m^2 . Det er tre ganger så mye som den elektriske energiutnyttelsen til solcellepanelet.

Dette er et interessant resultat som viser at det kan være et mye større potensiale for å benytte solcellepanel i nordisk klima, da det kan produsere elektrisk strøm og å forvarme ventilasjonsluften til bygget.

På grunn av tidsnød ble det benyttet spesifikasjoner for solcellepanelet fra et eksempel i (Duffie og Beckmann 1991 s.777). Den boken er utgitt i 1991 og siden den tiden har solcellene blitt mer effektive. Dette ble gjort fordi det var mulig å kontrollere at beregningene ble riktig utført. En annen ulempe er at det ikke ble tid å finne riktig metode for å sette sammen flere solcellepanel og størrelsen på panelet som i beregningene er på 0.427 m^2

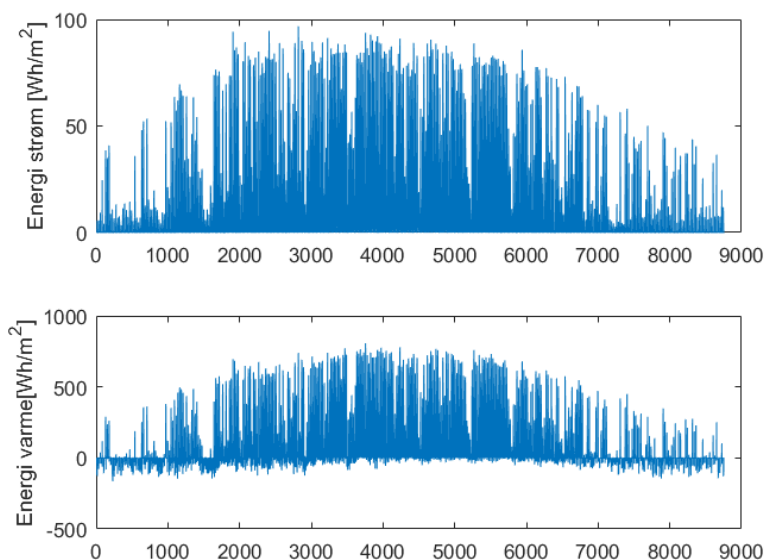
Tabell 5: Oppsummeringen av hovedresultatene

Solfanger	Solcellepanel	Solcellepanel(5m/s)	Solcellepanel(5m/s)
Årlig termisk kWh/m^2	Årlig elektrisk kWh/m^2	Årlig elektrisk kWh/m^2	Årlig termisk kWh/m^2
1006	95	101.1	295.15

Oppsumert viser resultatene at den årlige energiutnyttelsen for solcellepanelet, med kun er naturlig konveksjon på undersiden er $95 kWh/(m^2 \cdot r)$. Med vind fra klimadata på undersiden $97.85 kWh/(m^2 \cdot r)$ og med en hastighet på $5 m/s$ er $101.1 kWh/(m^2 \cdot r)$. Sammenlignet med (Norsk solenergiforening, 2018) og (Norges vassdrags- og energidirektorat, 2017) sine tall på $100-170 kWh/(m^2 \cdot r)$ og $140 kWh/(m^2 \cdot r)$ virker resultatene troverdige. Det er helt i det nedre sjiktet og det er logisk, når spesifikkasjonene til solcellepanelet er fra før 1991.

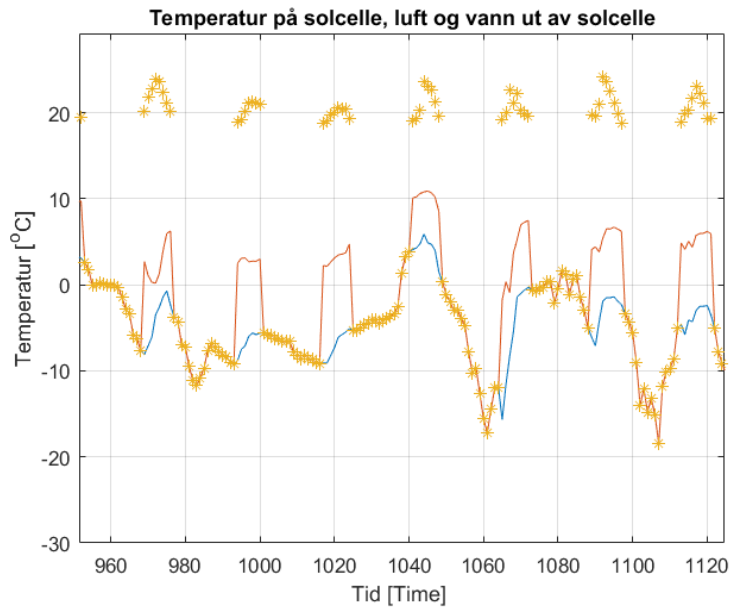
4.5 Solcellepanel med vannkjøling

Det ble forsøkt å slå sammen energimodellen for solcellepanelet og for solfangeren. For å forenkle beregningene og få modellene til å passe sammen, ble det kun sett på et solcellepanel og solfangeren har ingen akkumuleringstank. Det ble benyttet en enkel reguleringsfunksjon med en konstant massestrøm på 0.01 kg/s på vannet og en temperatur inn på $20 \text{ }^\circ\text{C}$, når det er sol.



Figur 28: Årlig energiutnyttelse i form av strøm i den øverste grafen og årlig energiutnyttelse i form av oppvarming av vann

Den årlige elektriske energiutnyttelsen for et solcellepanel kombinert med solfanger er på 110.6 kWh/m^2 . Det er en økning på 14 % i forhold til et solcellepanel med kun naturlig konveksjon på undersiden. Den er også en økning i maksimal effekt som man kan se i den øverste grafen i figur 28. I den nederste grafen ser man hvor mye varmeenergi som er mulig å utnytte i løpet av året. Siden det er en forenklet kontrollfunksjon, vil det være mange perioder når vannet blir nedkjølt og man taper energi til omgivelsene. Allikevel viser beregningene at den årsgjennomsnittlige termiske virkningsgraden vil være på 58% og den årlige energiproduksjonen vil være på 756 kWh/m^2 . En så høy termisk energiproduksjon er samsvarende med de beste solfangerne i (Lappégard, 2014) målte i løpet av et år. Det gjør at resultatene ikke er troverdige.



Figur 29: Temperatur på luft med blå farge, solcelle temepratur med oransj farge og vannet ut av solfanger som er representert med gule stjerner, i en periode på 200 timer i Februar

I figur 29 vil vanntemperaturen alltid kommer inn med $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ og det vil være perioder der man taper energi til omgivelsene. Det er også veldig stor forskjell på solcelletemperaturen i forhold til figur 21. Ser man på temperaturen til solcellepanelet som representeres med den røde grafe, ligger den mellom 0 og $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Den vil ikke overskride $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ og det forklarer økningen i strømproduksjon. Det gir ikke mening at celledtemperaturen er lavere enn vanntemperaturen, selv når vanntemperaturen øker. Det viser at det er en feil i den matematiske modellen og den høye termiske energiproduksjonen ikke stemmer

5 Konklusjon

Dette kapitlet er delt opp i solfanger, solcellepanelet og det vannkjølte solcellepanelet. Hovedresultatene blir oppsummert og problemstillingen "Hvordan påvirker lufttemperatur og klima, solcellepanel og solfangere for bygg?", blir besvart.

5.1 Konklusjon solfanger

Det vil ca være en 20 % større energiutnyttelse i året for en solfanger med to glass i stedet for ett. En helningsvinkel på 34 grader for solfangere gir høyest årlig energiutnyttelse. Problemer med for høy temperatur i tanken, gjør at solfangerarealet bør dimensjoneres etter akkumuleringsvolumet for anlegget. Dette er viktig for å oppnå størst mulig dekningsgrad av varmtvannsforbruket og passe på at temperaturnivået ikke blir for høyt.

Med en 390 liters tank og et solfangerareal på 4 m^2 viser beregningene at det er mulig å dekke 50% av et gjennomsnittlig energibehov til forbruksvann med solfangere. Dette stemmer godt meg tommelfingerregelen til (Andresen, 2008). Den årlige energiutnyttelsen er beregnet til gi 1006 kWh/m^2 , som ligger over det dobbelt av gjennomsnittet fra målinger til (Lappegard, 2014). Det kan delvis forklares med bruk av dobbelt glass. Det nordiske klimaet med kalde vintere, lite sol og varme somre med mye sol gjør det krevende å få dekket mer enn 50% av energibehovet til forbruksvann i bygg.

Med tanke på antall variabler i solfangermodellen, mulige utformingsløsninger for solfangeranlegg og sammenligningsgrunnlaget er ikke resultatene helt troverdige og må bli verifisert.

5.2 Konklusjon solcellepanel

For et solcellepanel med kun naturlig konveksjon på undersiden, vil den årlige energiutnyttelsen være 95 kWh/m^2 . På de varmeste dagene vil solcelletemperaturen nærme seg 80 $^{\circ}C$. Selv med lufttemperaturer under 0 $^{\circ}C$ om vinteren kan gjøre at temperaturen på solcellepanelet blir 40 $^{\circ}C$.

Ved å gjøre årsberegningen der vindhastigheten fra klimadata benyttes som tvungen konveksjon på undersiden av solcellepanelet, øker den årlige energiutnyttelsen til 97.85 kWh/m^2 .

Føres ventilasjonsluften med en hastighet 5 m/s under solcellepanelet, vil den årlige energiutnyttelsen øke til 101.1 kWh/m^2 . Den maksimale solcelle temperaturen synker da til litt over 60 $^{\circ}C$. Det vil kun gi en årlig økning på ca. 6 kWh/m^2 , ved å føre ventilasjonsluften under solcellepanelet. Den termiske energien man kan utnytte til oppvarming med å gjøre dette vil derimot være på 295.15 kWh/m^2 . Det er et betydelig energitilskudd som kan utnyttes for bygninger i nordisk klima med et oppvarmingsbehov. Det termiske energitilskuddet fra solcellepanel bør derfor bli tatt med i betraktning ved utforming av solcelleanlegg.

Resultatene for solcellepanelet er helt i nedre nivå med sammenligningsgrunnlaget. Det kan forklares med at spesifikasjonene som er benyttet er fra før 1991 og dagens solcellepanel er mere effektive. Det er få variable i beregningsmodellen til

solcellepanelet. Dette, sammen med sammenligningsgrunnlaget, gjør at resultatene er troverdige.

5.3 Konklusjon vannkjølt solcellepanel

Det er nødvendig med mer tid for å undersøke modellen og input variablene for at resultatene skal kunne være troverdige. Grunnlaget fra beregningene til solcellepanelet og solfangeren er troverdige så det vil trolig ikke være mye arbeid med å få ferdigstilt modellen for det vannkjølte solcellepanelet.

6 Videre arbeid

De matematiske modellene som er laget for solcellepanelet og solfangeren er prøvd å gjøre så sannsynlig som mulig, så det skal kunne representere virkelige forhold. Varmeovergangstallene beregnes etter hver time i forhold til temperatur og vindhastighet. Det er større risiko for feil når man prøver å gjøre modellen detaljert. Det trengs mer tid for å finpusse modellene og de må sammenlignes med målinger fra faktiske forhold for å kunne avgjøre hvor nøyaktige de er.

Det som er fordelen med å lage modellene selv, er at det er mulig å gjøre mange endringer og å se hvor energitapene er størst. En annen endring som kan gjøres, er å oppdatere programmet med energibalansen for vakuumrørsolfangere. Det lar seg greit gjøre, sidene varmetapstallene allerede er utviklet og kan finnes i litteraturen. Dette ble ettervært desverre nedprioritert, på grunn av mangel på tid i denne oppgaven

6.1 Videre arbeid solfanger

I beregningene er det ikke tatt hensyn til snø som dekker solfangerene, støv som påvirker de optiske egenskapene og regulering som tar ekstra hensyn til frostsikring. Den matematiske modellen må verifiseres med faktiske målinger for å kunne representere gode anslag for dimensjonering av solfangeranlegg. Det er en detaljert modell og vil rimelig enkelt kunne oppdateres for forskjellige systemløsninger. Varmtvannsforbruket kan byttes med energibehov til oppvarming eller de kan samkjøres. Den store fordelen vil nok være å kunne gjøre beregninger for større bygg med større solfangeranlegg. Behovet til forbruksvann kan byttes med oppvarmingsbehov, og det er mulig å få samkjørt med temperaturen utendørs.

6.2 Videre arbeid solcelle

Det ble dessverre ikke tid til å finne den beste metoden som fungerte for å gjøre en energibalanse av flere solcellepanel satt sammen. Det vil være mer realistisk i forhold til hvordan man utformer anlegg i praksis. Flere solcellepaneler satt sammen vil også gjøre at varmeoverføringstallene vil endre seg.

Det er flere måter å beregne hvordan temperatur påvirker egenskapene til solcellepanelet. Produsentene oppgir informasjon så man enklere kan beregne hva som skjer i forhold til solstråling og lufttemperatur. Dette er med konstant varmetapstall og vindhastighet. Selv om metoden i denne oppgaven er tidkrevende er mulighetene

for å endre design og forhold såpass stor at nye og spennende resultater kan undersøkes. Det krever imidlertid at spesifikasjonene til solcellepanelet oppdateres til dagens standard og at den matematiske modellen utvikles til å kunne beregne flere solcellpanel satt sammen til en større flate.

Det vil være letter å analysere resultatene ved å summere opp timesverdiene for hver måned, så man kan se hvordan forskjellene er måned for måned.

6.3 Videre arbeid solcelle med vannkjøling

Resultatene tyder på at det er feil med modellen og at det kan være urealistiske input-variabler. Det er nødvendig med mer tid for å jobbe med den matematiske modellen og det vil også være nødvendig å sammenligne med målinger for å kunne forsikre seg om at beregningene er samstemte med faktiske forhold.

7 Kilder

Andresen, I.(2008) *Planlegging av solvarmeanlegg for lavenergiboliger og passivhus. En introduksjon* SINTEF Byggforsk, Prosjektrapport 22.

Bisen, A. Jain, R. & Dass, P.P. (2011) *Parametric studies of top heat loss coefficient of double glazed flat plate solar collectors* MIT International Journal of Mechanical Engineering Vol. 1 No. 2 pp 71-78

Bøeng, A. C. (2014) *Energibruk i husholdningene 2012* Samfunnspeilet 4/2014. Statistisk sentralbyrå.

Cengel, Y. A. & Ghajar, A. J. (2011). *Heat and mass transfer*. New York:McGraw-Hill

Cianfrinia, C. M. Corcione, A. D’Oraziob, A. & Habiba, E. (2008)*LAMINAR NATURAL CONVECTION HEAT TRANSFER FROM VERTICAL AND INCLINED PLATES FACING UPWARDS AND DOWNWARDS* 6th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics

Dokka, T. H. Hauge, G. Marit, T. Klinski, M. & Kirkhus, A. (2009)*Energieffektivisering i bygninger – mye miljø for pengene!*SINTEF Byggforsk https://www.sintef.no/globalassets/prrapp-40_sammendrag.pdf

Duffie, J. A. & Beckman, W. A. (1991) *Solar Engineering of thermal processes* (Andre utgave) John Wiley and Sons, Inc.

IPCC, 2014: Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Jakobsen, I. U. (2017). Parisavtalen. I Store norske leksikon. Hentet 6. januar 2018 fra <https://snl.no/Parisavtalen>

Kharseh, M.(Lest 05.11.2017). *Energy balance of Solar collector* Luleå university of technology.

Klima- og miljødepartementet.(2017)*Forslag til klimalov* Hentet fra: <https://www.regjeringen.no/pa-horing2/id2512646/>

Lappegard, H. Å. Sørnes, K. Godbolt, L. Å. Kristjansdottir, T. Lekang, S. Å. & Fredrikse, E. (2014) *Suksessfaktorer for økt bruk av solvarme* SINTEF akademisk forlag. Notat 10.

Messenger, R. A. & Ventre, J. (2010). *Photovoltaic System Engineering*(Tredje utgave) [Boca Raton] CRC Press: Taylor and Francis Group

Norges vassdrags- og energidirektorat (08.05.2017) Solenergi. Hentet fra <https://www.nve.no/energi-og-konsesjon/solenergi>

Norsk solenergiforening (2018,5.Januar) Solceller. Hentet fra <https://www.solenergi.no/solstrm/>

Paradis, P.L. Rousse, D.R. Lamarche, L. & Nesreddine, H. (2017) *A 2-D transient numerical heat transfer modell of the solar absorberplate to omprove PV/T solar collector systems* Solar Energy 153 366-378

PVPerformance modeling collaborative. lest (12.12.2017) Hentet fra: <https://pvpmc.sandia.gov/msteps/1-weather-design-inputs/plane-of-array-poa-irradiance/calculating-poa-irradiance/poa-sky-diffuse/perez-sky-diffuse-model/>

Statistisk sentralbyrå. (2016) *Statistikkbanken kildetabell 10842* rettet 4. november 2016. Hentet fra: <https://www.ssb.no/283380/andelen-fornybar-energi-for-norge.arligetall>

Stine, W.B. & Harrigan, R.W. (1986)(Lest 8.09.2017). *Power From The Sun* <http://powerfromthesun.net/index.html>

Thyholt, M. & Dokka, T. H. (2003) *Nye forskriftskrav til bygninger energibehov* SINTEF Bygg og miljø, Arkitektur og byggeteknikk. Rapportnr, STF A03524.

World Energy Council. (2016) *World Energy Resources Solar* hentet fra :https://www.worldenergycontent/uploads/2017/03/WEResources_Solar_2016.pdf

A Matlapscript solfanger


```

%Klimadata-----
Fornebu=xlsread('Komplett_KlimadataNS3031_2014_Fornebu.xlsx','Komplett_klimadata_Ns3031
_Forne');
T_K=273.15;
Solkonstant=1367;
g=9.81;


```

```

A_tank_topp=pi.*r_tank_ytre.^2;
A_tank_inni=pi.*r_tank.^2;

E_year=35.*200./365;
%      1 2 3 4 5 6 7 8 9 101112131415161718192021222324
LOAD=[0 0 0 0 0 0 1 5 2 1 1 0 0 0 1 1 2 4 1 0 0 1 0 0].*1000; %timesverdier for
effektbehov load Wh
T_t1_s=19+T_K; %temperatur i toppen av tanken
T_t2_s=18+T_K; %Temperatur i midten av tanken
T_t3_s=17+T_K; %Temperatur i bunn av tanken=T_fo
%-----verdier jeg vil hente ut-----
TIME=[ ];
Temp_a=[ ];
Temp_pm=[ ];
Temp_g1=[ ];
Temp_g2=[ ];

E_sol=[ ];
E_tap_topp=[ ];
E_nyttig=[ ];
E_nyttig_f=[ ];

R_Topp=[ ];
R_Topp_pg1=[ ];
R_Topp_glg2=[ ];
R_Topp_g2a=[ ];

T1=[ ];
T2=[ ];
T3=[ ];
TFO=[ ];
Qell=[ ];
Qtapt=[ ];
Qdump=[ ];
Qbrukt=[ ];
neffe=[ ];
TIMELOAD=[ ];
%finne bugs
Nuforcedg2a=[ ];
Nuglg2=[ ];
Nunatg2a=[ ];
Nupg1=[ ];
Nutotg2a=[ ];
III=[ ];
QLOAD=[ ];
QLOSSTANK=[ ];

for i=1:length(Fornebu);
    Dag=[Fornebu(i,1)];
    Time=Fornebu(i,2);
    Tid_s=Fornebu(i,3);
    T_a=Fornebu(i,4)+T_K;
    T_sky=0.0552.*T_a.^(1.5);
    RH=Fornebu(i,5);
    v_wind=Fornebu(i,6);
    Vind_retning=Fornebu(i,7);
    DNI=Fornebu(i,8); %Direkte Normal irradiation (Tracking)
    DHI=Fornebu(i,9); %Diffuse horisontal radiation
    T_fi=T_t3_s; %Temperaturen på fluidet inn i røret
    %-----beregne solas posisjon for denne timen på
    %denne dagen
    Rho=asind(0.39795.*cosd(0.98563.*(Dag-173)));
%declination Angle, Power from the sun

```

```

    Rho_test=23.45.*sind(360.*(284+Dag)./365); %Solar
engineering and thermal processing
    Omega=15.*(Tid_s-12);
    alpha=asind(sind(Rho).*sind(Phi)+cosd(Rho).*cosd(Omega).*cosd(Phi)); %Solar
altitudeangle
    A_merket=asind(-cosd(Rho).*sind(Omega)/cosd(alpha)); %solar
azimuth angle
    if cosd(Omega)>=tand(Rho)/tand(Phi)
        A=180-A_merket;
    else
        A=360+A_merket;
    end
    Theta_i_Aalpha=acosd(sind(alpha).*cosd(Beta)+cosd(alpha).*sind(Beta).*cosd(Gamma-
A));

Theta_i=acosd(cosd(Beta).*sind(Rho).*sind(Phi)+cosd(Beta).*cosd(Rho).*cosd(Phi).*cosd(O
mega)-
sind(Beta).*cosd(Rho).*sind(Omega).*sind(Gamma)+sind(Beta).*sind(Rho).*cosd(Phi).*cosd(G
amma)-sind(Beta).*cosd(Rho).*sind(Phi).*cosd(Omega).*cosd(Gamma));
    I_direkte=DNI.*cosd(Theta_i); %direkte solstråling
    Theta_z=90-alpha; %solar Zenith angle
    Omega_ss=acosd(-tand(Rho).*tand(Phi)); %vinkel for solnedgang
    Omega_sr=Omega_ss.*-1; %vinkel for soloppgang
    Tid_sr=Omega_sr./15+12; %tidspunkt for soloppganggang
    Tid_ss=Omega_ss./15+12; %tidspunkt for solnedganh
    Hoursofdayligh=2*Omega_ss./15;
    A_ss=asind(-cos(Rho).*sind(Omega_ss)); %sunset azimuthangle
    alpha_max=90-abs(Phi-Rho); %max noontime solar altitude
    alpha_min=90-abs(Phi+Rho); %min noontime solar altitude

%-----Diffuse stråling, Perez-----
%https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/1-weather-design-inputs/plane-of-array-
poa-irradiance/calculating-poa-irradiance/poa-sky-diffuse/perez-sky-diffuse-model/
    E_a=Solkonstant.*(1+0.034.*cosd(360.*Dag/365.25)); %Extraterrestrial radiation
    k_diff=5.535e-6;
    epsilon_diff=((DHI+DNI)/DHI+k_diff.*Theta_z.^3)/(1+k_diff.*Theta_z.^3);
    if 10<=epsilon_diff<1.065
        f_11=-0.008;
        f_12=0.588;
        f_13=-0.062;
        f_21=-0.06;
        f_22=0.072;
        f_23=-0.022;
    elseif 1.065<=epsilon_diff<1.23
        f_11=0.13;
        f_12=0.683;
        f_13=-0.151;
        f_21=-0.019;
        f_22=0.066;
        f_23=-0.029;
    elseif 1.230<=epsilon_diff<1.5
        f_11=0.33;
        f_12=0.487;
        f_13=-0.221;
        f_21=0.055;
        f_22=-0.064;
        f_23=-0.026;
    elseif 1.5<=epsilon_diff<1.95
        f_11=0.568;
        f_12=0.187;
        f_13=-0.295;
        f_21=0.109;
        f_22=-0.152;

```

```

    f_23=-0.014;
elseif 1.95<=epsilon_diff<2.8
    f_11=0.873;
    f_12=-0.392;
    f_13=-0.362;
    f_21=0.226;
    f_22=-0.462;
    f_23=0.001;
elseif 2.8<=epsilon_diff<4.5
    f_11=1.132;
    f_12=-1.237;
    f_13=-0.412;
    f_21=0.288;
    f_22=-0.823;
    f_23=0.056;
elseif 4.5<=epsilon_diff<6.2
    f_11=1.06;
    f_12=-1.6;
    f_13=-0.359 ;
    f_21=0.264;
    f_22=-1.127 ;
    f_23=0.131;
elseif 6.2<=epsilon_diff
    f_11=0.678;
    f_12=-0.327;
    f_13=-0.25;
    f_21=0.156;
    f_22=-1.377;
    f_23=0.251;
end
AM_a=1./ (cosd(Theta_z)+0.50572.*abs(96.07995-Theta_z)^(-1.6364)); %power from the
sun [Kasten ang Young 1989] %absolute airmass
delta_diff=DHI.*AM_a./E_a;
F_1=max(0, (f_11+f_12.*delta_diff+pi.*Theta_z./180.*f_13));
F_2=f_21+f_22.*delta_diff+pi.*Theta_z./180.*f_23;
epsilon_diff=((DHI+DNI)/DHI+k_diff.*Theta_z.^3)./(1+k_diff.*Theta_z.^3);
a_diff=max(0,cosd(Theta_i));
b_diff=max(cosd(85),cosd(Theta_z));
I_diff=DHI.*((1-F_1).*(1+cosd(Beta)/2))+F_1.*(a_diff/b_diff)+F_2.*sind(Beta));
%diffuse stråling mot en vinklet flate Perez
%-----Nyttig solenergi som når kollektor-----
I_total_horis=sind(alpha).*DNI+DHI; %total horisontal stråling med diffuse og
direkte
I_total=DNI.*cosd(Theta_i)+I_diff.*((1+cosd(Beta))/2)+rho_reflectanse.*
I_total_horis.*(1-cosd(Beta))/2);
S=TAU_ALPHA.*I_total; %S er W solenergi som når en flate
%-----Stasjonær varmetransport-----
R_b=1./ (Lambda_b/Thickness_b); %Uverdi for baksiden av plate
R_s=1./ (2.*L_3.*(L_1+L_2)./(L_1.*L_2).*Lambda_s/Thickness_s);
%-----logisk test for når man skal droppe beregningene siden solen er borte-
-----
if S<=0%I_total<200 %DNI<=0 & DHI<=0
    Q_u_i=0;
    T_pm=T_a;
    T_g1=T_a;
    T_g2=T_a;
    Q_top=0;
    Q_u_i=0;
    Q_u_f=0;
    R_topp=0;
    R_topp_pg1=0;
    R_topp_glg2=0;
    R_topp_g2a=0;

```

```

T_fo=T_a;
Nu_forced_g2a=0;
Nu_g1g2=0;
Nu_nat_g2a=0;
Nu_pg1=0;
Nu_tot_g2a=0;
Q_brukt=0;
Q_ell=0;
Q_dump=0;
n_eff=0;
elseif S>0
    U_l_tippet=0.5;
    Iter=0;
    Feil=100;
    T_fo_t=T_fi+10;
    T_g1_t=T_fo_t+10.*2/3;
    T_g2_t=T_fo_t+10.*1./3;
    while Feil>1e-3
        U_l=U_l_tippet;
        T_fo=T_fo_t;
        T_g1=T_g1_t;
        T_g2=T_g2_t;
        Iter=Iter+1;
        %-----konvektion in tube-----
        %-----Prantlnummer-----
        T_avg_f=(T_fo+T_fi)/2;
        if T_K<T_avg_f & T_avg_f<(T_K+5)
            Pr_f=-0.8617234469.*T_avg_f+250.8883767535;
        elseif (T_K+5)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+10)
            Pr_f=-0.35.*T_avg_f+108.5525;
        elseif (T_K+10)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+15)
            Pr_f=-0.272.*T_avg_f+86.4668;
        elseif (T_K+15)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+20)
            Pr_f=-0.216.*T_avg_f+70.3304;
        elseif (T_K+20)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+25)
            Pr_f=-0.174.*T_avg_f+58.0181;
        elseif (T_K+25)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+30)
            Pr_f=-0.144.*T_avg_f+49.0736;
        elseif (T_K+30)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+35)
            Pr_f=-0.118.*T_avg_f+41.1917;
        elseif (T_K+35)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+40)
            Pr_f=-0.102.*T_avg_f+36.2613;
        elseif (T_K+40)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+45)
            Pr_f=-0.082.*T_avg_f+29.9983;
        elseif (T_K+45)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+50)
            Pr_f=-0.072.*T_avg_f+26.8168;
        elseif (T_K+50)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+55)
            Pr_f=-0.06.*T_avg_f+22.939;
        elseif (T_K+55)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+60)
            Pr_f=-0.052.*T_avg_f+20.3138;
        elseif (T_K+60)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+65)
            Pr_f=-0.048.*T_avg_f+18.9812;
        elseif (T_K+65)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+70)
            Pr_f=-0.04.*T_avg_f+16.276;
        elseif (T_K+70)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+75)
            Pr_f=-0.034.*T_avg_f+14.2171;
        elseif (T_K+75)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+80)
            Pr_f=-0.032.*T_avg_f+13.5208;
        elseif (T_K+80)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+85)
            Pr_f=-0.028.*T_avg_f+12.1082;
        elseif (T_K+85)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+90)
            Pr_f=-0.024.*T_avg_f+10.6756;
        elseif (T_K+90)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+95)

```

```

Pr_f=-0.022.*T_avg_f+9.9493;
elseif (T_K+95)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+100)
Pr_f=-0.02.*T_avg_f+9.213;
elseif (T_K+100)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+105)
Pr_f=-0.034.*T_avg_f+14.4371;
else
Pr_f=1.15;
end
%Pr_f_beregnet=vu_f.*cp_f.*rho_f/(k_f);
%-----Dynamisk viskositet-Vann-----
if T_K<T_avg_f & T_avg_f<(T_K+5)
Mu_f=-4.20842e-05.*T_avg_f+0.013224711;
elseif (T_K+5)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+10)
Mu_f=-0.0000424.*T_avg_f+0.01331256;
elseif (T_K+10)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+15)
Mu_f=-0.0000338.*T_avg_f+0.01087747;
elseif (T_K+15)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+20)
Mu_f=-0.0000272.*T_avg_f+0.00897568;
elseif (T_K+20)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+25)
Mu_f=-0.0000222.*T_avg_f+0.00750993;
elseif (T_K+25)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+30)
Mu_f=-0.0000186.*T_avg_f+0.00643659;
elseif (T_K+30)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+35)
Mu_f=-0.0000156.*T_avg_f+0.00552714;
elseif (T_K+35)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+40)
Mu_f=-0.0000134.*T_avg_f+0.00484921;
elseif (T_K+40)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+45)
Mu_f=-0.0000114.*T_avg_f+0.00422291;
elseif (T_K+45)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+50)
Mu_f=-9.8e-06.*T_avg_f+0.00371387;
elseif (T_K+50)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+55)
Mu_f=-8.6e-06.*T_avg_f+0.00332609;
elseif (T_K+55)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+60)
Mu_f=-0.0000074.*T_avg_f+0.00293231;
elseif (T_K+60)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+65)
Mu_f=-0.0000068.*T_avg_f+0.00273242;
elseif (T_K+65)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+70)
Mu_f=-0.0000058.*T_avg_f+0.00239427;
elseif (T_K+70)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+75)
Mu_f=-0.0000052.*T_avg_f+0.00218838;
elseif (T_K+75)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+80)
Mu_f=-4.6e-06.*T_avg_f+0.00197949;
elseif (T_K+80)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+85)
Mu_f=-4.4e-06.*T_avg_f+0.00190886;
elseif (T_K+85)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+90)
Mu_f=-0.0000036.*T_avg_f+0.00162234;
elseif (T_K+90)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+95)
Mu_f=-0.0000036.*T_avg_f+0.00162234;
elseif (T_K+95)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+100)
Mu_f=-3e-06.*T_avg_f+0.00140145;
elseif (T_K+100)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+105)
Mu_f=-5.4e-06.*T_avg_f+0.00229701;
else
Mu_f=0.000003;
end

%-----Tetthet vann-----
rho_f=4e-06.*T_avg_f.^3-0.007.*T_avg_f.^2+2.8474.*T_avg_f+664.6;
%-----Konduktivitet vann-----
k_f=-6e-09.*T_avg_f.^3-3e-06.*T_avg_f.^2+0.005.*T_avg_f-0.4695;
%-----Spesifikk varmekapasitet vann-----
cp_f=0.0138.*T_avg_f.^2-8.8387.*T_avg_f+5595.6;
%-----beregning-----

```

```

Re_f=4.*m_f./(Mu_f.*pi.*D_i);%rho_f.*D_i/Mu_f.;
if Re_f<2300
    Nu_f=4.36;
else
f_f=(0.790.*log(Re_f)-1.64).^(-2);
Nu_f=f_f/8.*(Re_f-1000).*Pr_f/(1+12.7.*(f_f/8).^0.5.*(Pr_f^(2/3)-1));
end
h_c_f=k_f.*Nu_f/D_i; %Varmetapstallet til fluidet i røret a_f=205;
%-----finned and convection to tube-----

m=(U_l/(lambda_p.*Thickness_p)).^0.5;
F=tanh(m.*(W-D_o)/2)/(m.*(W-D_o)/2); %standard fin eff tangens
hyperbolicus radianer, gjør om til grader
F_mrk=1/(W.*U_l.*(1/(U_l.*(F.*(W-D_o)+D_o))+1/(pi.*D_i.*h_c_f)));
F_r=m_f.*cp_f/(U_l.*A_p).*(1-exp(-F_mrk.*U_l.*A_p/(m_f.*cp_f)));
T_fo=(T_fi-T_a-S/U_l).*exp(-U_l.*A_t.*F_mrk/(m_f.*cp_f))+T_a+S/U_l;

Q_u_i=A_p.*F_r.*(S-U_l.*(T_fi-T_a));
Q_u_f=m_f.*cp_f.*(T_fo-T_fi);

T_pm=(Q_u_i/A_p-S)/(-U_l)+T_a;
%-----Varmetap topp av fanger-----
%-----mellom plate og glass 1-----
%-----conv p-g1-----

T_avg_pg1=(T_pm+T_g1)./2;
k_air_pg1=0.0002067.*T_avg_pg1^(0.85); %konduktivitet luft mellom
plate og glass 1
Pr_air_pg1=1.057-0.06.*log(T_avg_pg1);
Vu_air_pg1=(9.*10^(-5)).*T_avg_pg1.^2+0.04.*T_avg_pg1-4.17).*10.^(-6);
Ra_pg1=g.*abs(T_pm-T_g1).*L_pg1.^3.*Pr_air_pg1./(Vu_air_pg1.^2.*T_avg_pg1);
H_pg1=L_1./L_pg1; %vertikal lengde delt på avstand mellom plate
og glass
AAA=(1-1708./(Ra_pg1.*cosd(Beta)));
if AAA<0
    AAA=0;
end
BBB=(Ra_pg1.*cosd(Beta)).^(1./3)./18-1;
if BBB<0
    BBB=0;
end
if Ra_pg1.*cosd(Beta)<=1780;
    Nu_pg1=1;
else
    Nu_pg1=1+1.44.*AAA.*(1-
1708.*sind(1.8.*Beta).^(1.6)./(Ra_pg1.*cosd(Beta)))+BBB;
end
h_c_pg1=k_air_pg1.*Nu_pg1./L_pg1;
R_c_pg1=1./h_c_pg1;

%-----rad-plate og glass 1-----
-----

h_r_pg1=sigma./(1./epsilon_g1+1./epsilon_p-
1).*(T_pm.^2+T_g1.^2).*(T_pm+T_g1);
R_r_pg1=1./h_r_pg1;
R_toppg1=1./(1./R_r_pg1+1./R_c_pg1);
%-----mellom glass 1 og glass 2-----
%-----conv 1-2-----

T_avg_g1g2=(T_g1+T_g2)./2;

```

```

k_air_g1g2=0.0002067.*T_avg_g1g2.^(0.85);
Pr_air_g1g2=1.057-0.06.*log(T_avg_g1g2);
Vu_air_g1g2=(9.*10^(-5).*T_avg_g1g2.^2+0.04.*T_avg_g1g2-4.17).*10.^(-6);
Ra_g1g2=g.*abs(T_g1-
T_g2).*L_g1g2.^3.*Pr_air_g1g2./(Vu_air_g1g2.^2.*T_avg_g1g2);
H_pg2=L_1./L_g1g2; %vertikal lengde delt på avstand mellom plate
og glass
AAA_g1g2=1.44.*(1-1708./(Ra_g1g2.*cosd(Beta)));
if AAA_g1g2<0
AAA_g1g2=0;
end
BBB_g1g2_s=(Ra_g1g2.*cosd(Beta)).^(1./3)./18-1;
if BBB_g1g2_s<0
BBB_g1g2_s=0;
end
if Ra_g1g2.*cosd(Beta)<=1780;
Nu_g1g2=1;
else
Nu_g1g2=1+AAA_g1g2.*(1-
1708.*sind(1.8.*Beta).^(1.6)./(Ra_g1g2.*cosd(Beta)))+BBB_g1g2_s;
end
h_c_g1g2=k_air_g1g2.*Nu_g1g2./L_g1g2;
R_c_g1g2=1./h_c_g1g2;

%-----rad-1-2-----

h_r_g1g2=sigma./(2./epsilon_g1).*(T_g1.^2+T_g2.^2).*(T_g1+T_g2);
R_r_g1g2=1./h_r_g1g2;
R_topp_g1g2=1./(1./R_c_g1g2+1./R_r_g1g2);
%-----konvektivt glass2 air-----
T_avg_g2a=(T_a+T_g2)./2;

k_g2a=0.0002067.*T_avg_g2a.^(0.85);
Vu_g2a=(9.*10^(-5).*T_avg_g2a.^2+0.04.*T_avg_g2a-4.17).*10.^(-6);
Pr_g2a=1.057-0.06.*log(T_avg_g2a);

Re_g2a=v_wind./Vu_g2a.*L_2;
L_cr=5.*10^5.*Vu_g2a./v_wind;
Re_cr_g2a=v_wind.*L_cr./Vu_g2a;
if Re_g2a<5.*10^5 & L_cr>L_2
Nu_forced_g2a=0.664.*Re_g2a.^(0.5).*Pr_g2a.^(1/3);
elseif Re_g2a>5.*10^5 & L_cr./L_2<0.1
Nu_forced_g2a=0.037.*Re_g2a.^(0.8).*Pr_g2a.^(1/3);
elseif Re_g2a>=5.*10^5
Nu_forced_g2a=(0.037.*Re_g2a.^(0.8)-871).*Pr_g2a.^(1/3);
end
%-----Naturllig-konveksjon.ovenpå
Ra_nat_g2a=g.*abs(T_g2-T_a).*L_2.^3.*Pr_g2a./(Vu_g2a.^2.*T_avg_g2a);

Nu_nat_g2a=1+0.635./(1+(0.618./Pr_g2a).^(9./16)).^(9./25).*(Ra_nat_g2a.*cosd(90-
Beta)).^(0.25);

Nu_tot_g2a=(Nu_forced_g2a.^(1./90.*Beta+3)+Nu_nat_g2a.^(1./90.*Beta+3)).^(1/(1./90.*Bet
a+3));

h_c_g2a=Nu_tot_g2a.*k_g2a./L_2;
R_c_g2a=1./h_c_g2a;
%-----rad glass 2 til air-----
h_r_g2a=sigma.*epsilon_g1*(T_g2.^2+T_a.^2).*(T_g2+T_a);
R_r_g2a=1./h_r_g2a;
R_topp_g2a=1./(1./R_c_g2a+1./R_r_g2a);
%-----totaltopp-----

```



```

R_topp=R_topp_pg1+R_topp_glg2+R_topp_g2a+Ty_glass1./k_glass+Ty_glass2./k_glass;

Q_top=A_p.*(T_pm-T_g2)./R_topp;
T_g1=T_pm-Q_top./(A_p./(R_topp_pg1+Ty_glass1./k_glass));
T_g2=T_pm-Q_top./(A_p./(R_topp_pg1+R_topp_glg2+Ty_glass2./k_glass));
%-----Tap fra absorber---t=top,b=back,s=side)-----

R_topp_total=A_p.*(T_pm-T_a)./Q_top;
U_l_test=1./(R_topp_total./A_p+R_b./A_p+R_s);
Feil=abs(U_l-U_l_test);
U_l_tippet=U_l_test;
T_fo_t=T_fo;
T_g1_t=T_g1;
T_g2_t=T_g2;
end
end
%-----bestemme hvor i tanken det varme vannet legger seg;
cp_water=4200;
cp_fo1=4200;
cp_21=4200;
cp_t1=4200;
cp_fo2=4200;
cp_fo=4200;
cp_23=4200;
cp_li3=4200;
cp_lilo=4200;
cp_lil=4200;

cp_t1=4200;
cp_t2=4200;
cp_t3=4200;
TimeLoad=LOAD(Tid_s);
%Logisk test for å ettervarme forbruksvann over til over 65 grader.
if T_t1_s<(65+T_K)
    T_t1_sf=(65+T_K);
    m_l=TimeLoad./(cp_lilo.*(37-7)).*cp_lilo.*(T_lo-T_li)./(cp_lil.*(T_t1_sf-
T_li));
    Q_ell=m_l.*cp_t1.*(T_t1_sf-T_t1_s);
else
    T_t1_sf=T_t1_s;
    m_l=TimeLoad./(cp_lilo.*(37-7)).*cp_lilo.*(T_lo-T_li)./(cp_lil.*(T_t1_sf-
T_li));
    Q_ell=0;
end
qLOAD=m_l.*cp_t1.*(T_t1_sf-T_li);
% Logisk styring hvor vannet fra kollektor inn i tanken samler seg
if T_fo>T_t1_s & T_t1_s<(95+T_K)
    F_c1=1;
    F_c2=0;
    F_c3=0;
    F_tap=0;
    F_dump=0;
elseif T_fo>T_t2_s & T_fo<=T_t1_s
    F_c1=0;
    F_c2=1;
    F_c3=0;
    F_tap=0;
    F_dump=0;
elseif T_fo<=T_t2_s & T_fo>T_t3_s
    F_c1=0;
    F_c2=0;
    F_c3=1;

```

```

    F_tap=0;
    F_dump=0;
elseif T_fo<=T_t3_s
    F_c1=0;
    F_c2=0;
    F_c3=0;
    F_tap=1;
    F_dump=0;
elseif T_fo>T_t1_s & T_t1_s>(90+T_K) & T_t2_s<(65+T_K)
    F_c1=0;
    F_c2=1;
    F_c3=0;
    F_tap=0;
    F_dump=0;
elseif T_fo>T_t1_s & T_t1_s>(90+T_K) & T_t2_s>(90+T_K) & T_t3_s<(65+T_K)
    F_c1=0;
    F_c2=0;
    F_c3=1;
    F_tap=0;
    F_dump=0;
elseif T_fo>T_t1_s & T_t1_s>(95+T_K) % & T_t2_s>(90+T_K) % & T_t3_s>(90+T_K)
    F_c1=0;
    F_c2=0;
    F_c3=0;
    F_tap=0;
    F_dump=1;
end
if (T_fo-T_fi)<=0
    Q_tapt=0;
    Q_u_i=0;
    Q_u_f=0;
else
    Q_tapt=F_tap.*m_f.*cp_t1.*(T_fo-T_fi);
end
m_d=m_f; %massestrøm på vannet som dumpes når tank blir for varm
Q_dump=F_dump.*m_f.*cp_water.*(T_fo-T_fi);
k_tank_w=0.635;

UA_tank=2.*pi.*lambda_t.*h_tank./(log(r_tank_ytre./r_tank));
UA_tank_topp=A_tank_topp.*lambda_t./tykkelse_tank;
Q_loss1=(UA_tank+UA_tank_topp).*(T_t1_s-T_ai);
Q_loss2=UA_tank.*(T_t2_s-T_ai);
Q_loss3=(UA_tank+UA_tank_topp).*(T_t3_s-T_ai);
Q_losstank=Q_loss1+Q_loss2+Q_loss3;
%energibalans node
T_t1=T_t1_s+(F_c1.*m_f.*cp_fo1.*(T_fo-T_t1_s)+m_l.*cp_21.*(T_t2_s-T_t1_s)-Q_loss1-
k_tank_w.*pi.*r_tank.^2.*(T_t1_s-T_t2_s)./(h_tank./3)).*3600./(cp_t1.*m_node);
T_t2=T_t2_s+(F_c2.*m_f.*cp_fo2.*(T_fo-T_t2_s)+F_c1.*m_f.*cp_21.*(T_t1_s-
T_t2_s)+m_l.*cp_23*(T_t3_s-T_t2_s)-Q_loss2-k_tank_w.*pi.*r_tank.^2.*(T_t2_s-
T_t3_s)./(h_tank./3)+k_tank_w.*pi.*r_tank.^2.*(T_t1_s-
T_t2_s)./(h_tank./3)).*3600./(cp_t2.*m_node);
T_t3=T_t3_s+(m_f.*cp_fo2.*((F_c3.*T_fo+(F_c1+F_c2).*T_t3_s)-
(F_c1+F_c2+F_c3).*T_t3_s)+m_l.*cp_li3.*(T_li-T_t3_s)-
Q_loss3+k_tank_w.*pi.*r_tank.^2.*(T_t2_s-T_t3_s)./(h_tank./3)).*3600./(cp_t3.*m_node);
Q Brukt=Q_u_f-Q_tapt-Q_dump;

%Logisk test for å forsikre at t2 ikke blir høyere enn t3 og 2
T_t1_s=max([T_t1 T_t2 T_t3]);
T_t2_s=median([T_t1 T_t2 T_t3]);
T_t3_s=min([T_t1 T_t2 T_t3]);
n_efe=Q Brukt./abs(I_total.*A_p);

```

```

%-----output-----
T1=[T1 T_t1_s-T_K ];
T2=[T2 T_t2_s-T_K ];
T3=[T3 T_t3_s-T_K ];
TFO=[TFO T_fo-T_K ];
Qe11=[Qe11 Q_e11./1000 ];
Qtapt=[Qtapt Q_tapt./1000 ];
Qdump=[Qdump Q_dump./1000];
Qbrukt=[Qbrukt Q_brukt./1000 ];

neffe=[neffe n_effe ];
TIMELOAD=[TIMELOAD TimeLoad ];

TIME=[TIME i ];
Temp_a=[Temp_a T_a-T_K ];
Temp_pm=[Temp_pm T_pm-T_K ];
Temp_g1=[Temp_g1 T_g1-T_K ];
Temp_g2=[Temp_g2 T_g2-T_K];

E_sol=[E_sol I_total.*A_p];
E_tap_topp=[E_tap_topp Q_top];
E_nyttig=[E_nyttig Q_u_i];
E_nyttig_f=[E_nyttig_f Q_u_f];

R_Topp=[R_Topp R_topp];
R_Topp_pg1=[R_Topp_pg1 R_topp_pg1];
R_Topp_g1g2=[R_Topp_g1g2 R_topp_g1g2];
R_Topp_g2a=[R_Topp_g2a R_topp_g2a];

%finne bugs
Nuforcedg2a=[Nuforcedg2a Nu_forced_g2a ];
Nug1g2=[Nug1g2 Nu_g1g2 ];
Nunatg2a=[Nunatg2a Nu_nat_g2a ];
Nupg1=[Nupg1 Nu_pg1 ];
Nutotg2a=[Nutotg2a Nu_tot_g2a ];
EE=[TIME; E_sol; Temp_a; Temp_g2; Temp_g1; Temp_pm; TFO; T1; T2; T3; E_nyttig_f;
TIMELOAD; neffe; ]';
%EEE=[TIME;Temp_a; Nuforcedg2a; Nutotg2a; Nunatg2a; Temp_g2; Nug1g2;
Temp_g1; Nupg1; Temp_pm; TFO;]'; Qtapt; Q_dump; Qe11; Qbrukt;
III=[III I_total.*A_p./1000];
QLOAD=[QLOAD qLOAD ];
QLOSSTANK=[QLOSSTANK Q_losstank ];
end
SUMQe11=sum(Qe11)
% SUMQtapt=sum(Qtapt)
SUMQdump=sum(Qdump)
SUMQbrukt=sum(Qbrukt)

sumIII=sum(III);
nnn=SUMQbrukt./sumIII;
sumQLOAD=sum(QLOAD)./1000;
sumQLOSSTANK=sum(QLOSSTANK)./1000;
balanse=SUMQbrukt-(sumQLOSSTANK+sumQLOAD+SUMQe11);
probsol=sum(E_nyttig)./sum(E_nyttig_f)
Utnytttet=Qbrukt-QLOSSTANK./1000;
sumutnytttet=sum(Utnytttet)
sumutnyttetaa=(SUMQbrukt-sumQLOSSTANK)./A_p

figure
plot(TIME,T1,TIME,T2,TIME,T3);

```

```
title('Temperatur i øvre,mitre og nedre del av vvbereder')
xlabel('Tid [Time] ')
ylabel('Temperatur [°C]')
grid on
hold on
```

```
figure
plot(TIME,TFO,'r',TIME,T3)
title('Temperatur på vannet inn og ut av solfangeren')
xlabel('Time ')
ylabel('Temperatur [°C]')
grid on
hold on
```

B Matlapscript solcellepanel

```

%laster times verdi klimadata T,v,rh,dir red, diff,redd
%beregner solas posisjon
%Klimadata-----
Fornebu=xlsread('Komplett_KlimadataNS3031_2014_Fornebu.xlsx','Komplett_klimadata_Ns3031_Forne');
T_K=273.15;
Solkonstant=1367;
g=9.81;


```

```

if cosd(Omega)>=tand(Rho)/tand(Phi)
    A=180-A_merket;
else
    A=360+A_merket;
end
Theta_i_Aalpha=acosd(sind(alpha).*cosd(Beta)+cosd(alpha).*sind(Beta).*cosd(Gamma-A));
Theta_i=acosd(cosd(Beta).*sind(Rho).*sind(Phi)+cosd(Beta).*cosd(Rho).*cosd(Phi).*cosd(Omega)-
sind(Beta).*cosd(Rho).*sind(Omega).*sind(Gamma)+sind(Beta).*sind(Rho).*cosd(Phi).*cosd(Gamma)-
sind(Beta).*cosd(Rho).*sind(Phi).*cosd(Omega).*cosd(Gamma));
I_direkte=DNI.*cosd(Theta_i); %direkte solstråling
Theta_z=90-alpha; %solar Zenith angle
Omega_ss=acosd(-tand(Rho).*tand(Phi)); %vinkel for solnedgang
Omega_sr=Omega_ss.*-1; %vinkel for soloppgang
Tid_sr=Omega_sr./15+12; %tidspunkt for soloppgang
Tid_ss=Omega_ss./15+12; %tidspunkt for solnedgang
Hoursofdaylighth=2*Omega_ss./15;
A_ss=asind(-cos(Rho).*sind(Omega_ss)); %sunset azimuthangle
alpha_max=90-abs(Phi-Rho); %max noontime solar altitude
alpha_min=90-abs(Phi+Rho); %min noontime solar altitude

%-----Diffuse stråling, Perez-----
%https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/1-weather-design-inputs/plane-of-array-poa-
irradiance/calculating-poa-irradiance/poa-sky-diffuse/perez-sky-diffuse-model/
E_a=Solkonstant.*(1+0.034.*cosd(360.*Dag/365.25)); %Extraterrestrial radiation
k_diff=5.535e-6;
epsilon_diff=((DHI+DNI)/DHI+k_diff.*Theta_z.^3)./(1+k_diff.*Theta_z.^3);
if 10<=epsilon_diff<1.065
    f_11=-0.008;
    f_12=0.588;
    f_13=-0.062;
    f_21=-0.06;
    f_22=0.072;
    f_23=-0.022;
elseif 1.065<=epsilon_diff<1.23
    f_11=0.13;
    f_12=0.683;
    f_13=-0.151;
    f_21=-0.019;
    f_22=0.066;
    f_23=-0.029;
elseif 1.230<=epsilon_diff<1.5
    f_11=0.33;
    f_12=0.487;
    f_13=-0.221;
    f_21=0.055;
    f_22=-0.064;
    f_23=-0.026;
elseif 1.5<=epsilon_diff<1.95
    f_11=0.568;
    f_12=0.187;
    f_13=-0.295;
    f_21=0.109;
    f_22=-0.152;
    f_23=-0.014;
elseif 1.95<=epsilon_diff<2.8
    f_11=0.873;
    f_12=-0.392;
    f_13=-0.362;
    f_21=0.226;
    f_22=-0.462;
    f_23=0.001;
elseif 2.8<=epsilon_diff<4.5
    f_11=1.132;
    f_12=-1.237;
    f_13=-0.412;
    f_21=0.288;
    f_22=-0.823;
    f_23=0.056;
elseif 4.5<=epsilon_diff<6.2
    f_11=1.06;
    f_12=-1.6;

```

```

f_13=-0.359 ;
f_21=0.264;
f_22=-1.127 ;
f_23=0.131;
elseif 6.2<=epsilon_diff
f_11=0.678;
f_12=-0.327;
f_13=-0.25;
f_21=0.156;
f_22=-1.377;
f_23=0.251;
end
AM_a=1./(cosd(Theta_z)+0.50572.*abs(96.07995-Theta_z)^(-1.6364)); %power from the sun
[Kasten ang Young 1989] %absolute airmass
delta_diff=DHI.*AM_a./E_a;
F_1=max(0,(f_11+f_12.*delta_diff+pi.*Theta_z./180.*f_13));
F_2=f_21+f_22.*delta_diff+pi.*Theta_z./180.*f_23;
epsilon_diff=((DHI+DNI)/DHI+k_diff.*Theta_z.^3)./(1+k_diff.*Theta_z.^3);
a_diff=max(0,cosd(Theta_i));
b_diff=max(cosd(85),cosd(Theta_z));
I_diff=DHI.*((1-F_1).*(1+cosd(Beta)/2))+F_1.*(a_diff/b_diff)+F_2.*sind(Beta)); %diffuse
stråling mot en vinklet flate Perez
%-----Nyttig solenergi som når kollektor-----
I_total_horis=sind(alpha).*DNI+DHI; %total horisontal stråling med diffuse og direkte
I_total=DNI.*cosd(Theta_i)+I_diff.*((1+cosd(Beta))/2)+rho_reflectanse.*I_total_horis.*((1-
cosd(Beta))/2);
S=I_total; %S er W solenergi som når en flate
if S<=0
%logisk test og verdier som ønskes å hente ut.
P_m=0;
I_m=0;
V_m=0;
P_m_p=0;
V_m_p=0;
T_celle=T_a;
h_c_conv=0;
h_bunn_c=0;
h_rad_c=0;
nnn=0;
Q_bunn=0;
Q_bunnb=0;
elseif S>0
feil_celle=100;
iter_celle=0;
T_celle_tippet=40+T_K;
while feil_celle>0.01
T_celle=T_celle_tippet;
iter_celle=iter_celle+1;
%-----SEOTP--s771-----
%-----Innput-----
I_sc_ref=2.9;%8.89;
V_oc_ref=20;%37.8;
I_mp_ref=2.67;%8.18;
V_mp_ref=16.5;%31.2;
mu_I_sc=1.325e-3;%0.056; %mu_I_sc=(I_sc_T2-I_scT1)./(T2-T1); %dI_sc/dT
mu_V_oc=-0.0775;%-0.35; %mu_V_oc=(V_ovT2-V_ocT1)./(T2-T1); %dV_oc/dT
N_s=36;%120; %number of cells
N_a=1;
A_c=0.427;%0.078.*0.156;
arsenide
epsilon_cell=1.12; %[eV] material bandgap energy 1.12 silision, 1.35 gallium
T_cell_ref=25+T_K;
Taualpha=0.8;
G_T=I_total.*Taualpha.*A_c.*N_a;
G_T_ref=1000.*A_c.*N_a;
%-----Beregne referanseverdier-----
I_l_ref=I_sc_ref; %ligning 3

```



```

a_cell_ref=(mu_V_oc.*T_cell_ref-
V_oc_ref+epsilon_cell.*N_s)/(mu_I_sc.*T_cell_ref./I_l_ref-3); %ligning 11
I_0_ref=I_l_ref.*exp(-V_oc_ref/a_cell_ref); %
ligning 4. the diode reverse saturation current
R_s_ref=(a_cell_ref.*log(1-I_mp_ref./I_l_ref)-V_mp_ref+V_oc_ref)./I_mp_ref; %
ligning 5. Series resistance
a_ref_max=(V_mp_ref-V_oc_ref)./log(1-I_mp_ref./I_l_ref);
%-----Temperaturavhengige-----
a_cell=a_cell_ref.*T_celle./T_cell_ref;; % Ligning 6. curve
fitting parameter
I_l=G_T./G_T_ref.*(I_l_ref+mu_I_sc.*(T_celle-T_cell_ref)); %Ligning 7. lighth
current
I_0=I_0_ref.*(T_celle./T_cell_ref).^3.*exp(epsilon_cell.*N_s./a_cell_ref.*(1-
T_cell_ref/T_celle)); %ligning 8.
I_sc=mu_I_sc.*(T_celle-T_cell_ref)+I_sc_ref; %dI_sc/dT
V_oc=mu_V_oc.*(T_celle-T_cell_ref)+V_oc_ref; %dV_oc/dT
%-----Calculating MPP-----
P_V=[];
iter=[];
I_V=[];
intervall=0.1;
for V_celle=(V_oc./2):intervall:V_oc;
iter=[iter V_celle];
myfun=@(I_celle) I_celle-(I_l-I_0.*(exp((V_celle+I_celle.*R_s_ref)./a_cell)-1));
%V_celle=V; % parameter
%fun=@(I_celle) myfun(I_celle,V_celle); % function of x alone
I_celle=fzero(myfun,0.1);
I_V=[I_V I_celle];
P=I_celle.*V_celle;
P_V=[P_V P];
end
%tot=[iter; I_V; P_V];
P_m=max(P_V);
P_m_p=P_m.*N_a;
V_m=find(P_V==P_m).*intervall+V_oc./2;
V_m_p=V_m.*N_a;
I_m=P_m./V_m;
nnn=P_m_p./(I_total.*A_c);
%-----Varmetap topp av celle-----
%-----konvektion%
%-----Tvungen-konveksjon-ovenpå-----
T_avg_air=(T_a+T_celle)./2;

k_air=0.0002067.*T_avg_air.^(0.85);
Vu_air=(9.*10^(-5)).*T_avg_air.^2+0.04.*T_avg_air-4.17).*10.^(-6);
Pr_air=1.057-0.06.*log(T_avg_air);

Re_air=v_wind./Vu_air.*L_1;
L_cr=5.*10^5.*Vu_air./v_wind;
Re_cr=v_wind.*L_cr./Vu_air;
if Re_air<5.*10^5 & L_cr>L_1
Nu_forced=0.664.*Re_air.^(0.5).*Pr_air.^(1/3);
N=1;
elseif Re_air<5.*10^5 & L_cr./L_1<0.1
Nu_forced=0.037.*Re_air.^(0.8).*Pr_air.^(1/3);
N=2;
elseif Re_air>=5.*10^5
Nu_forced=(0.037.*Re_air.^(0.8)-871).*Pr_air.^(1./3);
N=3;
end
%-----Naturllig-konveksjon.ovenpå
Ra_nat_t=g.*abs(T_celle-T_a).*L_1.^3.*Pr_air./(Vu_air.^2.*T_avg_air);
Nu_nat_t=1+0.635./(1+(0.618./Pr_air).^(9./16)).^(9./25)).*(Ra_nat_t.*cosd(90-
Beta)).^(0.25);
Nu_tot=(Nu_forced.^(1./90.*Beta+3)+Nu_nat_t.^(1./90.*Beta+3)).^(1/(1./90.*Beta+3));
h_c_conv=Nu_tot.*k_air./L_1;
R_c_t=1./h_c_conv;
%-----Stråling%-----
sigma=5.67.*10^(-8);
epsilon_celle=0.8;
h_c_rad=sigma.*epsilon_celle.*(T_celle.^2+T_a.^2).*(T_celle+T_a);

```

```

R_r_t=1./h_c_rad;

h_comb_top=h_c_rad+h_c_conv;
R_comb_top=1./h_comb_top;
Q_topp=h_comb_top.*A_c.*(T_celle-T_a);
%-----Varmetap bunn av celle-----
Ra_nat_b=g.*(T_celle-T_a).*L_1.^4*Pr_air./(Vu_air.^2.*T_avg_air);
Nu_nat_b=1+0.635./(1+(0.618./Pr_air).^ (9./16)).^(9./25).* (Ra_nat_t.*cosd(Beta-
90)).^(0.25);

v_b=5;

Re_air_b=v_b./Vu_air.*L_1;
L_cr_b=5.*10^5.*Vu_air./v_wind;
Re_cr=v_wind.*L_cr./Vu_air;
if Re_air_b<5.*10^5 & L_cr_b>L_1
    Nu_forced_b=0.664.*Re_air_b.^(0.5).*Pr_air.^(1/3);
elseif Re_air_b<5.*10^5 & L_cr_b./L_1<0.1
    Nu_forced=0.037.*Re_air_b.^(0.8).*Pr_air.^(1/3);
elseif Re_air_b>=5.*10^5
    Nu_forced_b=(0.037.*Re_air_b.^(0.8)-871).*Pr_air.^(1/3);
end

Nu_tot_b=(Nu_forced_b.^(1./90.*Beta+3)+Nu_nat_b.^(1./90.*Beta+3)).^(1/(1./90.*Beta+3));
h_bunn_c=Nu_tot_b.*k_air./L_1;

%h_bunn_c=Nu_nat_b.*k_air./L_1;
R_rad_b=1./h_bunn_c; %ser foreløpig bort fra stråling og tvungen konveksjon på
undersiden.
Q_bunn=h_bunn_c.*A_c.*(T_celle-T_a);
if T_a>(8+T_K)
    Q_bunnb=0;
else
    Q_bunnb=Q_bunn;
end
U_tot_c=1./(R_comb_top+R_rad_b);
UA=(Q_topp+Q_bunn)./(T_celle-T_a);

T_celle_test=(G_T-P_m_p)./(UA)+T_a;
feil_celle=abs(T_celle_test-T_celle_tippet);
T_celle_tippet=T_celle_test;
end
end
TIMER=[ TIMER i ];
Effekt=[Effekt P_m_p ];
Current=[Current I_m ];
Voltage=[Voltage V_m_p ];
Temp_c=[Temp_c T_celle-T_K ];
Temp=[Temp T_a-T_K ];
NNN=[NNN nnn];
III=[III I_total];
Qbunn=[Qbunn Q_bunn ];
Qbunnb=[Qbunnb Q_bunnb ];
end

SUMEFFEKT=sum(Effekt)
sumIII=sum(III)
nel=SUMEFFEKT./sumIII
sumQbunn=sum(Qbunn./A_c)
sumQbunnb=sum(Qbunnb./A_c)

figure
ax1=subplot(2,1,1);
ax2=subplot(2,1,2);

plot(ax1, TIMER, Effekt./A_c);
ylabel(ax1, 'Energi strøm [Wh/m^2]');
plot(ax2, TIMER, Qbunnb./A_c);
ylabel(ax2, 'Energi varme [Wh/m^2]');

```

```
figure
plot(TIMER,Temp,TIMER,Temp_c);
title('Temperatur på solcelle og luft')
xlabel('Tid [Time] ')
ylabel('Temperatur [°C]')
grid on
hold on
```

C Solcellepanel med vannkjøling

```

%Klimadata-----
Fornebu=xlsread('Komplett_KlimadataNS3031_2014_Fornebu.xlsx','Komplett_klimadata_Ns
3031_Forne');
T_K=273.15;
Solkonstant=1367;
g=9.81;
-----
Beta=34; %Aperture tilt angle [Deg]
L_2=1; %Width of casing
L_1=0.427; %Length of casing
m_f=0.05; %flowrate fluid
T_fi=20+T_K;

Gamma=180; %Aperture azimuth angle, north=0 [Deg]
Phi=59; %Latitudeangle

A_p=L_1.*L_2; %Area of the absorberplate
D_o=0.0134; %outer tube diamet
D_i=0.0124; %inner tube diameter
n=10.*L_2; %Nummbers of tubes on plate
W=0.1; %width between tubes

sigma=5.67e-8; %Stefan boltzman
epsilon_p=0.05; %emmisivity plate
Lambda_b=0.036; %Konduktiviteten bak plate

Thicknes_s=0.149; %Tykkelse på siden av platen
Thickness_p=0.05; %tykkelse på platen
lambda_p=237; %konduktiviteten til platen
A_t=n*W*L_1; %brukes til å beregne finne
varmetransporten
A_cross_tube=pi/4.*D_i.^2; %tversnittssarealet på rørene

k_glass=0.96;
%https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\_429.html
epsilon_g1=0.95; %emmisivitet glass 1
L_pg1=0.02; %avstang mellom plate og glass 1
L_glg2=L_pg1;%0.00;

Ty_glass1=0.01; %tykkelse på glasset
Ty_glass2=Ty_glass1;

rho_reflectanse=0.2; %reflektansen til omgivelses overflatene
TAUALPHA=0.80;

%-----
E_year=35.*200./365;

%-----verdier jeg vil hente ut-----
TIME=[ ];
Temp_a=[ ];
Temp_c=[ ];

Effekt=[ ];
Current=[ ];
Voltage=[ ];

NNN=[ ];
QUI=[ ];
QUF=[ ];
TFO=[ ];
III=[ ];

```

```

for i=1:length(Fornebu);
Dag=[Fornebu(i,1)];
Time=Fornebu(i,2);
Tid_s=Fornebu(i,3);
T_a=Fornebu(i,4)+T_K;
T_sky=0.0552.*T_a.^(1.5);
RH=Fornebu(i,5);
v_wind=Fornebu(i,6);
Vind_retning=Fornebu(i,7);
DNI=Fornebu(i,8);           %Direkte Normal irradiation (Tracking)
DHI=Fornebu(i,9);         %Diffuse horisontal radiation

%-----beregne solas posisjon for denne timen på
%denne dagen
Rho=asind(0.39795.*cosd(0.98563.*(Dag-173)));
%declination Angle, Power from the sun
Rho_test=23.45.*sind(360.*(284+Dag)./365);
%Solar engineering and thermal processing
Omega=15.*(Tid_s-12);
alpha=asind(sind(Rho).*sind(Phi)+cosd(Rho).*cosd(Omega).*cosd(Phi)); %Solar
altitudeangle
A_merket=asind(-cosd(Rho).*sind(Omega)/cosd(alpha)); %solar
azimuth angle
if cosd(Omega)>=tand(Rho)/tand(Phi)
    A=180-A_merket;
else
    A=360+A_merket;
end

Theta_i_Aalpha=acosd(sind(alpha).*cosd(Beta)+cosd(alpha).*sind(Beta).*cosd(Gamma-
A));

Theta_i=acosd(cosd(Beta).*sind(Rho).*sind(Phi)+cosd(Beta).*cosd(Rho).*cosd(Phi).*co
sd(Omega)-
sind(Beta).*cosd(Rho)*sind(Omega).*sind(Gamma)+sind(Beta).*sind(Rho).*cosd(Phi).*co
sd(Gamma)-sind(Beta)*cosd(Rho).*sind(Phi).*cosd(Omega).*cosd(Gamma));
I_direkte=DNI.*cosd(Theta_i); %direkte solstråling
Theta_z=90-alpha; %solar Zenith angle
Omega_ss=acosd(-tand(Rho).*tand(Phi)); %vinkel for solnedgang
Omega_sr=Omega_ss.*-1; %vinkel for soloppgang
Tid_sr=Omega_sr./15+12; %tidspunkt for soloppganggang
Tid_ss=Omega_ss./15+12; %tidspunkt for solnedganh
Hoursofdaylength=2*Omega_ss./15;
A_ss=asind(-cos(Rho).*sind(Omega_ss)); %sunset azimuthangle
alpha_max=90-abs(Phi-Rho); %max noontime solar altitude
alpha_min=90-abs(Phi+Rho); %min noontime solar altitude

%-----Diffuse stråling, Perez-----
%https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/1-weather-design-inputs/plane-of-
array-poa-irradiance/calculating-poa-irradiance/poa-sky-diffuse/perez-sky-diffuse-
model/
E_a=Solkonstant.*(1+0.034.*cosd(360.*Dag/365.25)); %Extraterrestrial
radiation
k_diff=5.535e-6;
epsilon_diff=((DHI+DNI)/DHI+k_diff.*Theta_z.^3)/(1+k_diff.*Theta_z.^3);
if 10<=epsilon_diff<1.065
    f_11=-0.008;
    f_12=0.588;
    f_13=-0.062;
    f_21=-0.06;
    f_22=0.072;
    f_23=-0.022;
elseif 1.065<=epsilon_diff<1.23
    f_11=0.13;
    f_12=0.683;
    f_13=-0.151;
    f_21=-0.019;

```

```

        f_22=0.066;
        f_23=-0.029;
elseif 1.230<=epsilon_diff<1.5
        f_11=0.33;
        f_12=0.487;
        f_13=-0.221;
        f_21=0.055;
        f_22=-0.064;
        f_23=-0.026;
elseif 1.5<=epsilon_diff<1.95
        f_11=0.568;
        f_12=0.187;
        f_13=-0.295;
        f_21=0.109;
        f_22=-0.152;
        f_23=-0.014;
elseif 1.95<=epsilon_diff<2.8
        f_11=0.873;
        f_12=-0.392;
        f_13=-0.362;
        f_21=0.226;
        f_22=-0.462;
        f_23=0.001;
elseif 2.8<=epsilon_diff<4.5
        f_11=1.132;
        f_12=-1.237;
        f_13=-0.412;
        f_21=0.288;
        f_22=-0.823;
        f_23=0.056;
elseif 4.5<=epsilon_diff<6.2
        f_11=1.06;
        f_12=-1.6;
        f_13=-0.359 ;
        f_21=0.264;
        f_22=-1.127 ;
        f_23=0.131;
elseif 6.2<=epsilon_diff
        f_11=0.678;
        f_12=-0.327;
        f_13=-0.25;
        f_21=0.156;
        f_22=-1.377;
        f_23=0.251;
end
AM_a=1./ (cosd(Theta_z)+0.50572.*abs(96.07995-Theta_z)^(-1.6364)); %power from
the sun [Kasten ang Young 1989] %absolute airmass
delta_diff=DHI.*AM_a./E_a;
F_1=max(0, (f_11+f_12.*delta_diff+pi.*Theta_z./180.*f_13));
F_2=f_21+f_22.*delta_diff+pi.*Theta_z./180.*f_23;
epsilon_diff=((DHI+DNI)/DHI+k_diff.*Theta_z.^3)/(1+k_diff.*Theta_z.^3);
a_diff=max(0, cosd(Theta_i));
b_diff=max(cosd(85), cosd(Theta_z));
I_diff=DHI.*((1-F_1).*(1+cosd(Beta)/2))+F_1.*(a_diff/b_diff)+F_2.*sind(Beta));
%diffuse stråling mot en vinklet flate Perez
%-----Nyttig solenergi som når kollektor-----
I_total_horis=sind(alpha).*DNI+DHI; %total horisontal stråling med diffuse og
direkte
I_total=DNI.*cosd(Theta_i)+I_diff.*((1+cosd(Beta))/2)+rho_reflectanse.*
I_total_horis.*((1-cosd(Beta))/2);
S=TAUALPHA.*I_total; %S er W solenergi som når en flate
%-----Stasjonær varmetransport-----

%-----logisk test for når man skal droppe beregningene siden solen er
borte-----
if S<=0%I_total<200 %DNI<=0 & DHI<=0
        Q_u_i=0;
        Q_u_f=0;

```

```

T_fo=T_a;
P_m=0;
I_m=0;
V_m=0;
P_m_p=0;
V_m_p=0;
T_celle=T_a;
nnn=0;
elseif s>0
UA_tippet=5;
T_fo_t=T_fi+10;
feil_celle=100;
iter_celle=0;
T_celle_tippet=40+T_K;
while feil_celle>0.01
    UA=UA_tippet;
    T_fo=T_fo_t;
    T_celle=T_celle_tippet;
%
%-----konvection in tube-----
-
%-----Prantlnummer-----
--

T_avg_f=(T_fo+T_fi)/2;
if T_K<T_avg_f & T_avg_f<(T_K+5)
    Pr_f=-0.8617234469.*T_avg_f+250.8883767535;
elseif (T_K+5)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+10)
    Pr_f=-0.35.*T_avg_f+108.5525;
elseif (T_K+10)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+15)
    Pr_f=-0.272.*T_avg_f+86.4668;
elseif (T_K+15)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+20)
    Pr_f=-0.216.*T_avg_f+70.3304;
elseif (T_K+20)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+25)
    Pr_f=-0.174.*T_avg_f+58.0181;
elseif (T_K+25)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+30)
    Pr_f=-0.144.*T_avg_f+49.0736;
elseif (T_K+30)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+35)
    Pr_f=-0.118.*T_avg_f+41.1917;
elseif (T_K+35)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+40)
    Pr_f=-0.102.*T_avg_f+36.2613;
elseif (T_K+40)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+45)
    Pr_f=-0.082.*T_avg_f+29.9983;
elseif (T_K+45)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+50)
    Pr_f=-0.072.*T_avg_f+26.8168;
elseif (T_K+50)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+55)
    Pr_f=-0.06.*T_avg_f+22.939;
elseif (T_K+55)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+60)
    Pr_f=-0.052.*T_avg_f+20.3138;
elseif (T_K+60)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+65)
    Pr_f=-0.048.*T_avg_f+18.9812;
elseif (T_K+65)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+70)
    Pr_f=-0.04.*T_avg_f+16.276;
elseif (T_K+70)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+75)
    Pr_f=-0.034.*T_avg_f+14.2171;
elseif (T_K+75)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+80)
    Pr_f=-0.032.*T_avg_f+13.5208;
elseif (T_K+80)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+85)
    Pr_f=-0.028.*T_avg_f+12.1082;
elseif (T_K+85)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+90)
    Pr_f=-0.024.*T_avg_f+10.6756;
elseif (T_K+90)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+95)
    Pr_f=-0.022.*T_avg_f+9.9493;
elseif (T_K+95)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+100)
    Pr_f=-0.02.*T_avg_f+9.213;
elseif (T_K+100)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+105)
    Pr_f=-0.034.*T_avg_f+14.4371;
else
    Pr_f=1.15;

```



```

end
%Pr_f_beregnet=vu_f.*cp_f.*rho_f/(k_f);
%-----Dynamisk viskositet-Vann-----
-----

if T_K<T_avg_f & T_avg_f<(T_K+5)
    Mu_f=-4.20842e-05.*T_avg_f+0.013224711;
elseif (T_K+5)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+10)
    Mu_f=-0.0000424.*T_avg_f+0.01331256;
elseif (T_K+10)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+15)
    Mu_f=-0.0000338.*T_avg_f+0.01087747;
elseif (T_K+15)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+20)
    Mu_f=-0.0000272.*T_avg_f+0.00897568;
elseif (T_K+20)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+25)
    Mu_f=-0.0000222.*T_avg_f+0.00750993;
elseif (T_K+25)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+30)
    Mu_f=-0.0000186.*T_avg_f+0.00643659;
elseif (T_K+30)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+35)
    Mu_f=-0.0000156.*T_avg_f+0.00552714;
elseif (T_K+35)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+40)
    Mu_f=-0.0000134.*T_avg_f+0.00484921;
elseif (T_K+40)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+45)
    Mu_f=-0.0000114.*T_avg_f+0.00422291;
elseif (T_K+45)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+50)
    Mu_f=-9.8e-06.*T_avg_f+0.00371387;
elseif (T_K+50)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+55)
    Mu_f=-8.6e-06.*T_avg_f+0.00332609;
elseif (T_K+55)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+60)
    Mu_f=-0.0000074.*T_avg_f+0.00293231;
elseif (T_K+60)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+65)
    Mu_f=-0.0000068.*T_avg_f+0.00273242;
elseif (T_K+65)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+70)
    Mu_f=-0.0000058.*T_avg_f+0.00239427;
elseif (T_K+70)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+75)
    Mu_f=-0.0000052.*T_avg_f+0.00218838;
elseif (T_K+75)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+80)
    Mu_f=-4.6e-06.*T_avg_f+0.00197949;
elseif (T_K+80)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+85)
    Mu_f=-4.4e-06.*T_avg_f+0.00190886;
elseif (T_K+85)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+90)
    Mu_f=-0.0000036.*T_avg_f+0.00162234;
elseif (T_K+90)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+95)
    Mu_f=-0.0000036.*T_avg_f+0.00162234;
elseif (T_K+95)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+100)
    Mu_f=-3e-06.*T_avg_f+0.00140145;
elseif (T_K+100)<=T_avg_f & T_avg_f<(T_K+105)
    Mu_f=-5.4e-06.*T_avg_f+0.00229701;
else
    Mu_f=0.000003;
end

%-----Tetthet vann-----
-----

rho_f=4e-06.*T_avg_f.^3-0.007.*T_avg_f.^2+2.8474.*T_avg_f+664.6;
%-----Konduktivitet vann-----
-----

k_f=-6e-09.*T_avg_f.^3-3e-06.*T_avg_f.^2+0.005.*T_avg_f-0.4695;
%-----Spesifikk varmekapasitet vann-----
-----

cp_f=0.0138.*T_avg_f.^2-8.8387.*T_avg_f+5595.6;
%-----beregning-----
-----

Re_f=4.*m_f./(Mu_f.*pi.*D_i);%rho_f.*D_i/Mu_f.;
if Re_f<2300
    Nu_f=4.36;
else
    f_f=(0.790.*log(Re_f)-1.64).^(-2);
    Nu_f=f_f/8.*(Re_f-1000).*Pr_f/(1+12.7.*(f_f/8).^0.5.*(Pr_f.^(2/3)-1));
end

```

```

h_c_f=k_f.*Nu_f/D_i;          %Varmetapstallet til fluidet i røret a_f=205;
%-----finned and convection to tube-----
-----

m=(UA/(lambda_p.*Thickness_p)).^0.5;
F=tanh(m.*(W-D_o)/2)/(m.*(W-D_o)/2);          %standard fin eff tangens
hyperbolicus radianer, gjør om til grader
F_mrk=1/(W.*UA.*(1/(UA.*(F.*(W-D_o)+D_o))+1/(pi.*D_i.*h_c_f)));
F_r=m_f.*cp_f/(UA.*A_p).*(1-exp(-F_mrk.*UA.*A_p/(m_f.*cp_f)));
T_fo=(T_fi-T_a-S/UA).*exp(-UA.*A_t.*F_mrk/(m_f.*cp_f))+T_a+S/UA;

Q_u_i=A_p.*F_r.*(S-UA.*(T_fi-T_a));

Q_u_f=m_f.*cp_f.*(T_fo-T_fi);

%-----SEOTP--s771-----
%-----Innput-----
I_sc_ref=2.9;%8.89;
V_oc_ref=20;%37.8;
I_mp_ref=2.67;%8.18;
V_mp_ref=16.5;%31.2;
mu_I_sc=1.325e-3;%0.056;          %mu_I_sc=(I_sc_T2-I_scT1)./(T2-T1);
%dI_sc/dT
mu_V_oc=-0.0775;%-0.35;          %mu_V_oc=(V_ovT2-V_ocT1)./(T2-T1);
%dV_oc/dT

N_s=36;%120;          %number of cells
N_a=1;
%A_p=0.427;%0.078.*0.156;

epsilon_cell=1.12;          %[eV] material bandgap energy 1.12 silision,
1.35 gallium arsenide
T_cell_ref=25+T_K;
Taualpha=0.8;

G_T=I_total.*Taualpha.*A_p.*N_a;
G_T_ref=1000.*A_p.*N_a;
%-----Beregne referanseverdier-----
I_l_ref=I_sc_ref;          %ligning 3
a_cell_ref=(mu_V_oc.*T_cell_ref-
V_oc_ref+epsilon_cell.*N_s)./(mu_I_sc.*T_cell_ref./I_l_ref-3);          %ligning 11
I_0_ref=I_l_ref.*exp(-V_oc_ref/a_cell_ref);
% ligning 4. the diode reverse saturation current
R_s_ref=(a_cell_ref.*log(1-I_mp_ref./I_l_ref)-
V_mp_ref+V_oc_ref)./I_mp_ref;          % ligning 5. Series resistance
a_ref_max=(V_mp_ref-V_oc_ref)./log(1-I_mp_ref./I_l_ref);
%-----Temperaturavhengige-----
a_cell=a_cell_ref.*T_celle./T_cell_ref;;          %
Ligning 6. curve fitting parameter
I_l=G_T./G_T_ref.*(I_l_ref+mu_I_sc.*(T_celle-T_cell_ref));
%Ligning 7. lighth current

I_0=I_0_ref.*(T_celle./T_cell_ref).^3.*exp(epsilon_cell.*N_s./a_cell_ref.*(1-
T_cell_ref/T_celle)); %ligning 8.
I_sc=mu_I_sc.*(T_celle-T_cell_ref)+I_sc_ref;          %dI_sc/dT
V_oc=mu_V_oc.*(T_celle-T_cell_ref)+V_oc_ref;          %dV_oc/dT
%-----Calculating MPP-----

P_V=[];
iter=[];
I_V=[];
intervall=0.1;
for V_celle=(V_oc./2):intervall:V_oc;
iter=[iter V_celle];
myfun=@(I_celle) I_celle-(I_l-
I_0.*(exp((V_celle+I_celle.*R_s_ref)./a_cell)-1));
%V_celle=V;          % parameter
%fun=@(I_celle) myfun(I_celle,V_celle);          % function of x alone
I_celle=fzero(myfun,0.1);

```

```

        I_V=[I_V I_celle];
        P=I_celle.*V_celle;
        P_V=[P_V P];
end
%tot=[iter; I_V; P_V];
P_m=max(P_V);
P_m_p=P_m.*N_a;
V_m=find(P_V==P_m).*intervall+(V_oc./2);
V_m_p=V_m.*N_a;
I_m=P_m./V_m;
nnn=P_m_p./(G_T);
%-----Varmetap topp av celle-----
%-----konvektion%
%-----Tvungen-konveksjon-ovenpå-----
T_avg_air=(T_a+T_celle)./2;

k_air=0.0002067.*T_avg_air.^(0.85);
Vu_air=(9.*10^(-5).*T_avg_air.^2+0.04.*T_avg_air-4.17).*10.^(-6);
Pr_air=1.057-0.06.*log(T_avg_air);

Re_air=v_wind./Vu_air.*L_1;
L_cr=5.*10^5.*Vu_air./v_wind;
Re_cr=v_wind.*L_cr./Vu_air;
if Re_air<5.*10^5 & L_cr>L_1
    Nu_forced=0.664.*Re_air.^(0.5).*Pr_air.^(1/3);
    N=1;
elseif Re_air<5.*10^5 & L_cr./L_1<0.1
    Nu_forced=0.037.*Re_air.^(0.8).*Pr_air.^(1/3);
    N=2;
elseif Re_air>=5.*10^5
    Nu_forced=(0.037.*Re_air.^(0.8)-871).*Pr_air.^(1./3);
    N=3;
end
%-----Naturllig-konveksjon.ovenpå
Ra_nat_t=g.*abs(T_celle-T_a).*L_1.^3.*Pr_air./(Vu_air.^2.*T_avg_air);

Nu_nat_t=1+0.635./(1+(0.618./Pr_air).^(9./16)).^(9./25).*(Ra_nat_t.*cosd(90-
Beta)).^(0.25);

Nu_tot=(Nu_forced.^(1./90.*Beta+3)+Nu_nat_t.^(1./90.*Beta+3)).^(1/(1./90.*Beta+3));
h_c_conv=Nu_tot.*k_air./L_1;
R_c_t=1./h_c_conv;
%-----Stråling%-----
sigma=5.67.*10^(-8);
epsilon_celle=0.8;
h_c_rad=sigma.*epsilon_celle*(T_celle.^2+T_a.^2).*(T_celle+T_a);
R_r_t=1./h_c_rad;

h_comb_top=h_c_rad+h_c_conv;
R_comb_top=1./h_comb_top;
Q_topp=h_comb_top.*A_p.*(T_celle-T_a);
%-----Varmetap bunn av celle-----
%
Ra_nat_b=g.*(T_celle-T_a).*L_1.^4*Pr_air./(Vu_air.^2.*T_avg_air);
%
Nu_nat_b=1+0.635./(1+(0.618./Pr_air).^(9./16)).^(9./25).*(Ra_nat_t.*cosd(Beta-
90)).^(0.25);
%
h_bunn_c=Nu_nat_b.*k_air./L_1;
%
R_rad_b=1./h_bunn_c; %ser foreløpig bort fra stråling og tvungen
konveksjon på undersiden.
%
Q_bunn=h_bunn_c.*A_c.*(T_celle-T_a);
%
U_tot_c=1./(R_comb_top+R_rad_b);
UA=(Q_topp)./(T_celle-T_a);
T_celle_test=(G_T-(Q_u_i+P_m_p))/(UA)+T_a;
%
%T_celle_test=(G_T-P_m_p)./(UA)+T_a;
feil_celle=abs(T_celle_test-T_celle_tippet);
T_celle_tippet=T_celle_test;
T_fo_t=T_fo;

```

```

        UA_tippet=UA;
    end
end
TIME=[ TIME i ];
Effekt=[Effekt P_m ];
Current=[Current I_m ];
Voltage=[Voltage V_m_p ];
Temp_c=[Temp_c T_celle-T_K ];
Temp_a=[Temp_a T_a-T_K ];
TFO=[TFO T_fo-T_K ];

NNN=[NNN nnn];
QUI=[QUI Q_u_i];
QUF=[QUF Q_u_f];
III=[III I_total.*A_p];
end
SUMQUI=sum(QUI)
SUMQUF=sum(QUF)
probsol=SUMQUI./SUMQUF
SUMEFFEKT=sum(Effekt)
sumIII=sum(III)
nel=SUMEFFEKT./sumIII
ntot=(SUMEFFEKT+SUMQUI)./sumIII
%nnn=SUMQbrukt./sumIII

figure
ax1=subplot(2,1,1);
ax2=subplot(2,1,2);

plot(ax1, TIME, Effekt./A_p);
ylabel(ax1, 'Energi strøm [Wh/m^2]');
plot(ax2, TIME, QUF./A_p);
ylabel(ax2, 'Energi varme [Wh/m^2]');

figure
plot(TIME,Temp_a,TIME,Temp_c, TIME, TFO);
title('Temperatur på solcelle, luft og vann ut av solcelle')
xlabel('Tid [Time] ')
ylabel('Temperatur [^oC]')
grid on
hold on

```