

Kristoffer Prestvold

Analyse av varmeanlegg ved Sykehuset Østfold Kalnes

Hovedoppgave i Produktutvikling og produksjon

Veileder: Trygve Magne Eikevik

Juni 2019

Kristoffer Prestvold

Analyse av varmeanlegg ved Sykehuset Østfold Kalnes

Hovedoppgave i Produktutvikling og produksjon
Veileder: Trygve Magne Eikevik
Juni 2019

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for energi- og prosessteknikk

Forord

Denne masteroppgaven markerer slutten på et 5 årig studieløp, og har for meg vært en god introduksjon til arbeidslivet. Gjennom oppgaven har jeg fått muligheten til å analysere en eksisterende kundesentral. Å jobbe med et reelt system hvor mitt arbeid kan gjøre en forskjell har vært veldig motiverende. Jeg har også fått muligheten til å møte personer med god erfaring innenfor bransjen, hvilket har vært veldig lærerikt.

En takk rettes til min veilder på NTNU, Trygve Magne Eikevik som har vært tilgjengelig for faglig diskusjon og kommet med gode innspill til oppsett av oppgaven. Takk til medveileder i Norconsult, Thorgeir Harsem som ble med på befaring på sykehuset og som har bidratt med gode forslag og kommentarer underveis.

Oppgaven hadde ikke vært mulig å gjennomføre uten hjelp fra Jan Lervik til å sette opp målepunkter og hente ut målinger fra sykehuset. En stor takk rettes derfor til deg, Jan.

Sammendrag

Sykehuset Østfold Kalnes er oppvarmet av fjernvarme fra Kalnes energisentral med en temperatur på 60 °C. I en av kundesentralene på sykehuset oppleves problemer med å oppnå ønsket turtemperatur på tappevannet. I denne oppgaven presenteres og valideres en simuleringsmodell med bakgrunn i målinger gjort på tappevannskretsen. Simuleringer med forbruk fra tre ulike uker viste at tilfredsstillende turtemperatur kunne oppnås ved riktig kontroll av volumstrøm på sekundærsiden. For å redusere returtemperaturen på primærsiden ble det gjort simuleringer med en ekstra varmeveksler for forvarming, og med en reduksjon av settpunkt for turtemperatur fra 58 °C til 55 °C. Reduksjonen av settpunkt medførte en reduksjon av gjennomsnittlig returtemperatur på 5 K til 6 K ut fra uken. Forvarming av tappevann medførte tilsvarende resultat, hvilket foreslår at forvarming kan være en unødvendig investering i lavtemperatur fjernvarmenett. En reguleringsstrategi som kombinerer regulering av volumstrøm og reduksjon av settpunkt på turtemperatur ble foreslått som løsning for sykehuset. Simuleringer på denne løsningen viste en reduksjon av gjennomsnittlig returtemperatur på 5 K til 6 K og tilfredsstillende turtemperatur i 99,3 % av tilfellene.

Abstract

The hospital Sykehuset Østfold Kalnes is heated by district heating with a supply temperature of 60°C. In one of the substations there has been a problem maintaining the temperature on the domestic hot water (DHW). In this thesis a simulation model of the DHW system is presented and validated by data from the hospital. Simulations on three weeks of different consumption profiles showed that the specified DHW temperature could be maintained by volume flow control on the secondary side. To reduce return temperature on the primary side, simulations were done with an additional heat exchanger for preheating, and a reduction of the set point for DHW from 58°C to 55°C. The reduction of set point for DHW led to a reduction of the mean return temperature of 5 K or 6 K depending on the weekly consumption profile. Preheating the hot water led to similar results, suggesting that preheating of DHW may be an unnecessary expensive investment in district heating system with low supply temperature. A final proposal was given combining volume flow control and a reduction of the setpoint for DHW temperature. The simulations showed a reduction in the mean return temperature of 5K to 6K and satisfying DHW temperatures in 99.3 % of the time.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iii
1 Innledning	1
1.1 Mål og gjennomføring	1
2 Litteraturstudie	3
2.1 Fjernvarme fra da til nå	3
2.2 Fjerde generasjon fjernvarme (4GFV)	3
2.2.1 Lavtemperatur fjernvarme (LTFV)	4
2.2.2 Utnytte lavtemperatur varmekilder i fjernvarme	5
2.3 Oppvarming av tappevann i kundesentraler	5
3 Teori	8
3.1 Temperatur i møtende vannstrømmer	8
3.2 Temperatur i varmtvannstanker	9
3.3 Numerisk modell for varmeveksler	10
4 Metode	12
4.1 Gjennomføring av oppgaven	12
4.1.1 Samtaler med driftspersonell og analysing av målinger	13
4.1.2 Simuleringer før test av første forbedringstiltak	13
4.1.3 Gjennomføring av forbedringstiltak og analyser av dette	14
4.1.4 Simuleringer før endelig foreslåtte forbedringstiltak	14
4.2 Målinger på krets for tappevann	15
4.2.1 Måleperiode, måleinstrument og måleusikkerhet	16
4.3 Målinger på radiatorkrets og krets for ventilasjonsvarme	18
5 Kalnes energisentral og kundesentralen i Behandlingsbygg 08	19
5.1 Forenklet oppbygging og drift av Kalnes energisentral	19
5.1.1 Overordnet varmebehov	20
5.1.2 Overordnet kjølebehov	21

5.1.3	Masteroppgave på Kalnes energisentral	21
5.2	Oppbygging og drift av kundesentralen i Behandlingsbygg 08	22
5.2.1	Radiatorkrets 320.811	23
5.2.2	Krets for ventilasjonsvarme 320.821	25
5.2.3	Krets for tappevann 310.801	27
6	Simuleringsmodell av krets for tappevann	30
6.1	Bakgrunn for modellen	30
6.2	Inndata og initialverdier	30
6.3	Beregningsrekkefølge	31
6.4	Funksjoner	32
6.5	Animasjon av simuleringsmodellen	35
6.6	Justering og validering	35
6.7	Antakelser og begrensninger for modellen	38
7	Resultater	39
7.1	Målinger på tappevannskrets uke 13	39
7.2	Simuleringer før første forbedringstiltak	41
7.2.1	Dimensjonerende volumstrøm over varmeveksleren	42
7.2.2	Større varmeveksler	43
7.2.3	Ekstra varmtvannstank	45
7.2.4	Endring av volumstrøm over varmeveksleren	46
7.2.5	Sammendrag av resultater fra simuleringer før første forbedringstiltak	48
7.3	Målinger etter endret pådrag på pumpe JP0001/JP0002	49
7.4	Simuleringer etter endret pådrag	51
7.4.1	Sammenligning av simuleringer og målinger fra uke 17 og 18	51
7.4.2	Annen volumstrøm over varmeveksler	52
7.5	Redusering av returtemperatur på primærside	54
7.5.1	Redusering av settpunkt på turtemperatur	54
7.5.2	Ekstra varmeveksler for forvarming	56
7.6	Foreslått forbedringstiltak	57
8	Diskusjon	61
8.1	Målinger	61
8.2	Simuleringsperioder og endelig forbedringstiltak	61
8.2.1	Endelig forbedringstiltak	62

8.2.2	Flere simuleringer	62
8.3	Svakheter ved simuleringsmodellen og avvik fra målte verdier	63
8.3.1	Avvik mellom målte og simulerte temperaturer i varmtvannstankene	63
8.4	Diskusjon opp mot teori	64
9	Konklusjon	66
10	Videre arbeider	67
10.1	Tanker om fremtiden	67
Bibliografi		
A	Figurer fra validering av simuleringsmodellen	A1
B	Testmålinger gjort med datalogger	B1
C	Systemskjema kundesentral bygg 08	C1
D	Systemskjema Kalnes energisentral	D1
E	Kostnadsoverslag	E1
F	Oppsett av simuleringer	F1
F.1	Validering av simuleringsmodellen	F2
F.2	Dimensjonerende volumstrøm over varmeveksleren	F2
F.3	Større varmeveksler	F3
F.4	Ekstra varmtvannstank	F4
F.5	Volumstrøm på 1,20 l/s over varmeveksleren	F4
F.6	Volumstrøm på 0,9 l/s over varmeveksleren	F5
F.7	Redusering av settpunkt på turtemperatur	F6
F.8	Ekstra varmeveksler for forvarming	F6
F.9	Foreslått forbedringstiltak	F7

Figurer

2.1	Systemskjema for forvarming av tappevann	7
3.1	Møtende vannstrømmer	8
3.2	Temperaturrendring i varmtvannstanker	10
3.3	Modell av varmeveksler	11
4.1	Målepunkter for tappevannskrets fra 15.01.19	16
4.2	Målepunkter for datalogger	17
4.3	Plassering av målepunkt i radiator- og ventilasjonskrets	18
5.1	Kalnes Energisentral, foto: privat	19
5.2	Forenklet systemskjema over Kalnes Energisentral (Ebnes and Hagen, 2017)	20
5.3	Varighetskurve for varmeproduksjon (Ebnes and Hagen, 2017)	22
5.4	Effektuttak 5. januar 2017 (Ebnes and Hagen, 2017)	22
5.5	Utdrag fra systemskjema for kundesentral i bygg 08	23
5.6	Varighetskurve og kurve for tur- og returtemperaturer på radiatorkretsen fra 25.12.18 til 05.03.19	24
5.7	Sammenheng mellom utetemperatur og tur- og returtemperatur for radiatorkretsen fra 25.12.18 til 05.03.19	25
5.8	Sammenheng mellom utetemperatur og tur- og returtemperatur for ventilasjonskrets fra 25.12.18 til 05.03.19	26
5.9	Varighetskurve og kurve for tur- og returtemperaturer på ventilasjonskretsen fra 25.12.8 til 05.03.19	26
5.10	Forenklet systemskjema av tappevannskretsen	28
5.11	Målt turtemperatur i tappevannskretsen i uke 5	29
6.1	Visualisering av modell for tappevannskrets	30
6.2	Beregningsrekkefølge for simuleringsmodellen	32
6.3	Fargekart for animasjon (matplotlib, 2017)	35
6.4	Sammenligning av målinger og simuleringer på turtemperatur i uke 13	36
6.5	Sammenligning av målinger og simuleringer på turtemperatur i uke 13 med justeringer på kaldtvann	36

6.6	Sammenligning av målinger og simuleringer på temperaturer i Tank 2 og Tank 4 i uke 13	37
6.7	Sammenligning av målinger og simuleringer på returtemperaturen på primærsiden i uke 13	37
7.1	Målinger på turtemperatur i uke 13	39
7.2	Målinger på temperatur mellom varmtvannstankene i uke 13	40
7.3	Øyeblikksbilde fra simuleringer av tappevannskretsen på tirsdag i uke 13	41
7.4	Målinger på returtemperatur på primærside og på temperatur ut av varmeveksleren på sekundærsiden i uke 13	41
7.5	Simulert turtemperatur og temperatur i tanker med dimensjonerende volumstrøm	43
7.6	Øyeblikksbilde fra animasjonsvideo som viser simuleringer med dimensjonerende volumstrøm tirsdag i uke 13 (Prestvold, 2019)	43
7.7	Simulert turtemperatur og temperatur i tanker med en varmeveksler på 200 kW	45
7.8	Simulert turtemperatur og temperatur i tanker med ekstra varmtvannstank	46
7.9	Simulert turtemperatur og temperatur i tanker med volumstrøm på 1,2 l/s	47
7.10	Målt turtemperatur og temperatur mellom varmtvannstanker i uke 17	50
7.11	Målt turtemperatur og temperatur mellom varmtvannstanker i uke 18	50
7.12	Totalt ukentlig vannvolum og volumstrøm på blanding av kaldtvann og VVC	51
7.13	Målinger og simuleringer av turtemperatur for uke 17 og 18	52
7.14	Målinger og simuleringer av temperatur i Tank 2 og Tank 4 i uke 18	52
7.15	Simulert turtemperatur og temperatur i tanker med fungerende ventilmotor og en volumstrøm på 0,9 l/s for uke 17 og 18	53
7.16	Simulert turtemperatur og temperatur i tanker uten fungerende ventilmotor og en volumstrøm 0,9 l/s for uke 17 og 18	54
7.17	Simulert returtemperatur med lavere settpunkt sammenlignet med målt returtemperatur for uke 13 og 17	55
7.18	Simulert returtemperatur med lavere settpunkt sammenlignet med målt returtemperatur for uke 18	56
7.19	Simulert returtemperatur på primærsiden med ekstra varmeveksler sammenlignet med målt returtemperatur for uke 13 og 17	57
7.20	Simulert returtemperatur på primærsiden med ekstra varmeveksler sammenlignet med målt returtemperatur for uke 18	58
7.21	Simulert turtemperatur med foreslått forbedringstiltak i uke 13 og uke 17	59

7.22	Simulert turtemperatur med forbedringstiltak uke 18 og simulert returtemperatur med forbedringstiltak sammenlignet med målt returtemperatur for uke 13	60
7.23	Simulert returtemperatur med foreslått forbedringstiltak sammenlignet med målt returtemperatur for uke 17 og uke 18	60
A.1	Sammenligning mellom simulert og målt turtemperatur og temperatur ut av varmeveksler	A1
A.2	Sammenligning mellom simulert og målt temperatur i Tank 2 og Tank 3 . . .	A2
A.3	Sammenligning mellom simulert og målt temperatur i Tank 4 og temperatur inn på varmeveksleren	A3
A.4	Sammenligning mellom simulert og målt temperatur på varmtvannssirkulasjon, og blanding av varmtvannssirkulasjon og kaldtvann	A3
A.5	Sammenligning mellom simulert og målt returtemperatur på primærside av varmeveksleren	A4
B.1	Målinger gjort av datalogger i termisk blandekar med temperatur på 0 °C og 28 °C	B1
B.2	Målinger gjort av datalogger i termisk blandekar med temperatur på 40 °C og 50 °C	B2
B.3	Målinger gjort av datalogger i termisk blandekar med temperatur på 60 °C .	B2

Tabeller

4.1	Liste over målepunkter for tappevannskrets fra 15.01.19. Henviser til figur 4.1	16
4.2	Liste over målepunkter for datalogger. Henviser til figur 4.2	17
6.1	Liste over temperaturer som blir initiert fra csv-filen	31
6.2	Liste over funksjoner i simuleringsmodellen	32
7.1	Nøkkeltall for simulering med dimensjonerende volumstrøm	43
7.2	Nøkkeltall for simulering med varmeveksler på 200 kW	44
7.3	Nøkkeltall for simulering med ekstra varmtvannstank	46
7.4	Nøkkeltall for simulering med volumstrøm på 1,2 l/s	47
7.5	Nøkkeltall fra simuleringer med volumstrøm på 0,9 l/s i uke 17 og 18	53
7.6	Nøkkeltall fra simuleringer med settpunkt for turtemperatur på 55 °C for uke 13, 17 og 18	55
7.7	Nøkkeltall fra simuleringer med en ekstra varmeveksler i uke 13, 17 og 18	57
7.8	Nøkkeltall fra simuleringer med foreslått forbedringstiltak	59
E.1	Prisoverslag for installering av ekstra varmeveksler eller ekstra varmtvannstank	E1
F.1	Henvisninger til endringsmuligheter i Python-script	F1
F.2	Oppsett for validering av simuleringsmodell	F2
F.3	Oppsett for simuleringer med dimensjonerende volumstrøm	F3
F.4	Oppsett for simuleringer med en varmeveksler på 200 kW	F3
F.5	Oppsett for simuleringer med en ekstra varmtvannstank	F4
F.6	Oppsett for simuleringer med volumstrøm på 1.20 l/s	F5
F.7	Oppsett for simuleringer med pådrag på 0.90 l/s	F5
F.8	Oppsett for simuleringer med redusert turtemperatur	F6
F.9	Oppsett for simuleringer ekstra varmeveksler for forvarming	F7
F.10	Oppsett for simuleringer med regulering av foreslått forbedringstiltak	F7

Nomenklaturliste

4GFV Fjerde generasjon fjernvarme

\dot{m} Massestrøm

\dot{V} Volumstrøm

ρ Tetthet

A Areal

C_p Spesifikk varmekapasitet

CHP Combined heat and power plant (Kraftvarmeverk)

LMTD Logaritmisk temperaturdifferanse

LTFV Lavtemperatur fjernvarme

q Effekt

T Temperatur

t Tid

U Varmegjennomgangstall

v Fart

VVC Varmtvannssirkulasjon

z Høyde over nullpunkt

V Volum

1. Innledning

Bygninger står for 40 % av energiforbruket i Europa, og 75 % av disse bygningene har ineffektive energiløsninger (EuropeanCommission, 2019). For å forhindre negative effekter knyttet til unødvendig energiutslipp er en forbedring av energiløsninger i bygninger på sin plass. Flere studier konkluderer med at fjernvarme spiller en sentral rolle i fremtiden for å varme opp bygninger på en bærekraftig og energieffektiv måte (Tereshchenko and Nord, 2018)(Østergaard and Svendsen, 2017).

Fremtidens fjernvarmenett skal varmes opp av lavtemperatur fornybare energikilder og skal ha en turtemperatur på rundt 50 °C (Lund et al., 2014). Med slike temperaturer, må system for romoppvarming og tappevann prosjekteres riktig for å oppnå god komfort og for å unngå legionella i tappevannet (Østergaard and Svendsen, 2017).

Sykehuset Østfold Kalnes mottar fjernvarme fra Kalnes energisentral hvor en ammoniakk-varmepumpe utnytter bergvarme og varme fra fjernkjølenettet på sykehuset for å dekke varmebehovet. Turtemperaturen ligger på 60 °C, og ønsket returtemperatur på 40 °C. Sykehuset er med dette en interessant case å analysere.

1.1 Mål og gjennomføring

I masteroppgaven skal varmeanlegget både hos produsent og forbruker analyseres med hensyn på systemløsning og regulerings- og funksjonsbeskrivelse. Oppgaven skal ha hovedfokus på kundesentral for varme i Behandlingsbygg 08, hvor det skal gjøres målinger på krets for ventilasjonsvarme, radiatorvarme og tappevann. Målsettingen er å avdekke eventuelle system- eller driftsfeil ved anlegget og komme med konkrete forslag til forbedringer. Forbedringene skal begrunnes og dokumenteres ved hjelp av simuleringer.

Opgaven skal gjennomføres og vurderes etter disse deloppgavene:

1. Litteraturstudium av vannbårne systemløsninger og lavtemperatur fjernvarmenett
2. Utarbeide måleprogram, gjennomføre målinger og prestnere relevante analyser av målingene

3. Kartlegge og beskrive utfordringer med anlegget, samt utrede årsaker til disse
4. Utvikle en simuleringsmodell i Python og validere denne mot målinger
5. Gjennomføre simuleringer av foreslåtte endringer med bruk av utarbeidet simuleringsmodell
6. Skrive utkast til vitenskapelig paper fra hovedresultatene i oppgaven
7. Forslag til videreføring

2. Litteraturstudie

2.1 Fjernvarme fra da til nå

Fjernvarme ble først introdusert i USA på 1880 tallet med damp som varmebærer (Lund et al., 2014). Den høye damptemperaturen medførte høyt varmetap, returrørene korroderte ofte, og mennesker kunne bli kritisk skadde av dampekspløsjoner. Andre generasjon fjernvarme kom i bruk fra 1930 og baserte seg på trykksatt vann over 100 °C. Fra 1970 og utover kom tredje generasjons fjernvarme, og det er denne teknologien som er mest brukt i dag. Det varme vannet er fortsatt trykksatt, men temperaturen er som regel under 100 °C. Typiske komponenter er prefabrikkerte isolerte rør som graves direkte ned i jorda. Kundesentralene er mer kompakte og er ofte utformet med platevarmeveksler i rustfritt stål.

2.2 Fjerde generasjon fjernvarme (4GFV)

Fjerde generasjon fjernvarme (4GFV) er under utvikling og har som mål å tilby lavtemperatur varme, generert av lavtemperatur fornybare energikilder til lavenergibygninger gjennom et smart termisk nettverk med lave energitap hvor kunder både kan kjøpe og selge varme (Lund et al., 2014). En fullstendig definisjon på 4GFV er gitt av Lund, H. et al (Lund et al., 2014). 4GFV har siden begrepet ble definert i 2014 fått økt interesse i akademisk litteratur, og et fulltekstsøk på Sciencedirect etter «4th generation district heat» medførte 158 treff i januar 2019. Flere av disse artiklene tar for seg utfordringer med å implementere fremtidens fjernvarmeløsninger, hvor to av disse vil bli belyst i dette litteraturstudiet (Lund et al., 2014) (Tereshchenko and Nord, 2018).

1. Tilby lavtemperatur fjernvarme for romoppvarming og oppvarming av tappevann til eksisterende, renoverte og nye energieffektive bygninger
 - (a) Uten fare for legionella
 - (b) Uten å gå på bekostning av komfort

2. Muliggjøre utnyttelse av lavtemperatur varmekilder som spillvarme, geotermisk varme og solvarme.

2.2.1 Lavtemperatur fjernvarme (LTFV)

Selv om fremtidens bygninger vil ha et lavere energibehov, har bygninger lang levetid, og store deler av bygningsmassen vil derfor bestå av eldre bygninger (Lund et al., 2014). Turtemperaturren i fremtidens fjernvarmenett er forventet til å ligge rundt 50 °C, og det kan da stilles spørsmål om LTFV vil kunne dekke energibehovet i eldre bygninger. For å gjøre dette må turtemperaturren på fjernvarmen oppnå bygningers krav til romoppvarming og oppvarming av tappevann. (Østergaard and Svendsen, 2017).

Romoppvarming

Et dansk studie på radiatorsystemer i 1645 hus, viste at rundt 80 % av disse var overdimensjonerte, og konkluderte med at disse husene kunne varmes med turtemperaturer på under 60 °C (Østergaard and Svendsen, 2018). Et annet studie har vist det mulig med en generell turtemperatur på 45 °C (Østergaard and Svendsen, 2017). Det er altså flere studier som konkluderer med at fremtidens lavere turtemperaturer kan tilfredsstille eldre bygningers krav til romoppvarming. Likevel påpeker (Lund et al., 2018) at overgangen til LTFV bør skje stegvis, og at første steg bør være å oppnå lavere returtemperaturer før man reduserer turtemperaturren.

Oppvarming av tappevann

Oppvarming av tappevann er ansett som en av utfordringene ved LTFV da lave temperaturer gir god grobunn for legionellabakterien. Legionella er en infeksjon som angriper lungene og kan spre seg til flere organer i kroppen som blant annet leveren (Reichelt, 2005). Mennesker som er friske og får legionella har en dødlighet på omtrent 10 %, mens hos eldre kan dødligheten nå 30 %. Det er med andre ord meget viktig å forhindre legionella i tappevann.

Legionellabakterien vokser best i stillestående vann med temperaturer under 50 °C (Yang et al., 2016b), og det finnes mange systemløsninger for å forhindre legionella i varmtvannssystemer. I et studie på legionellasikre systemløsninger for LTFV foresåls volumbegrensing, lokal temperaturøking eller kjemisk behandling som mulige løsninger (Yang et al., 2016a). I

følge den tyske standarden W551 er systemer med et totalt vannvolum på 3L eller mindre ansett som et legionellasikkert system (DVGW, 2004). Et slikt system kan implementeres i desentraliserte kundesentraler for hver enkel leilighet i et leilighetskompleks hvor en varmeveksler varmer opp tappevannet direkte (ingen tank). Denne metoden fjerner behovet for en sirkulasjonskrets, og er ansett som den fremtidige løsningen for 4GFV (Lund et al., 2018).

En annen foreslått løsning er lokal temperaturøking av tappevann. Metoden går ut på å varme tappevannet lokalt i kundesentralene ved hjelp av elektrisitet eller mindre varmpumper. Med denne metoden, kan temperaturen på fjernvarmenettet styres etter behovet for romoppvarming. Det er derimot ansett som mest energi-, kostnads- og eksergieffektivt å ikke senke temperaturen på fjernvarmenettet så lavt at behovet for lokal oppvarming ved hjelp av elektrisitet oppstår (Lund et al., 2017) (Elmegaard et al., 2016).

I tillegg til temperaturbehandling, kan også tappevannet gjennomgå ulike kjemiske prosesser for å fjerne legionellabakteriene. En slik metode er kobber- og sølvionisering. Denne metoden er mye brukt i resirkuleringssystemer, og ble rapportert til å holde 16 sykehus legionellafrie i en femårs periode (Stout and Yu, 2003).

2.2.2 Utnytte lavtemperatur varmekilder i fjernvarme

I fremtidens fjernvarmenett skal varmen genereres av lavtemperatur fornybare energikilder. Dette skal gjøres ved å kombinere produksjon fra CHP, solvarme, geotermisk varme og utnytte spillvarme (Lund et al., 2014). Med lavere temperatur på fjernvarmenettet er mulighetene for å utnytte spillvarme større, men dette medfører også et mer komplekst fjernvarmenett. Lavere turtemperaturer medfører også at det er enklere å utnytte geotermisk varme i storskala varmpumper. Et finsk studie viser at varmpumper bør kunne stå for 10 - 25 % av varmeproduksjonen i det finske fjernvarmenettet, og konkluderer med at det er mest aktuelt med varmpumper i mindre fjernvarmeanlegg (Kontu et al., 2019). Ved å redusere tur og returtemperaturen på fjernvarmenettet vil man oppnå langt bedre virkningsgrad på varmpumper (Ploskic, 2013).

2.3 Oppvarming av tappevann i kundesentraler

I en kundesentral for varme veksles varme fra fjernvarmenettet (primærsiden) til forbrukeren (sekundærsiden). Det finnes mange ulike oppsett både for romoppvarming og oppvarming av

tappevann, og i dette kapitlet vil det bli presentert en metode for oppvarming av tappevann.

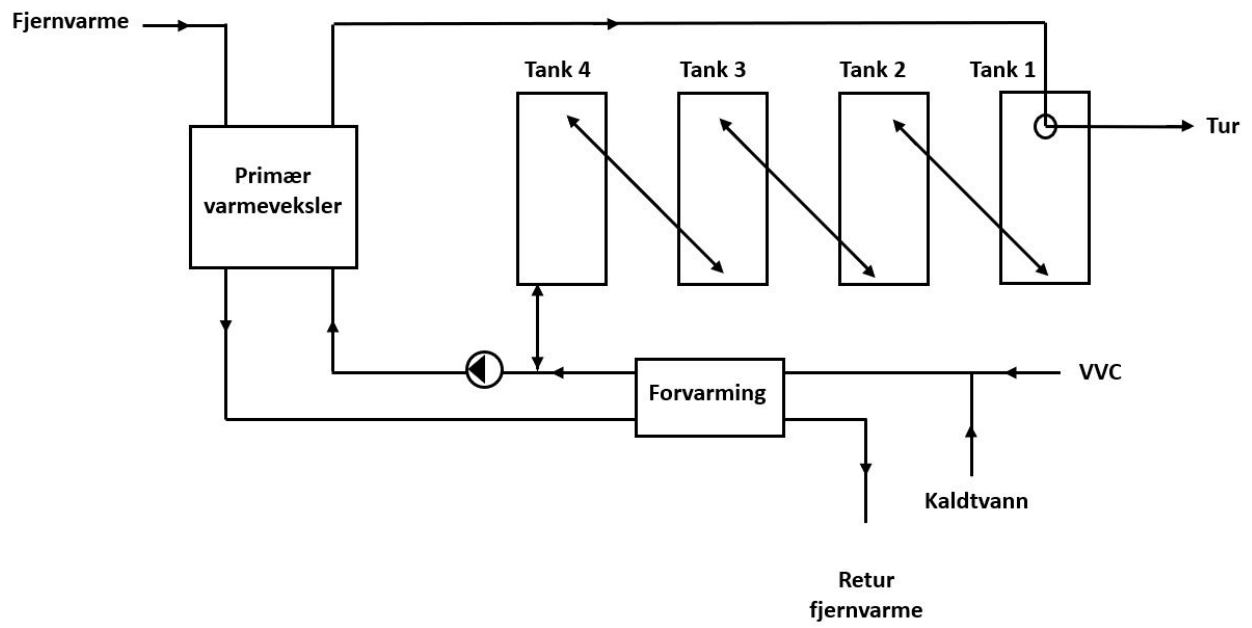
Direkte ladende system

I Et direkte ladende system er varmtvannstanker koblet i serie med utvendig eller innvendige rør (Zijdemans, 2012). Oppvarmingen av vannet kan enten gjøres direkte med varmeelement i en bereder, eller indirekte ved hjelp av en ekstern varmeveksler. Felles for disse to løsningene er at varmen fra berederen eller varmeveksleren er tilgjengelig under tapping av varmtvann. Dette medfører at det totale volumet på varmtvannstankene kan reduseres. I systemene som mottar varme fra ekstern varmeveksler er korrekt regulering av volumstrøm veldig viktig. Denne kan reguleres ved bruk av turtalsregulerte pumper, eller settes konstant. Ved konstant turtall er det viktig med god innregulering. Et slikt system oppnår vanligvis gode returtemperaturer om det er god sjikting i varmtvannstankene (Frederiksen and Werner, 2013).

Det ble gjort en innsats i å finne forskning på reguleringen av volumstrømmen. Søkeord som *frequency control*, *mass flow control* og *circulation* ble brukt i ulike kombinasjoner med *dhw*, *district heating* og *substation* uten hell. De fleste artiklene som tar for seg sekundærsiden av kundesentralene fokuserer på ulike systemløsninger tilpasset fremtidens fjenvarmenett som momentan oppvarming og temperatøkning ved bruk av varmepumper.

To-trinns oppvarming av tappevann

I Sverige har to-trinns oppvarming av tappevann vært mye brukt for å oppnå lavere returtemperatur (Frederiksen and Werner, 2013). Med denne metoden veksles varme fra to ulike varmevekslere ved suksessivt lavere temperaturnivå som vist i figur 2.1. De to varmevekslerene er koplet i serie på primærsiden slik at returtemperaturen blir så lav som mulig. Denne løsningen er dyrere og mer komplisert, og har etter hvert blitt mindre populær da fordelene ikke alltid rettferdiggjør kostnadene.



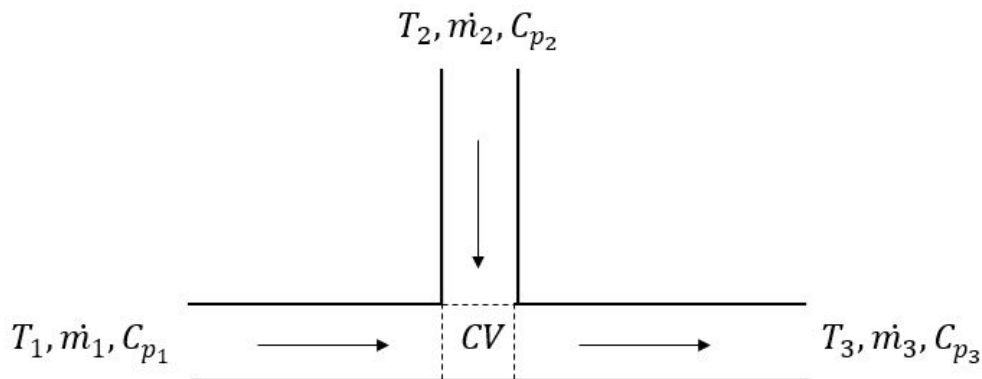
Figur 2.1: Systemskjema for forvarming av tappevann

3. Teori

I dette kapitlet presenteres beregningsmetoder for å beregne temperaturer i møtende vannstrømmer, temperaturendring i varmtvannstanker og en numerisk metode for å modellere en varmeveksler.

3.1 Temperatur i møtende vannstrømmer

Figur 3.1 viser to møtende vannstrømmer med ulik temperatur og massestrøm. Disse strømmingene blandes og fortsetter med en ny massestrøm og temperatur. For å beregne ny temperatur, T_3 settes det opp en energibalanse over kontrollvolumet.



Figur 3.1: Møtende vannstrømmer

Energibalansen for et kontrollvolum CV er gitt i ligning 3.1 (Moran et al., 2012). Ved å anta at kontrollvolumet ikke utfører arbeid eller avgir varme, kan leddene \dot{Q}_{cv} og \dot{W}_{cv} strykes. Leddet $\frac{v^2}{2}$ kan strykes da det er av størrelsesorden 0,1 mens h er av størrelsesorden 100. Høydeforskjellen i kontrollvolumet er også neglisjerbar, og da gjenstår kun leddene vist i ligning 3.2.

Entalpien, h er gitt av ligning 3.3 (Moran et al., 2012). For temperaturer mellom 0° C og 60° C varierer C_p meget lite, og antas derfor konstant. Ved å sette inn ligning 3.3 i 3.2 og anta at C_p er konstant, gjenstår ligning 3.4. Denne ligningen brukt på kontrollvolum CV i figur 3.1, kan løses for T_3 som vist i ligning 3.5.

$$0 = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_i \left(h_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i \right) - \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) \quad (3.1)$$

$$0 = \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_e \dot{m}_e h_e \quad (3.2)$$

$$h = C_p T \quad (3.3)$$

$$0 = \sum_i \dot{m}_i T_i - \sum_e \dot{m}_e T_e \quad (3.4)$$

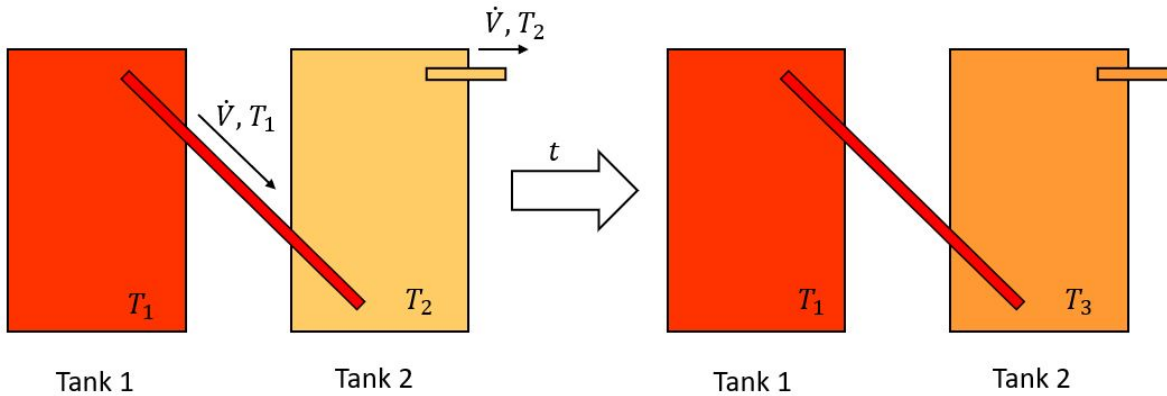
$$T_3 = \frac{\dot{m}_1 T_1 + \dot{m}_2 T_2}{\dot{m}_3} \quad (3.5)$$

3.2 Temperatur i varmtvannstanker

Figur 3.2 forestiller to tanker med volum V hvor det strømmes vann fra Tank 1 til Tank 2. Vannet i Tank 1 er varmere enn vannet i Tank 2, noe som er symbolisert med varmere farge. Vannet strømmes med en volumstrøm \dot{V} over en tid t . Volumet som strømmes fra Tank 1 til Tank 2, V_{12} , er gitt av ligning 3.6, og ved å anta full blanding, er temperaturen i Tank 2 etter tiden t gitt av ligning 3.7.

$$V_{12} = \dot{V} * t \quad (3.6)$$

$$T_3 = \frac{V_{12} * T_1 + (V - V_{12}) * T_2}{V} \quad (3.7)$$



Figur 3.2: Temperaturendring i varmtvannstanker

3.3 Numerisk modell for varmeveksler

Effekten som avgis av en varmeveksler kan beregnes etter ligning 3.8 (Kothandaraman and Subramanyan, 2006).

$$q = U * A * LMTD \quad (3.8)$$

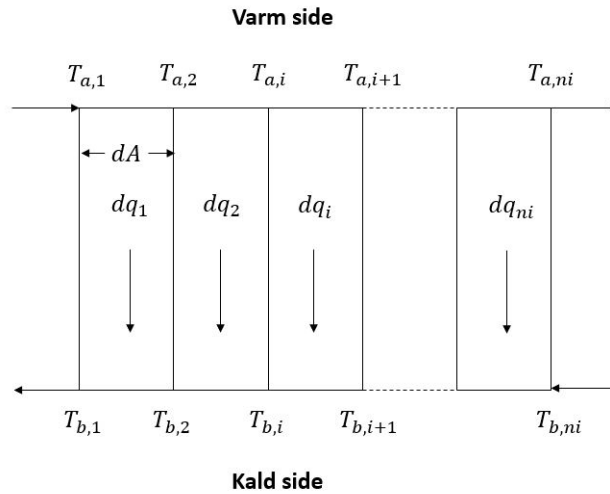
Ved å dele opp varmeveksleren i mange små arealer som vist i figur 3.3, kan det antas at $LMTD$ blir til ΔT , og ligningen for effekten som avgis i hvert del-areal er da gitt av ligning 3.9 (Kothandaraman and Subramanyan, 2006). Denne effekten kan benyttes til å beregne temperatur $T_{a,i+1}$ og $T_{b,i+1}$ ved hjelp av ligning 3.10 og 3.11.

$$dq_i = U dA (T_{a,i} - T_{b,i}) \quad (3.9)$$

$$T_{a,i+1} = T_{a,i} - \frac{dq_i}{m_a C_p} \quad (3.10)$$

$$T_{b,i+1} = T_{b,i} - \frac{q_i}{m_b C_p} \quad (3.11)$$

I enkelte tilfeller, er det kun inngangstemperatur på varm og kald side av varmeveksleren som er kjent. Metoden som er presentert over, kan da benyttes til å beregne temperaturforløpet i resten av varmeveksleren. Dette gjøres ved å gjette utganstemperaturen på kald side av



Figur 3.3: Modell av varmeveksler

varmeveksleren ($T_{b,1}$ på figur 3.3), beregne temperaturforløpet gjennom veksleren, og se om inngangstemperaturen på kald side stemmer overens med hva den skal være. Om avviket er større en valgt krav, må gjetting av utganstemperatur på kald side forbedres.

4. Metode

Målsettingen med denne masteroppgaven var å *Avdekke eventuelle system-eller driftsfeil ved anlegget på Sykehuset Østfold Kalnes, og gjennom modellering i Python komme med konkrete forslag til forbedringer.* Oppgaven skulle ha kundesentralen i Behandlingsbygg 08 som hovedfokus.

4.1 Gjennomføring av oppgaven

For å avdekke system- eller driftsfeil var det naturlig å snakke med driftspersonell på sykehuset og sette opp målinger på kundesentralen i Behandlingsbygg 08. En gjennomgang av disse målingene tydeliggjorde problemer med tappevannskretsen, og det ble derfor valgt å gjøre en nærmere analyse av denne. For å få en bedre forståelse av hva som forårsaket problemene på tappevannskretsen ble det satt opp en måleplan med flere målepunkter. Disse målingene ble brukt til å programmere og validere en simuleringsmodell av tappevannskretsen for å kunne teste ut ulike forslag til forbedringer. Et av forbedringstiltakene ble implementert på sykehuset, og resultater fra dette ga grunnlag for nye simuleringer og til slutt et endelig forbedringstiltak.

Det skulle også gis en enklere analyse av Kalnes energisentral. Denne analysen tar utgangspunkt i en masteroppgave skrevet om energisentralen våren 2017 (Ebnes and Hagen, 2017).

Gjennomføringen av masteroppgaven kan oppsummeres i følgende stegvise prosess:

1. Samtale med driftspersonell og befaring
2. Gjennomgang av masteroppgave på Kalnes energisentral
3. Analyse av målinger på ventilasjon-, radiator- og tappevannskrets i kundesentralen
4. Valg av tappevannskrets for nærmere analyse
5. Oppsett av måleplan og flere målepunkter på tappevannskretsen
6. Analyse av målinger og programmering av simuleringsmodell
7. Simuleringer

8. Test av første forbedringstiltak
9. Analyse av målinger fra første forbedringstiltak
10. Simuleringer
11. Forslag til endelig forbedringstiltak

4.1.1 Samtaler med driftspersonell og analysering av målinger

Driftspersonell som jobber med tekniske anlegg hver dag kan ha en god idé om hvor problemene på deres anlegg ligger. Det ble derfor opprettet og opprettholdt kontinuerlig kontakt med ingeniør i energi og klimateknikk, Jan Lervik på sykehuset. Samtidig ble det også satt opp målinger på krets for radiatorvarme, ventilasjonsvarme og tappevann på kundesentralen i Behandlingsbygg 08. Målepunkter, måleperiode og måleusikkerhet for disse er presentert i kapittel 4.2 og 4.3.

Jan Lervik var klar over problemene i tappevannskretsen og dette medførte en gjennomgang av målinger på kretsen. Mistanken ble bekreftet av målingene og det ble besluttet å gjøre en nærmere analyse av tappevannskretsen. Flere målepunkter ble satt opp på kretsen og en måleplan for minuttvise målinger i uke 13 gjennomført. Disse målingene var bakgrunn for å forstå problemene på tappevannskretsen og for å programmere en simuleringsmodell av kretsen. Målepunktene, måleplanen og måleusikkerhet blir gjennomgått i kapittel 4.2.

4.1.2 Simuleringer før test av første forbedringstiltak

Simuleringsmodellen ble programmert med bakgrunn i målinger fra uke 13. Disse målingene ble også sammenlignet med resultatene fra simuleringsmodellen for å validere modellen. En fullstendig forklaring av programmering og oppbygging av simuleringsmodellen er presentert i kapittel 6. Her blir også svakheter ved denne gjennomgått.

Da det skulle foreslås et forbedringstiltak på sykehuset, var det passende å teste ut ulike muligheter i en simuleringsmodell før de ble gjennomført. Sykehuset var tross alt i full daglig drift, og det var lite ønskelig å gjøre direkte testing på anlegget. Simuleringene som førte til det første forbedringstiltaket ble gjort med bakgrunn i målinger fra uke 13. Det ble altså antatt at tappevannsforbruket var relativt likt fra uke til uke. Dette er en klar svakhet ved metoden,

som ga utslag i mindre gode resultater fra forbedringstiltaket. Simuleringsscenarioene som førte til det første forbedringstiltaket var følgende:

Dimensjonerende volumstrøm over varmeveksleren

Ved oppgavens start var volumstrømmen over varmeveksleren på sekundærsiden satt til over det dobbelte av hva den er dimensjonert for. Som nevnt i teorikapittel 2.3 er denne volumstrømmen avgjørende for hvordan kretsen presterer. Et naturlig valg var derfor å gjøre en simulering med dimensjonerende volumstrøm over varmeveksleren.

Ekstra varmtvannstank og større varmeveksler

For å analysere om kretsen var underdimensjonert ble det gjort simuleringer både med en ekstra varmtvannstank og med en større varmeveksler.

Annen volumstrøm over varmeveksleren

I tillegg til å simulere med dimensjonerende volumstrøm over varmeveksleren, ble det gjort simuleringer med ulik volumstrøm for å se hvordan dette påvirket kretsen.

4.1.3 Gjennomføring av forbedringstiltak og analyser av dette

Med bakgrunn i simuleringene nevnt i delkapittel 4.1.2, ble det gjennomført en endring av volumstrømmen over varmeveksleren på sekundærsiden ved å justere pådraget på en pumpe. Målinger etter gjennomføring av dette forbedringstiltaket viste at det ikke var spesielt suksessfullt, og nye simuleringer ble derfor gjort for å komme med et bedre forbedringstiltak.

4.1.4 Simuleringer før endelig foreslåtte forbedringstiltak

Simuleringene som ble gjort før endelige foreslåtte forbedringstiltak ble gjort med bakgrunn i målinger på uke 13, 17 og 18. I tillegg til å ta hånd om problemene med turtemperaturen ble det også sett på muligheter for å oppnå bedre returtemperatur på primærsiden. Simuleringene som ble gjennomført var:

Annen volumstrøm over varmeveksleren

Som nevnt over, er volumstrømmen over varmeveksleren viktig. Det ble derfor gjort simuleringer med ulik volumstrøm over varmeveksleren.

Forvarming med ekstra varmeveksler

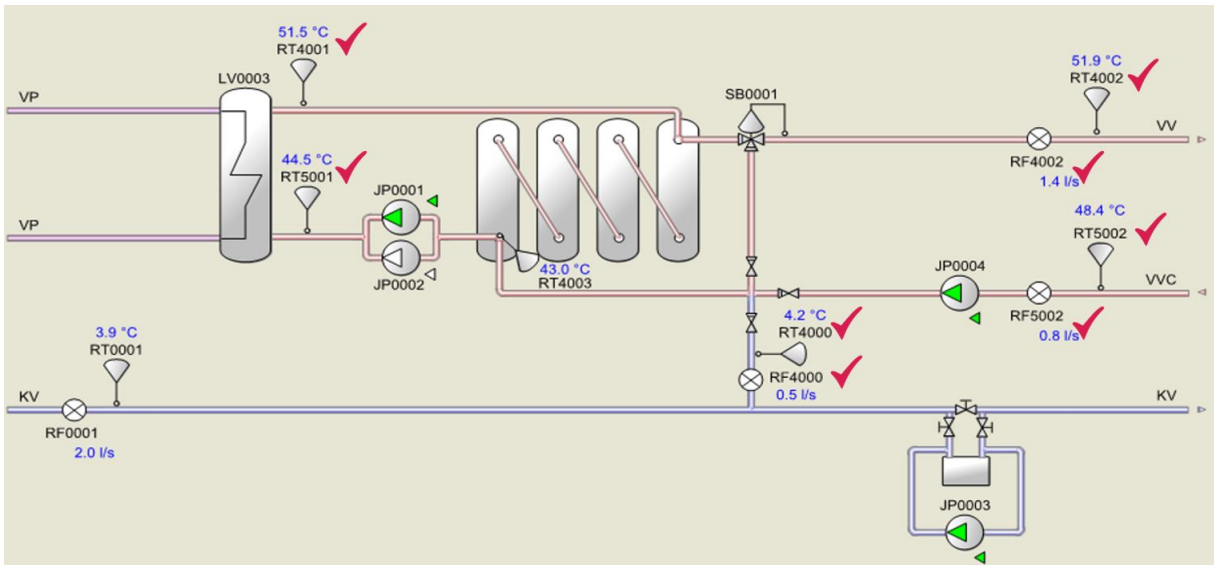
Av teorien i kapittel 2.3 kommer det frem at forvarming av tappevann i en to-trinns løsning kan medføre bedre returtemperatur. Det ble derfor gjort en simulering med en ekstra varmeveksler koplet i serie med hovedvarmeveksleren på primærsiden.

Nedjustering av settpunkt på turtemperatur

En reduksjon av turtemperaturen var allerede testet ut på et annet bygg på sykehuset. Dette hadde gitt positive resultater, og var derfor en aktuell simulering å gjennomføre også på tappevannskretsen i Behandlingsbygg 08.

4.2 Målinger på krets for tappevann

Tappevannskretsen i Behandlingsbygg 08 er utstyrt med flere målepunkter og et dataprogram fra Schneider hvor man kan velge hva man ønsker å måle. Fra og med 15.01.19 ble det satt i gang målinger på tappevannskretsen med en samplingsfrekvens på 10 minutter. De aktuelle målepunktene er vist med rød hake i figur 4.1 og listet opp i tabell 4.1. Det viste seg etter hvert at en samplingsfrekvens på 10 minutter var for grovt både for å forstå driftssituasjonen, og for å kunne programmere en modell av kretsen, og det ble derfor satt opp en plan for en måleperiode med høyere samplingsfrekvens. I tillegg til de eksisterende målingene, ble det satt opp flere målepunkter på kretsen. Målepunktene plassering er vist i figur 4.2 og forklart i tabell 4.2. Disse målingene ble gjort med en datalogger.



Figur 4.1: Målepunkter for tappevannskrets fra 15.01.19

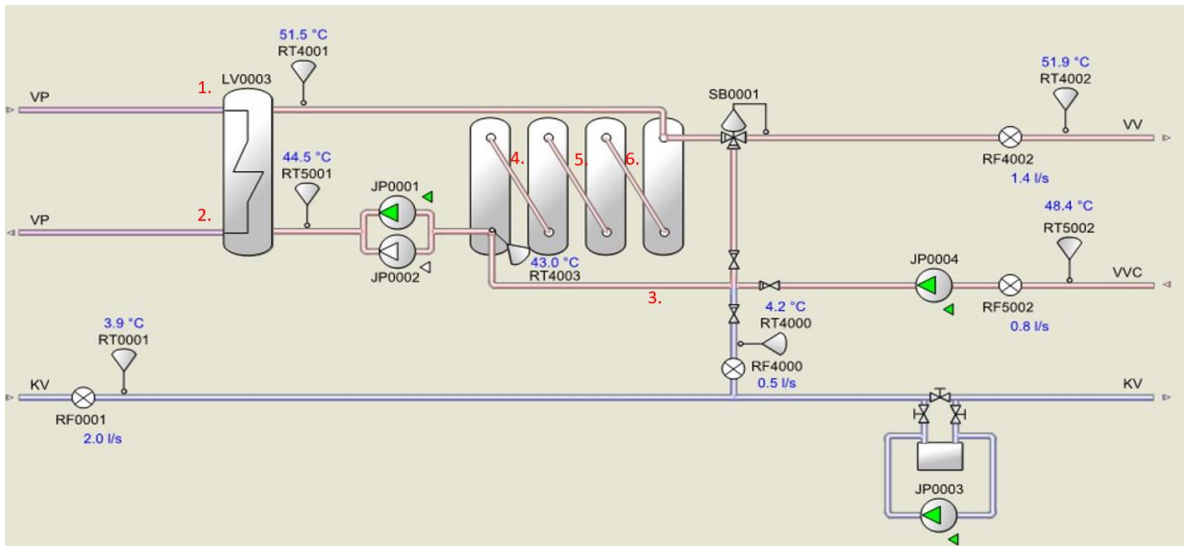
Tabell 4.1: Liste over målepunkter for tappevannskrets fra 15.01.19. Henviser til figur 4.1

Målepunkt	Plassering
RT 4001	Turtemperatur ut fra veksler
RT 5001	Returtemperatur inn på veksler
RT 4002	Turtemperatur varmtvann
RF 4002	Volumstrøm varmtvann
RT 5002	Temperatur sirkulasjon
RF 5002	Volumstrøm sirkulasjon
RT 4000	Temperatur kaldtvann
RF 4000	Volumstrøm kaldtvann

4.2.1 Måleperiode, måleinstrument og måleusikkerhet

Målingene som ble brukt til å programmere og validere simuleringmodellen, samt analysere problemene på tappevannskretsen ble gjort over en periode på én uke med en samplingsfrekvens på ett minutt. Loggingen fortsatte etter denne uken, og ble senere brukt både til å analysere virkning av forbedringstiltak og som bakgrunn for nye simuleringer. Målingene ble gjort både med Schneider sitt system og med hjelp av en datalogger.

Dataloggeren er av typen PicoLog 6 som med hjelp av thermocouples måler temperaturer



Figur 4.2: Målepunkter for datalogger

Tabell 4.2: Liste over målepunkter for datalogger. Henviser til figur 4.2

Målepunkt	Forklaring
1.	Tur primærside av veksler
2.	Retur primærside av veksler
3.	Etter blanding av kaldtvann og sirkulasjon
4.	Mellom tank 1 og 2 sett fra venstre
5.	Mellom tank 2 og 3 sett fra venstre
6.	Mellom tank 3 og 4 sett fra venstre

og skriver resultatene til en csv-fil. Loggeren har en nøyaktighet gitt av ligning 4.1, noe som medfører en målefeil på $\pm 1,10$ K til $\pm 1,17$ K for temperaturer mellom 30 °C og 60 °C (picoTechnology, 2018).

Temperaturmålerne til Schneider er av typen STP100, og har en måleusikkerhet på $\pm 0,3$ K til $\pm 0,9$ K ved temperaturer fra 25 °C til 70 °C (Schneider, 2013). Målerene for volumstrøm i tappevannskretsen er en ultralydmåler av typen Multical 62. Den har en usikkerhet på ± 3 % for temperaturer mellom 30 °C og 90 °C (Kamstrup, 2018).

$$T = \sum (\pm T_{Log} * 0,02\% \pm 0,5^{\circ}C) \quad (4.1)$$

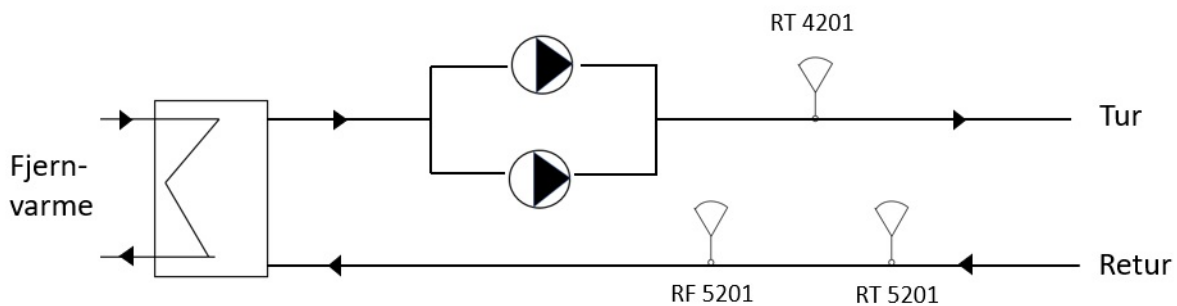
Oppsett og montering av dataloggeren

For å se om dataloggeren målte korrekte verdier, ble alle målepunktene testet i et termisk sirkulasjonskar av typen HAKE N2 for 28 °C, 40 °C, 50 °C og 60 °C. Grafene fra disse målingene er presentert i vedlegg B. Alle målingene som ble gjort var innenfor spesifikasjonen på dataloggeren nevnt over, og det ble derfor ikke gjort korrigeringer av målingene som ble gjort på sykehuset. For å oppnå best mulig målinger, ble målepunktene plassert under isolasjonen på rørene med minst 10 cm kontakt mellom ledning og rør.

4.3 Målinger på radiatorkrets og krets for ventilasjonsvarme

I tillegg til å gjøre målinger på tappevannskretsen i Behandlingsbygg 08 ble det også gjort målinger på radiatorkretsen og krets for ventilasjonsvarme. Disse målingene ble brukt for å gjøre en enkel analyse av kretsene og for å begrunne at tappevannskretsen var mest aktuell å modellere.

Målingene på ventilasjonskretsen og krets for radiatorvarme ble satt i gang den 25.12.18 og ble hentet inn med hjelp av energimåler Multical 602. Energimåleren ble satt opp til å logge turtemperatur (RT 4201), returtemperatur (RT 5201) og volumstrøm (RF 5201) som vist i figur 4.3. Det ble valgt en samplingstid på 10 minutter, og måleusikkerheten var henholdsvis $\pm 0,35$ K og $\pm 0,25$ K for radiatorkrets og krets for ventilasjonsvarme (Kamstrup, 2017).



Figur 4.3: Plassering av målepunkt i radiator- og ventilasjonskrets

5. Kalnes energisentral og kundesentralen i Behandlingsbygg 08

Sykehuset Østfold Kalnes mottar fjernvarme og fjernkjøling fra Kalnes energisentral som ligger 400 meter unna sykehuset. Dette kapittelet gir en enkel forklaring på oppbygging og drift av energisentralen og kundesentralen i Behandlingsbygg 08. Videre presenteres resultater fra målinger på kundesentralen og gjennom en enkel analyse av disse begrunnes det hvorfor tappevannskretsen var naturlig å modellere.

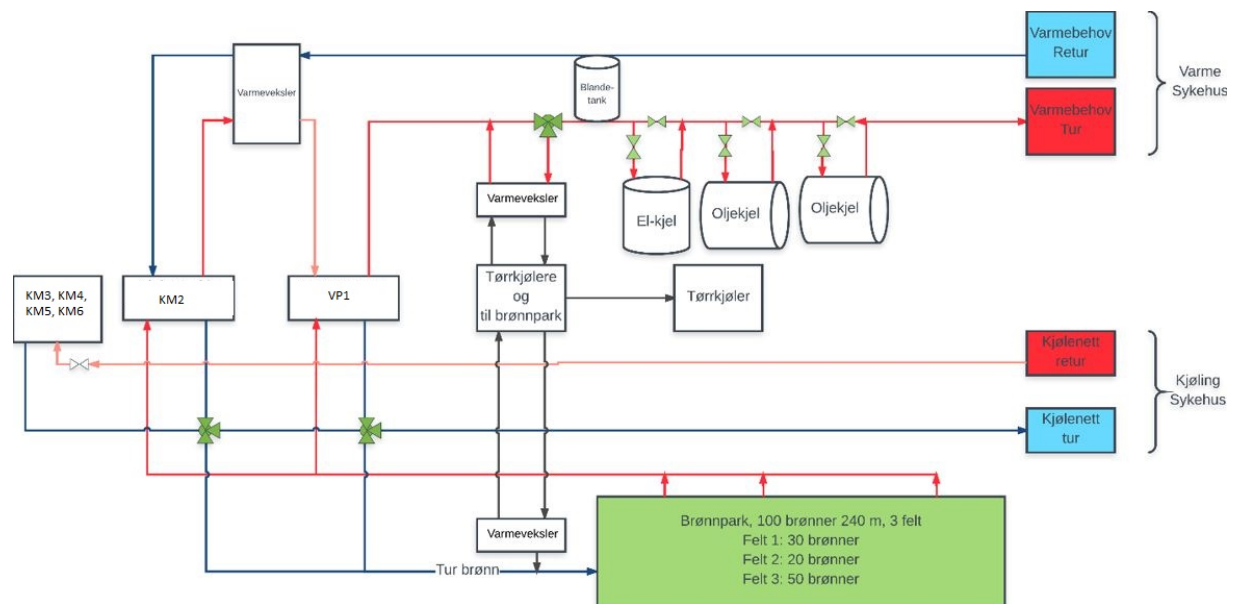


Figur 5.1: Kalnes Energisentral, foto: privat

5.1 Forenklet oppbygging og drift av Kalnes energisentral

Figur 5.2 er hentet fra en masteroppgave på Kalnes energisentral, og viser forenklet oppbygging av energisentralen (Ebnes and Hagen, 2017). Fullstendig systemskjema ligger i vedlegg

D. Av figuren kan man se at energisentralen består av seks kjølemaskiner. To av disse, VP1 og KM2, leverer varme til sykehusets fjernvarmeanlegg. De resterende fire kjølemaskinene, KM3, KM4, KM5 og KM6 bidrar til prosesskjøling og dumper overskuddsvarmen til luft. VP1 og VP2 henter varme fra brønnparken bestående av 100 energibrønner og/eller fra returvannet i kjølekretsen til sykehuset. I tillegg til varmepumpene er det installert en el-kjel og to oljekjeler for å ta hånd om spisslast.



Figur 5.2: Forenklet systemskjema over Kalnes Energisentral (Ebnes and Hagen, 2017)

5.1.1 Overordnet varmebehov

Når behovet for varme er størst, reguleres VP1 mot settpunkt for fjernvarmenettet. Varme hentes fra returledning på fjernkjølenettet så fremt denne er tilstrekkelig. Om behovet er større, åpnes ventil mot energibrønner, slik at VP1 i tillegg henter varme derfra. Når ventilen er 100 % åpen mot brønnpark, og VP1 ikke dekker varmebehovet, kobles KM2 inn. Kondensatoren på KM2 er via en indirekte krets koblet i serie inn på kondensatoren på VP1, og bidrar til forvarming av vannet. Er ikke dette tilstrekkelig til å dekke varmebehovet, kobles el-kjel eller oljekjeler inn som spisslast. Valg av kjel blir gjort på bakgrunn av hva som er mest kostnadseffektivt av elektrisitet eller olje.

5.1.2 Overordnet kjølebehov

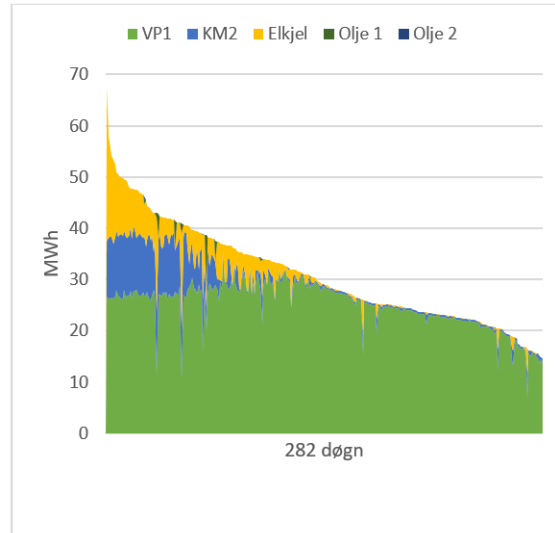
Når kjølebehovet er størst, kapasitetsreguleres VP1 mot settpunkt for fjernkjølenettet. Fordamperen på VP1 kjøler da ned frostvæsken i fjernkjølekretsen. Når dette ikke gir tilstrekkelig kjøling, koples KM2 inn, så KM3 osv. Varme fra kondensatorene til VP1 og KM2 leveres ut på fjernvarmenettet eller dumpes til brønnparken. Om temperaturen på kollektorvæsken i brønnparken blir for høy, avgis varme til uteluften via tørrkjølere.

5.1.3 Masteroppgave på Kalnes energisentral

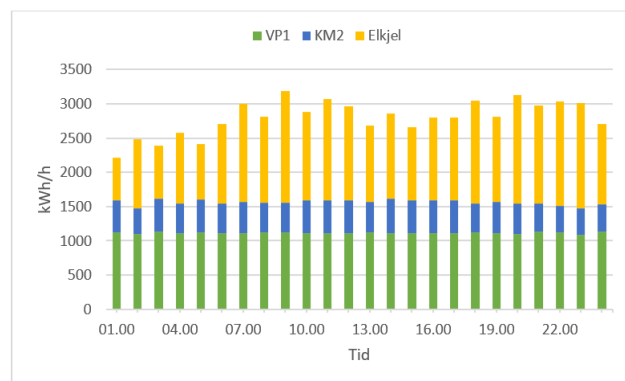
I 2017 ble det gjennomført en masteroppgave på Kalnes energisentral av studentene Kristian Ebnes og Emil Hagen fra Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (Ebnes and Hagen, 2017). Målet med oppgaven var å analysere driften av Kalnes energisentral for å klargjøre hvilke kriterier som måtte ligge til grunne for optimal drift. Dette ble gjort ved å analysere loggdata fra mars 2016 til februar 2017. I oppgaven ble det satt en systemgrense ved energisentralens tur- og returledning for fjernvarme. Grafer, resultater og funn som presenteres i delkapittel 5.1.3 er utelukkende hentet fra denne masteroppgaven.

Varmeproduksjon

Figur 5.3 viser varighetskurven for varmeproduksjon fra tilgjengelige målte data over 282 døgn. Fra masteroppgaven fremkommer det at VP1 produserer 81 % av det årlige varmebehovet, mens KM2 produserer 10 % og el-kjelen produserer 9 %. De to oljekjelene står kun for en beskjeden andel av varmeproduksjonen. VP1 produserer i store deler av året nok energi til å dekke hele varmebehovet, mens KM2 og el-kjelen kobles inn ved behov. Av varighetskurven i figur 5.3 kan det se ut som at el-kjelen produserer unødvendig mye varme, og at en større andel av denne varmen burde blitt produsert fra KM2. I masteroppgaven foreslås det at grunnen til dette er en dellastbegrensning på KM2, og at returtemperaturen fra fjernvarmenettet til sykehuset er for høy. Om denne temperaturen overkommer 48 °C, skrus KM2 av, og det varmebehovet som ikke dekkes av VP1 må dekkes av el-kjel. Figur 5.4 viser effektuttak fra VP1 og KM2 for et representativt døgn i januar. Som man kan se, produserer VP1 for det meste godt over 1000 kW, mens KM2 ligger på rundt 600 kW, og er generelt langt under sin maksimale effektproduksjon på 1030 kW. En reduksjon av returtemperaturen på fjernvarmenettet ville derfor vært fordelaktig for energisentralen.



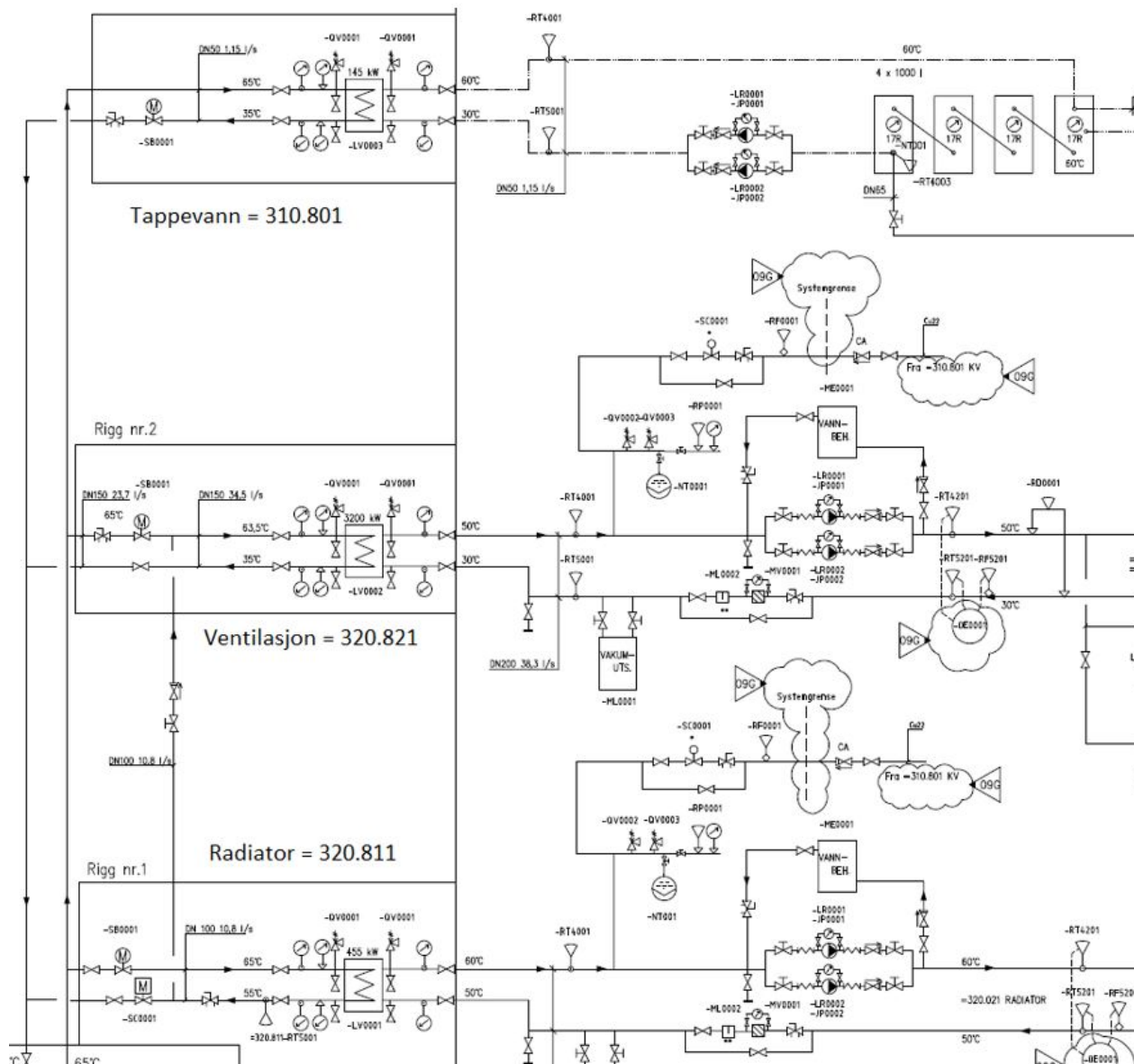
Figur 5.3: Varighetskurve for varmeproduksjon (Ebnes and Hagen, 2017)



Figur 5.4: Effektuttak 5. januar 2017 (Ebnes and Hagen, 2017)

5.2 Oppbygging og drift av kundesentralen i Behandlingsbygg 08

Figur 5.5 viser et utdrag fra systemskjemaet for kundesentral i behandlingsbygg 08. Som systemskjemaet viser, veksles varme fra fjernvarmenettet til tre kretser: Radiatorkrets, krets for ventilasjonsvarme og krets for tappevann. Fullstendig systemskjema ligger i vedlegg C.



Figur 5.5: Utdrag fra systemskjema for kundesentral i bygg 08

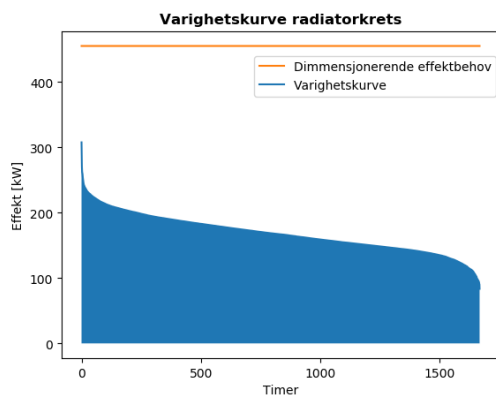
5.2.1 Radiatorkrets 320.811

Varmt vann fra turledningen på fjernvarmen sendes inn på varmeveksler -LV0001 mot radiatorkretsen og avgir varme til sekundærsiden. Varmeveksleren er dimensjonert for å kunne avgi 455 kW. På sekundærsiden står temperaturføler -RT4001 som måler temperaturen ut fra varmeveksleren. Denne temperaturen reguleres mot et settpunkt basert på en utetemperaturkompensert reguleringskurve vist i figur 5.7. For å oppnå ønsket temperatur justeres

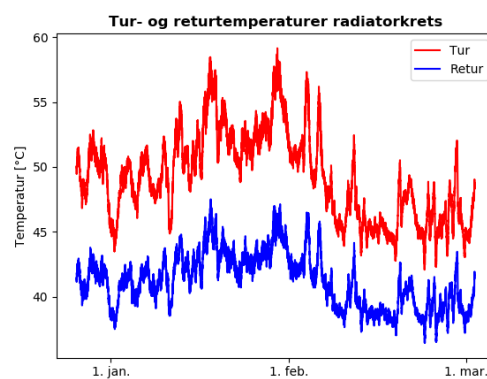
ventilmotor -SB0001 slik at massestrømmen på primærsiden endres. Pumpene -JP0001 og -JP0002 er frekvensregulerte og jobber alternerende for å oppnå et konstant differensialtrykk i radiatorkretsen.

Målinger på radiatorkretsen ble satt i gang 25.12.18 og er vist i figurene under. Figur 5.6a viser varighetskurven for radiatorkretsen plottet opp mot dimensjonerende effektbehov. Gjennomsnittlig målte effektbehov lå på 168 kW, mens maksimalt effektuttak lå på 307 kW. Av figuren ser man at dette er lavere enn dimensjonerende effektbehov.

Figur 5.6b viser tur- og returtemperaturer i radiatorkretsen fra 25.12.18 til 05.03.19, og figur 5.7 viser disse plottet med hensyn på utetemperatur. Gjennomsnittlig ΔT ligger på 8 K, 2 K lavere enn hva kretsen ble dimensjonert for. Turtemperaturen følger reguleringskurven fra $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ til rundt $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, men ligger en del over valgte settpunkt ettersom utetemperaturene øker. Alt i alt leverer kretsen tilnærmet som forventet, og det har ikke kommet inn klager på at det er for kaldt i bygget. En nærmere analyse av radiatorkretsen vil ikke bli gjort.

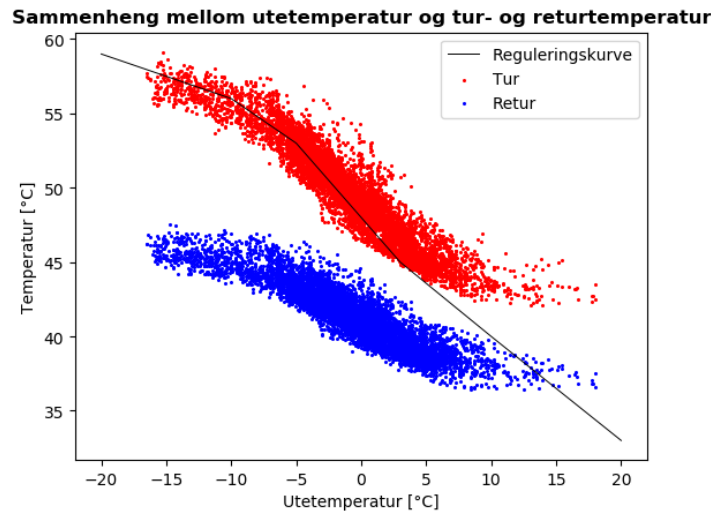


(a) Varighetskurve



(b) Tur- og returtemperaturer

Figur 5.6: Varighetskurve og kurve for tur- og returtemperaturer på radiatorkretsen fra 25.12.18 til 05.03.19



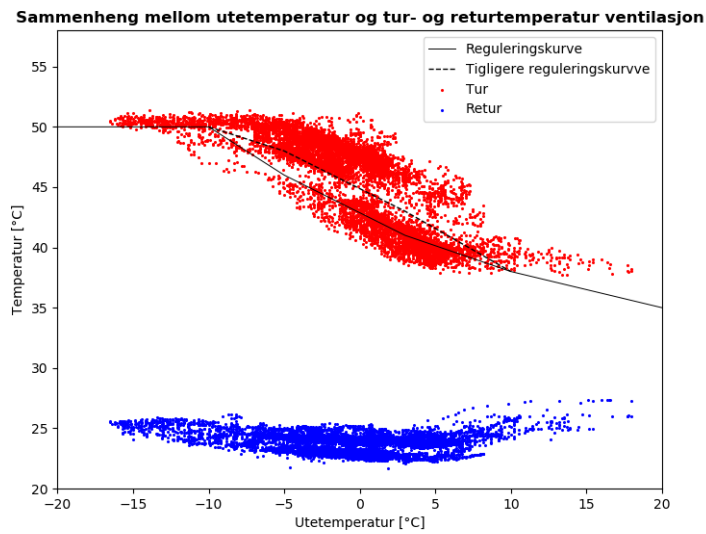
Figur 5.7: Sammenheng mellom utetemperatur og tur- og returtemperatur for radiatorkretsen fra 25.12.18 til 05.03.19

5.2.2 Krets for ventilasjonsvarme 320.821

Krets for ventilasjonsvarme mottar varme fra varmeveksler -LV0002. For å oppnå ønsket turtemperatur justeres ventilmotor -SB0001 på primærsiden slik at en større/mindre vannmengde strømmer over varmeveksleren. I tillegg til denne reguleringen, kan også varmt vann strømme direkte fra returen på primærsiden av radiatorkretsen. Dette skal gjøres når settpunkt for turtemperatur på ventilasjonskretsen er lavere enn returtemperaturen på primærsiden av radiatorkretsen og vil bidra til bedre returtemperatur på fjernvarmen. Pumpene -JP0001 og -JP0002 er frekvensregulerte og jobber alternerende for å opprettholde et konstant differensialtrykk. Ventilasjonskretsen inneholder også krets for snøsmelting og gulvvarme. Disse er henholdsvis dimensjonert for 100 kW og 70 kW og blir ikke sett nærmere på i denne oppgaven.

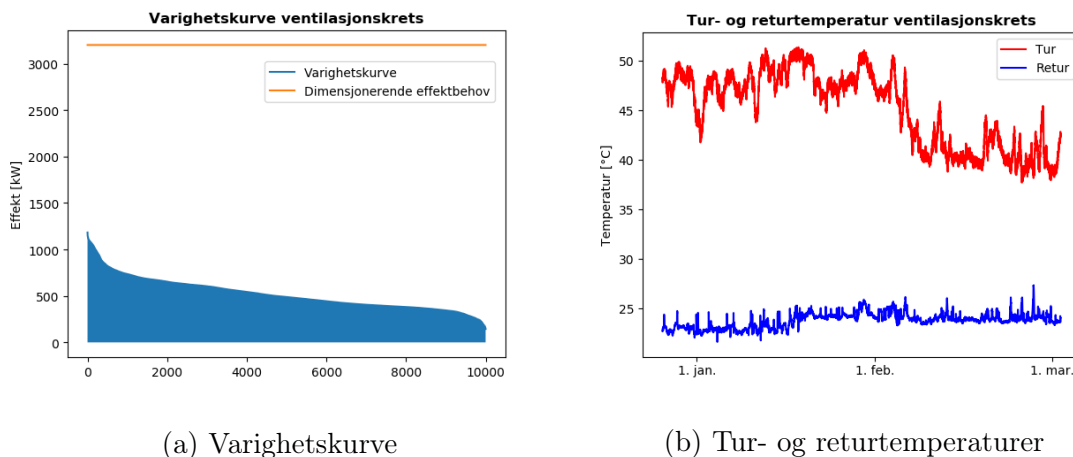
Settpunkt for turtemperatur på ventilasjonskretsen er utetemperaturkompensert, og reguleringskurven(e) er vist i figur 5.8. Reguleringskurven ble justert ned den 05.02.19 og det er derfor vist to kurver i figuren. Som man kan se, følger målingene den nåværende reguleringskurven ganske bra, mens turtemperaturen ligger noe over den tidligere reguleringskurven.

Figur 5.9a viser varighetskurven for ventilasjonskretsen fra 25.12.18 til 05.03.19 plottet med dimensjonerende effektbehov. Som man kan se av figuren, er dimensjonerende effektbehov langt høyere enn maksimalt forbruk. Dette problemet ble sett på i en prosjektoppgave, hvor konklusjonen var at kretsen var tydelig overdimensjonert (Prestvold, 2018).



Figur 5.8: Sammenheng mellom utetemperatur og tur- og returtemperatur for ventilasjonskrets fra 25.12.18 til 05.03.19

Figur 5.9b viser målt tur- og returtemperatur på ventilasjonskretsen fra 25.12.18 til 05.03.19. Med en gjennomsnittlig returtemperatur på 23,8 °C på sekundærsiden og en gjennomsnittlig ΔT på 21,4 °C er det mindre grunn til å tro at denne kretsen bidrar til høy returtemperatur på primærsiden.



(a) Varighetskurve

(b) Tur- og returtemperaturer

Figur 5.9: Varighetskurve og kurve for tur- og returtemperaturer på ventilasjonskretsen fra 25.12.8 til 05.03.19

5.2.3 Krets for tappevann 310.801

Da denne kretsen ble valgt som simuleringstilfelle, er forklaring av oppbygging og virkemåte mer detaljert enn tidligere i dette kapittelet.

Tappevannskretsen i Behandlingsbygg 08 er av typen direkte ladende system som er forklart i delkapittel 2.3. Dimensjonerende volumstrøm over varmeveksleren er 1,15 l/s noe som etter systemskjemaet skal løfte temperaturen 30 K. Denne volumstrømmen styres av pumpe JP0001 og JP0002 som ved oppgavens start var satt til et konstant pådrag tilsvarende en volumstrøm på 2,6 l/s. Disse pumpene jobber alternerende annenhver uke, og har muligheten til å frekvensreguleres. Settpunkt for ønsket turtemperatur var satt til 58 °C grader, men sykehuset godtar temperaturer ned til 54 °C. Ved nærliggende temperaturer er det som nevnt i kapittel 2.2.1 mulighet for vekst av legionella. Dette er ikke et problem på sykehuset da vannet blir kjemisk behandlet ved hjelp av et system kalt Anodix.

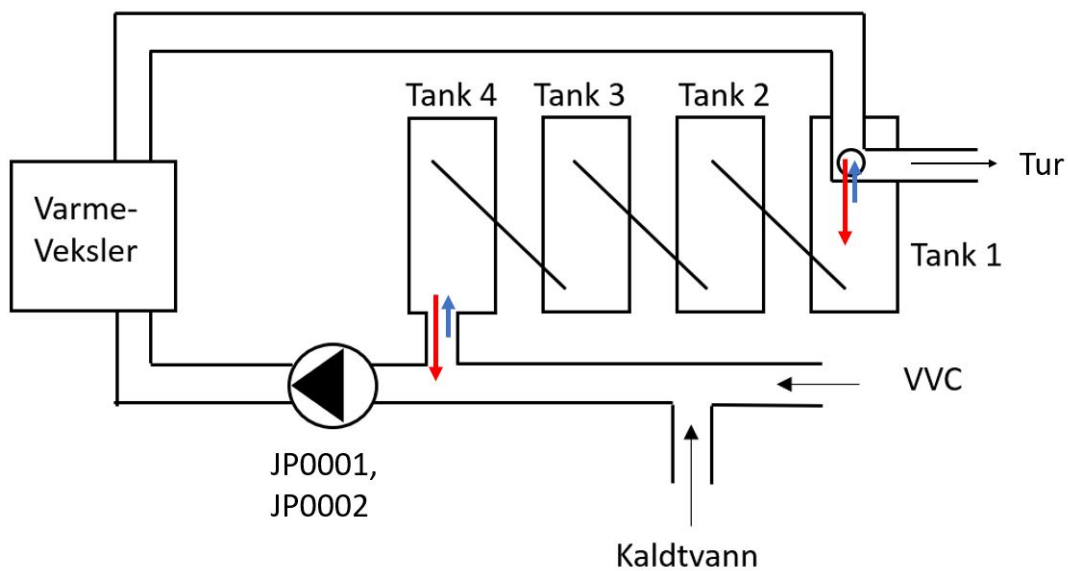
I kretsen står det fire tanker på 1000 l hver for å takle et varierende tappevannsbehov. Disse tankene er ikke utstyrt med varmeelement, og kretsen er derfor avhengig av at varmeveksleren dekker hele varmebehovet. I oppgaven vil disse tankene henvises til som Tank 1, Tank 2, Tank 3 og Tank 4 som vist på figur 5.10. Etter tankene står det en termostatisk blandeventil som sikrer at korrekt turtemperatur ikke overstiger 62 °C. En sirkulasjonskrets av varmtvann, heretter kaldt VVC, sikrer at forbruker får varmt vann i springen innen rimelig tid, og fører vann tilbake til kundesentralen. VVC blandes her med kaldtvann før blandingen strømmer inn i Tank 4, over varmeveksleren eller gjennom den termostatiske blandeventilen ut fra behovet i kretsen.

Forbruksmodus

Når det tappes vann i Behandlingsbygg 08, må tilsvarende volum tilføres som kaldtvann. Om behovet øker, vil volumstrømmen på blandingen av kaldtvann og VVC øke og temperaturen på denne blandingen synke. Overstiger denne volumstrømmen som pumpe JP0001/JP0002 fører over varmeveksleren, vil noe av blandingen føres inn i Tank 4. Dette er vist med blå pil på figur 5.10 Volumstrømmen på vannet som strømmer inn i Tank 4 er differansen mellom volumstrømmen som strømmer over varmeveksleren og volumstrømmen på blandingen av kaldtvann og VVC. Denne volumstrømmen må nødvendigvis også strømme ut av Tank 1, og turtemperaturen blir dermed en blanding av varmt vann fra Tank 1 og vann som strømmer ut fra varmeveksleren. Det forklarte tilfellet omtales i oppgaven som at kretsen er i *forbruks-*

modus, og at tankene *tømmes*. Det at tankene *tømmes* henviser til at tankene suksessivt kjøles ned på grunn av at mer og mer vann med lavere temperatur strømmer inn i Tank 4. I virkeligheten vil tankene til enhver tid være fulle av vann.

Volumstrømmen ut på turledningen er den samme som volumstrømmen på blandingen av kaldtvann og VVC. På samme måte som at tankene er i forbruksmodus når volumstrømmen på blandingen av VVC og kaldtvann er høyere enn volumstrømmen over varmeveksleren, vil tankene være i forbruksmodus når volumstrømmen på turledningen er høyere enn volumstrømmen over varmeveksleren.



Figur 5.10: Forenklet systemskjema av tappevannskretsen

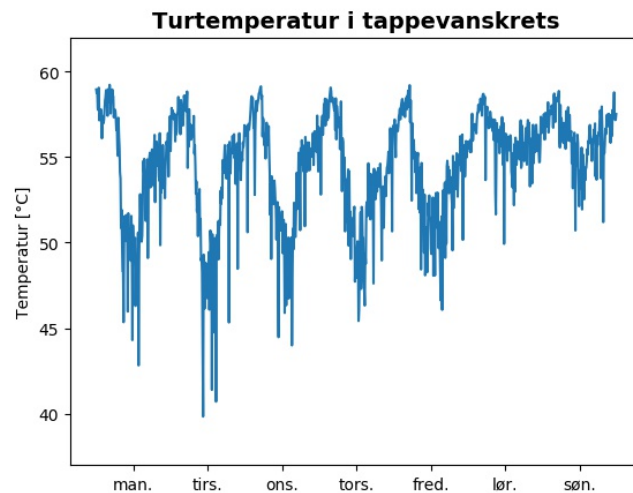
Lademodus

Er volumstrømmen på blandingen av VVC og kaldtvann lavere enn den som strømmer over varmeveksleren, vil vann hentes fra Tank 4. Den samme volumstrømmen som hentes fra Tank 4 fylles på i Tank 1 av vann ut fra varmeveksleren. Turtemperaturen vil da ha samme temperatur som vannet som strømmer ut av varmeveksleren. Dette tilfellet omtales som *lademodus* eller at tankene *fylles* og er vist med rød pil på figur 5.10. På samme måte som i forrige avsnitt, vil tankene også være i lademodus dersom volumstrømmen over varmeveksleren overstiger volumstrømmen på turledningen.

Problemer med tappevannskretsen

Driftspersonell på sykehuset hadde før oppgavens start oppdaget problemer med tappevannskretsen. Flere alermer på lav turtemperatur hadde gått, og det var en mistanke om at returtemperaturen på primærsiden av varmeveksleren varierte i stor grad og var for høy. I tillegg var det også en mistanke om at ventilmotor -SB0001 ikke regulerte, men at den til enhver tid sto åpen.

Målinger på krets for tappevann ble satt i gang den 15.01.19 og viste tidlig at settpunkt på 58 °C ikke ble opprettholdt. Figur 5.11 viser målt turtemperatur på tappevannet i uke 5. Som figuren viser, varierer temperaturen over hvert døgn. Maksimal registrerte turtemperatur lå på 59,2 °C og den minste på 39,8 °C. Med turtemperaturer under 40 °C, og en mistanke om at kretsen bidro til for høye returtemperaturer på fjernvarmesiden ble tappevannskretsen i Behandlingsbygg 08 et naturlig valg for modellering.



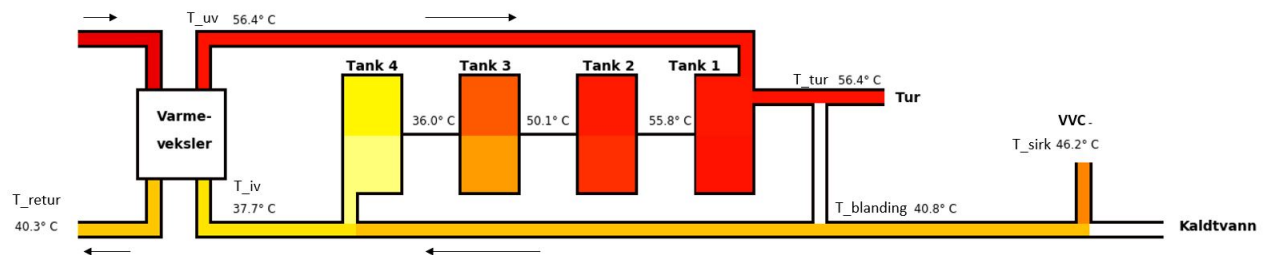
Figur 5.11: Målt turtemperatur i tappevannskretsen i uke 5

6. Simuleringsmodell av krets for tappevann

En modell av tappevannskretsen i Behandlingsbygg 08 ble utviklet for å kunne simulere virkningen av ulike tiltak og for å komme med forslag til forbedret drift av kretsen. I dette kapitlet presenteres programmering og validering av denne modellen samt svakheter ved den.

6.1 Bakgrunn for modellen

Modellen ble programmert med bakgrunn i systemskjema for tappevannskretsen (vedlegg C), og målinger gjort på denne i uke 13. Målingene ble satt opp i en csv-fil som modellen bruker for å kjøre simuleringene. Figur 6.1 viser en visualisering av modellen. Som man kan se ble systemgrensen for modellen satt til turlledning for tappevannet og inntak av kaldtvann og sirkulasjon på sekundærsiden. På primærsiden, er systemgrensen satt til tur- og returledning på fjernvarmen.



Figur 6.1: Visualisering av modell for tappevannskrets

6.2 Inndata og initialverdier

Modellen kan kjøres i det tidsrommet brukeren ønsker. Dette initieres ved å velge fra/til hvilken rad i csv-filen man ønsker å kjøre. Temperaturer i tankene og ulike steder i kretsen

hentes da fra denne raden og brukes som initialverdier for oppstart av simuleringen. De ulike temperaturene som initieres er gitt med forklaring i tabell 6.1

Fra dette tidspunktet beregnes temperaturer i tankene og ulike steder i kretsen minutt for minutt basert på det faktiske forbruket. Beregningsrekkefølgen er nærmere forklart i neste delkapittel.

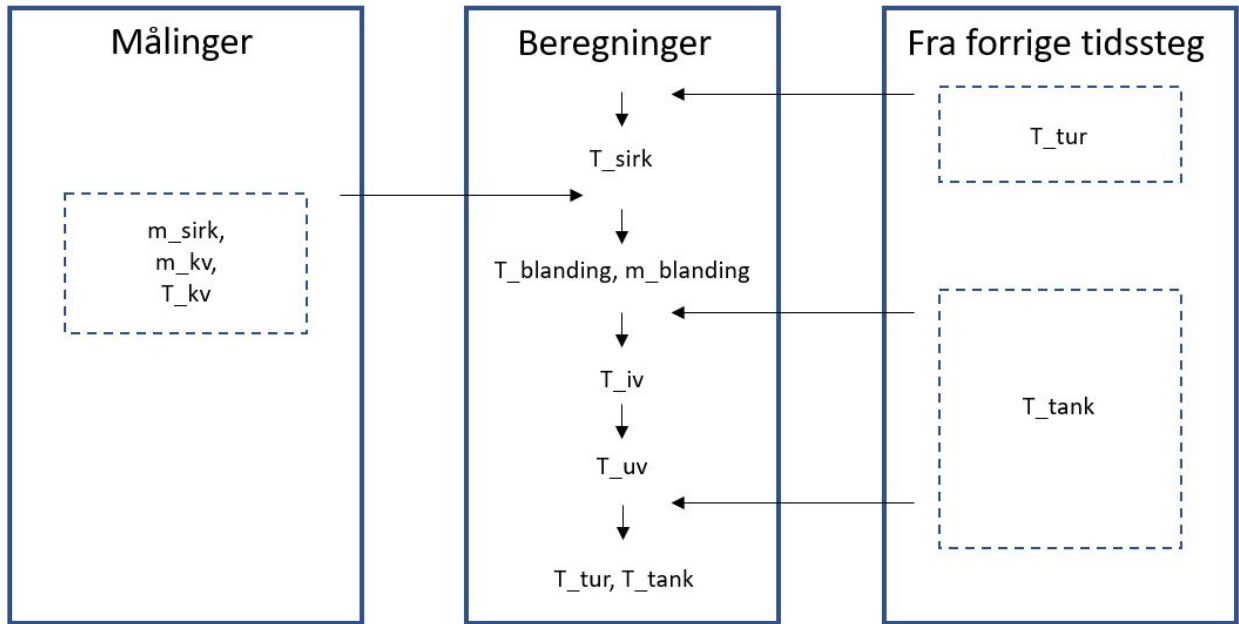
Tabell 6.1: Liste over temperaturer som blir initiert fra csv-filen

Parameter	Forklaring
T_sirk	Temperatur på sirkulasjon
T_kv	Temperatur på kaldtvann
T_blanding	Temperatur på blanding av VVC og kaldtvann
T_iv	Temperatur inn på varmeveksleren
T_uv	Temperatur ut av varmeveksleren
T_tur	Turtemperatur på tappevannet
T_tank	Temperatur i tankene, radvektor med 8 kolonner
m_tur	Volumstrøm turledning
m_sirk	Volumstrøm sirkulasjon
m_kv	Volumstrøm kaldtvann

6.3 Beregningsrekkefølge

For å lage en mest mulig virkelighetsnær simulering, var det viktig med korrekt beregningsrekkefølge. Denne ble derfor satt opp til å følge retningen vannet strømmer i tappevannskretsen.

Beregningsrekkefølgen er visualisert i figur 6.2. Her kan man se at hvert minuttvise tidssteg initieres ved at temperaturen på VVC blir beregnet med bakgrunn i turtemperaturen fra forrige tidssteg. Deretter hentes målinger på volumstrøm på VVC og kaldtvann samt temperaturen på kaldtvannet. Disse benyttes videre til å beregne temperaturen på blandingen av kaldtvann og VVC. Dersom tankene er i lademodus behøves temperaturen i Tank 4 ved forrige tidspunkt for å beregne temperatur inn på varmeveksleren. Temperaturen ut av varmeveksleren beregnes og brukes så til å beregne turtemperatur og ny temperatur i varmtvannstankene.



Figur 6.2: Beregningsrekkefølge for simuleringsmodellen

6.4 Funksjoner

For å beregne temperaturer i tappevannskretsen ble modellen bygget opp av seks ulike funksjoner. Disse er listet opp i tabell 6.2 og forklart i dette delkapittelet.

Tabell 6.2: Liste over funksjoner i simuleringsmodellen

Funksjon	Inndata
sirk_temp	T_tur
retur_blanding	m_kv, T_kv, m_sirk, T_sirk
inn_paa_veksler	T_blanding, T_tank, m_fylling, m_blanding
veksler	T_iv, m_prim
fylle_tank	m_tur, T_uv, T_tank, T_blanding
tomme_tank	m_tur, T_uv, T_blanding, T_tank

Temperaturer på varmtvannssirkulasjon

Ved hjelp av målinger på turtemperatur og målinger på VVC ble det laget en lineær sammenheng mellom disse temperaturene. Denne lineære sammenhengen er programmert i funksjonen

T_{sirk} , hvor temperaturen på VVC blir beregnet med bakgrunn i hva T_{tur} var i forrige tidssteg.

Blanding av sirkulasjon og kaldtvann

VVC blandes med kaldtvann som vist i figur 6.1 og fortsetter mot Tank 4 og varmeveksleren. Temperaturen på denne blandingen beregnes med ligning 3.5 i funksjonene *retur_blanding*, hvor volumstrøm i [l/s] er antatt å være lik massestrømmen da tettheten for vann er tilnærmet lik $1 \frac{kg}{l}$ for temperaturer mellom 20 °C og 60 °C.

Temperatur inn på varmeveksleren

Temperaturen på vannet inn på varmeveksleren er avhengig av om tankene er i forbruksmodus eller lademodus. Om tankene er i forbruksmodus, er temperaturen her lik temperaturen av blandingen mellom sirkulasjon og kaldtvann, altså $T_{blanding}$. Om tankene lades, vil temperaturen inn på varmeveksleren være en blanding av $T_{blanding}$ og vann ut fra Tank 4. Dette ble modellert i funksjonen *inn_paa_veksler*.

Temperatur ut av varmeveksleren

Varmeveksleren ble modellert som en rekke del-volumer i funksjonen *veksler*. I denne funksjonen gjettes temperaturen ut av varmeveksleren på sekundærsiden, og temperaturforløpet beregnes tilbake til inngangstemperaturen som vist i delkapittel 3.3. Om denne temperaturen er innenfor 0,5 K av hva funksjonen *inn_paa_veksler* har beregnet, godtas resultatet. I denne funksjonen beregnes også returtemperaturen på fjernvarmesiden.

Om temperaturen ut av varmeveksleren på sekundærsiden er under 57,8 °C eller over 58,2 °C, vil volumstrømmen på primærsiden, m_{prim} justeres opp eller ned. Temperaturen ut av varmeveksleren beregnes på ny, og om denne er mellom 57,8 °C og 58,2 °C godtas resultatet. Dette ble gjort for å simulere virkningen av den regulerende ventilmotoren på primærsiden av veksleren.

Varmtvannstanker og turtemperatur

Som figur 6.1 viser, har kretsen fire varmtvannstanker. Hver av disse tankene er på 1000 l, og er i modellen modellert som to tanker på 500 l hver. Dette ble gjort for å forhindre at vann som strømmer inn/ut av tankene påvirker temperaturen i hele tanken med en gang.

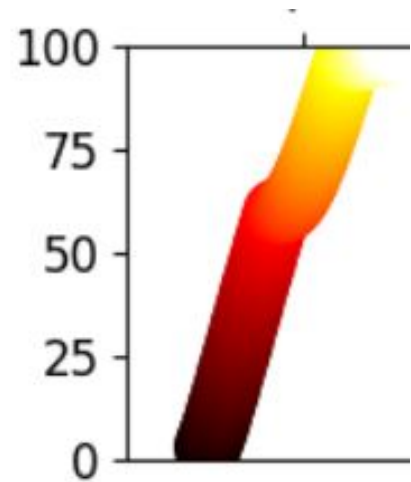
Vann strømmer ut og inn av varmtvannstankene ut fra behovet i tappevannskretsen. Om volumstrømmen på blandingen av VVC og kaldtvann, $m_blanding$, er større enn hva pumpe JP0001/JP0002 leverer, vil tankene tømmes. Vann med volumstrøm $m_fylling$ strømmer da inn i Tank 4, gjennom tankene og ut fra Tank 1. Dette ble modellert med funksjonen *tomme_tank*. Ved hjelp av ligning 3.7 i teorigapittel 3.2 beregnes temperaturendringen i de ulike tankene. Når kretsen er i forbruksmodus, vil turtemperaturen beregnes som en blanding av vann fra Tank 1 og T_{uv} , og med hjelp av ligning 3.5 i teorigapittel 3.1.

Når $m_blanding$ er lavere enn hva pumpen leverer, vil tankene lades. Vann strømmer da inn i Tank 1 og ut gjennom Tank 4. Dette ble modellert med funksjonen *fylle_tank*. I denne funksjonen beregnes temperaturendringen i tankene med hjelp av samme ligning som når tankene tømmes. Turtemperaturen på tappevannskretsen settes til samme temperatur som T_{uv} .

Om turtemperaturen er over 62 °C slår blandeventilen inn og blander ut turtemperaturen. Dette ble programmert både i funksjonen *tomme_tank* og *fylle_tank*, og den nye turtemperaturen beregnes i så fall som en blanding mellom T_{uv} , vanntemperaturen i Tank 1 og $T_blanding$. volumstrømmen, $m_blanding$ vil også oppdateres slik at temperaturen inn på varmeveksleren blir beregnet riktig.

6.5 Animasjon av simuleringsmodellen

For å kunne gi et mer oversiktlig bilde av hvordan temperaturen endret seg i varmtvannstankene og ulike steder i kretsen ble det utviklet en animeringsmulighet av simuleringene som vist i figur 6.1. Animasjonen er bygget opp av et bilde på 100 x 500 piksler hvor hver piksel har et tall. Dette tallet er så knyttet til et fargekart som spenner fra svart til hvitt gjennom en overgang fra mørk rød til gul slik som vist i figur 6.3. Simulerte temperaturer lastes inn i riktige områder av bildet, knyttes til fargekartet og oppdateres etter hvert minutt som går. På denne måten skapes det en animasjon av hvordan temperaturene brer seg i kretsen. I tillegg til farger, er det også lagt inn figurtekst som forteller temperaturen i de ulike rørstrekene. Visualiseringen viser kun temperaturendring. En skjermvideo av denne visualiseringen kan finnes på internett (Prestvold, 2019).



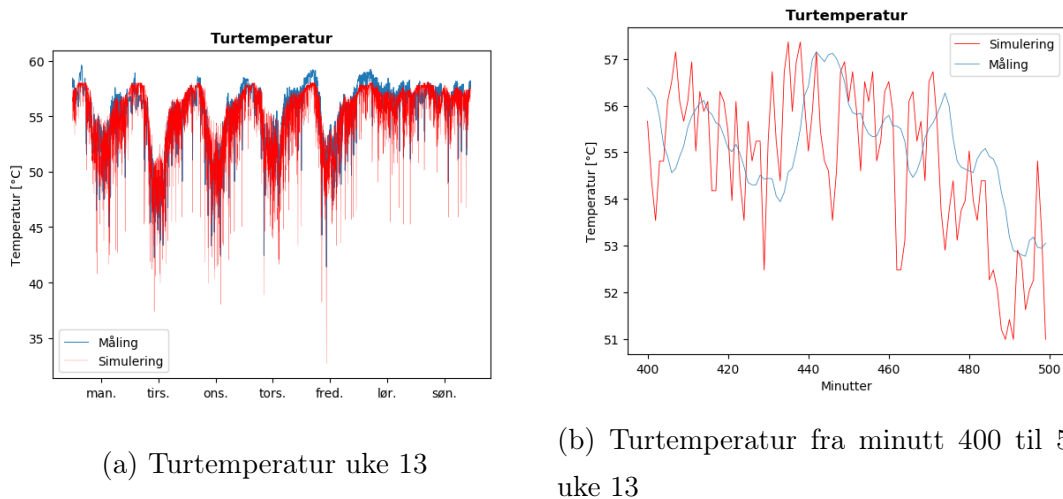
Figur 6.3: Fargekart for animasjon (matplotlib, 2017)

6.6 Justering og validering

Etter et utkast på simuleringsmodellen var programmert ferdig, ble modellen testet opp mot målinger på tappevannskretsen fra uke 13. Figurene i dette delkapittelet viser en sammenligning av simulerte verdier plottet i rødt og målte verdier plottet i blått.

Ved første øyekast så modellen ut til å simulere trendene for turtemperaturen relativt godt slik figur 6.4a viser. Derimot alternerte de simulerte verdiene en del og avvek fra målte verdier på minuttnivå. Dette kan man se av figur 6.4b. Etter å ha sett nærmere på målingene kom det frem at volumstrøm på kaldtvann kunne variere veldig mye fra minutt til minutt, og at dette gjorde utslag på beregningene i kretsen. I stedet for å kjøre simuleringsmodellen med målt kaldtvannsforbruk for hvert eneste minutt, ble det derfor beregnet gjennomsnittsverdier i perioder på fem minutter. Etter denne justeringen, ble alterneringene redusert og de simulerte temperaturene lå nærmere turtemperaturen som vist i figur 6.5a og 6.5b. Av figur 6.5a ser man også at simuleringen ser ut til å underestimere turtemperaturen i enkelte tilfeller. Dette blir nærmere belyst i vedlegg A hvor grafer som sammenligner simuleringer med målte verdier

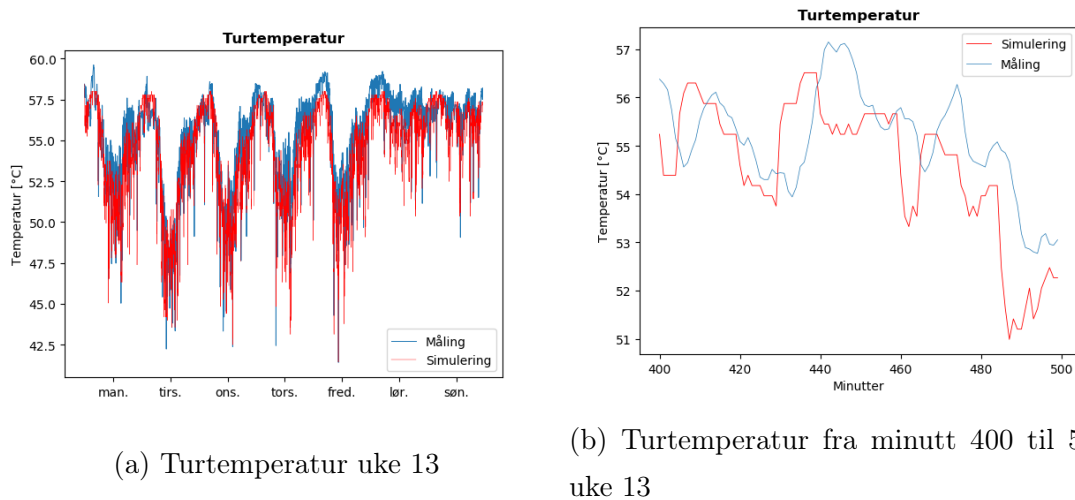
for alle tilgjengelige målepunkt i kretsen blir presentert. Standardavvik for avviket mellom målinger og simuleringer på turtemperatur ble beregnet til å være på 1,6 K.



(a) Turtemperatur uke 13

(b) Turtemperatur fra minutt 400 til 500 i uke 13

Figur 6.4: Sammenligning av målinger og simuleringer på turtemperatur i uke 13



(a) Turtemperatur uke 13

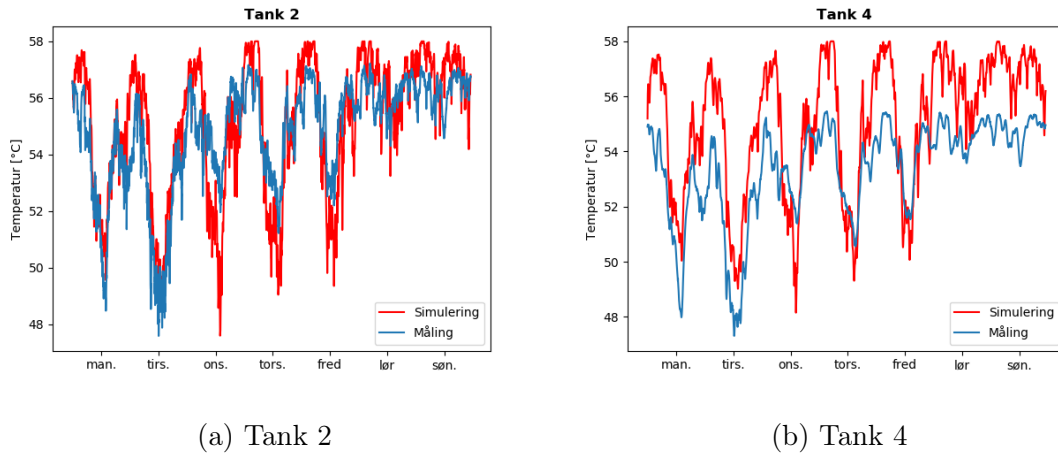
(b) Turtemperatur fra minutt 400 til 500 i uke 13

Figur 6.5: Sammenligning av målinger og simuleringer på turtemperatur i uke 13 med justeringer på kaldtvann

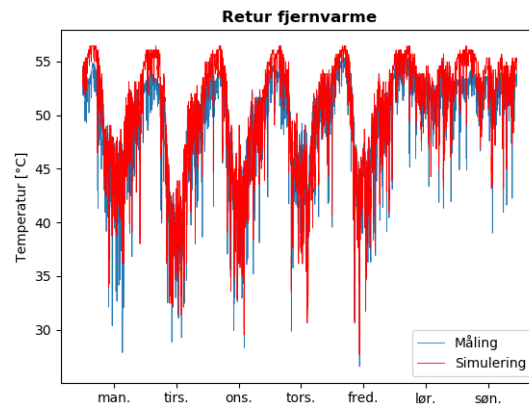
Figur 6.6 sammenligner simulert og målt temperatur i Tank 2 og Tank 4. Som figur 6.6a viser, stemmer simuleringen godt overens med de målte verdiene i Tank 2, men man kan se at modellen overestimerer temperaturendringene til en viss grad på onsdag og torsdag. Dette kan man også se i figur 6.6b hvor målt temperatur i Tank 4 sammenlignes med simulert temperatur. Dette kan tyde på at modellen for varmtvannstankene tillater større grad av

blanding enn hva det faktisk er i tankene. Dette kommenteres nærmere i vedlegg A.

Figur 6.7 viser at simuleringsmodellen også beregner temperaturtrendene på returtemperaturen relativt godt, men at denne har en tendens til å overestimere temperaturen. Dette resulterte i en gjennomsnittlig simulert returtemperatur som var 0,8 K høyere enn den målte.



Figur 6.6: Sammenligning av målinger og simuleringer på temperaturer i Tank 2 og Tank 4 i uke 13



Figur 6.7: Sammenligning av målinger og simuleringer på returtemperaturen på primærsiden i uke 13

6.7 Antakelser og begrensninger for modellen

Simuleringsmodellen er programmert for å kunne danne et bilde av hvordan tappevannskretsen reagerer ved ulike behov og oppsett, og for å kunne komme med et forbedringsforslag. Simuleringene vil aldri gi et perfekt bilde av hva som skjer i virkeligheten, og har naturligvis sine svakheter. Antakelser og begrensninger for simuleringsmodellen er derfor nevnt i dette delkapittelet.

Konstant temperatur i rørstrekk i hvert minutt

Som vist i delkapittel 6.3, henter modellen inn volumstrøm og temperatur på sirkulasjon og kaldtvann for hvert minutt fra målinger, og beregner deretter temperaturer som ligger nedstrøms av disse. Beregningene fra dette minuttet lagres minuttvis i vektorer. I virkeligheten kan temperaturen variere relativt mye på et minutt, men disse variasjonene, vil ikke modellen fange opp.

Tar ikke hensyn til trykk

Modellen er programmert uten en eneste ligning som innebærer trykk. Pumpe JP0001/JP0002 kan frekvensreguleres til å oppnå ønsket volumstrøm. I et simuleringsscenario blir dette pådraget halvert. Halvering av dette pådraget vil medføre trykkendringer i resten av kretsen. At modellen ikke kan beregne hvordan denne trykkendringer påvirker hva som skjer i kretsen er dermed en svakhet i modellen.

Ingen varmetap fra tanker eller rør

I realiteten vil det være varmeoverføring fra både tanker og rør til omgivelsene. Dette varmetapet er ikke lagt inn i beregningsmodellen.

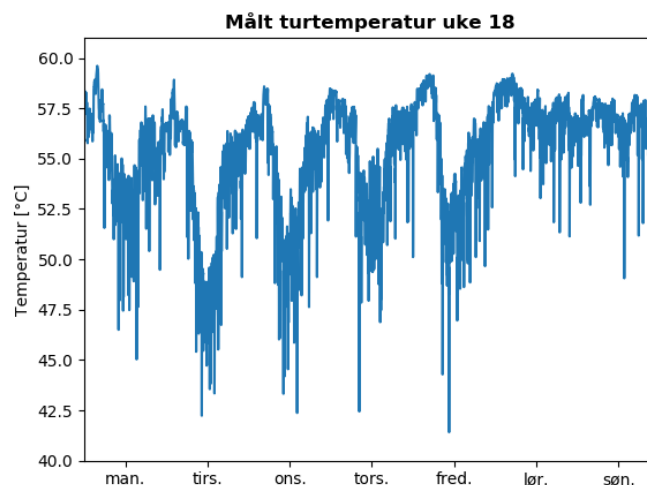
7. Resultater

I dette kapitlet gjennomgås resultater fra målinger og simuleringer gjort på tappevannskretsen i Behandlingsbygg 08 på Sykehuset Østfold Kalnes. Som beskrevet i metodekapitlet ble oppgaven gjennomført som en stegvis prosess hvor resultater fra ulike simuleringer førte til gjennomføring av et tiltak på sykehuset. Dette tiltaket ble så analysert og nye simuleringer ble gjort før et endelig forslag ble presentert. Resultatene fra de ulike simuleringene er satt opp i samme orden for å gi en mest mulig ryddig fremstilling, og illustrere den stegvise prosessen.

7.1 Målinger på tappevannskrets uke 13

I uke 13 ble det gjort målinger på tappevannskretsen i bygg 08 for å validere simuleringmodellen, og for å forstå problemer med å oppnå ønsket turtemperatur. Resultatene fra disse målingene presenteres og analyseres i dette delkapitlet.

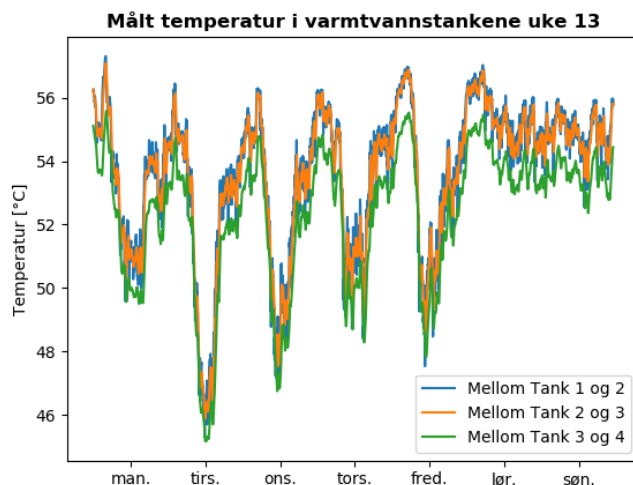
Figur 7.1 viser målt turtemperatur i uke 13. Som man kan se, er denne meget varierende og avviker i stor grad fra ønsket settpunkt på 58 °C. Laveste målte turtemperatur denne uken var 41,4 °C og turtemperaturen var under 54 °C i 2614 av 10021 målinger.



Figur 7.1: Målinger på turtemperatur i uke 13

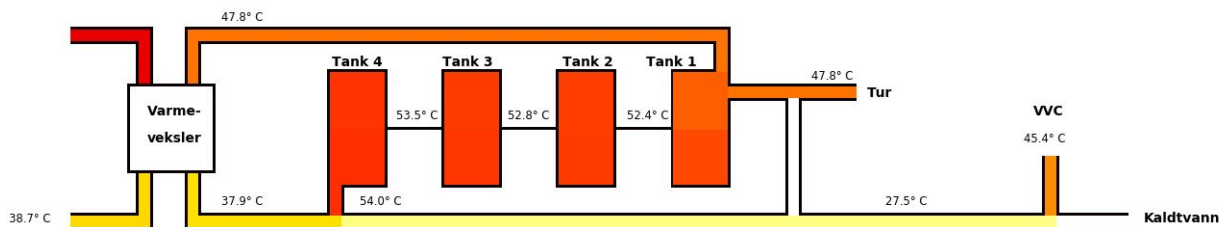
Figur 7.2 viser målt temperatur i rørene mellom varmtvannstankene i uke 13. Av figuren kan man se at tankene varmes opp og kjøles ned, men at temperaturen i de ulike tankene er relativt lik i hvert tidspunkt. Dette betyr at tankene ikke kjøles ned suksessivt ved økende tappevannsbehov, og dermed ikke utnytter akkumulert vannvolum. Dette kan forklares ved å se på volumstrømmen over varmeveksleren på sekundærsiden. Denne volumstrømmen styres av pumpe JP0001/JP0002 og var satt til 2,6 l/s i uke 13. Dette er over det dobbelte av dimensjonerende volumstrøm, og denne volumstrømmen var til enhver tid høyere enn målt volumstrøm på turledningen. Dette medførte at tankene til enhver tid var i lademodus i uke 13.

Varmeveksleren er dimensjonert for å levere et temperaturløft på 30 K med en dimensjonerende volumstrøm på 1,15 l/s. Den høye volumstrømmen medførte at varmeveksleren ikke alltid klarte å løfte temperaturen til 58 °C, og siden kretsen alltid var i lademodus ble vann under ønsket settpunkt fylt på i Tank 1. Dette er visualisert (med simulerte verdier) i figur 7.3 hvor man kan se at øvre del av Tank 1 er kaldere enn resten av tankene. Det høye pådraget på pumpe JP0001/JP0002 medførte altså at varmtvannstankene alltid var i lademodus i uke 13, og at kaldere vann enn ønsket turtemperatur ble brukt til å fylle varmtvannstankene. Det høye pådraget på pumpe JP0001/JP0002 var dermed en hovedårsak til at tappevannskretsen ikke presterte som ønsket.



Figur 7.2: Målinger på temperatur mellom varmtvannstankene i uke 13

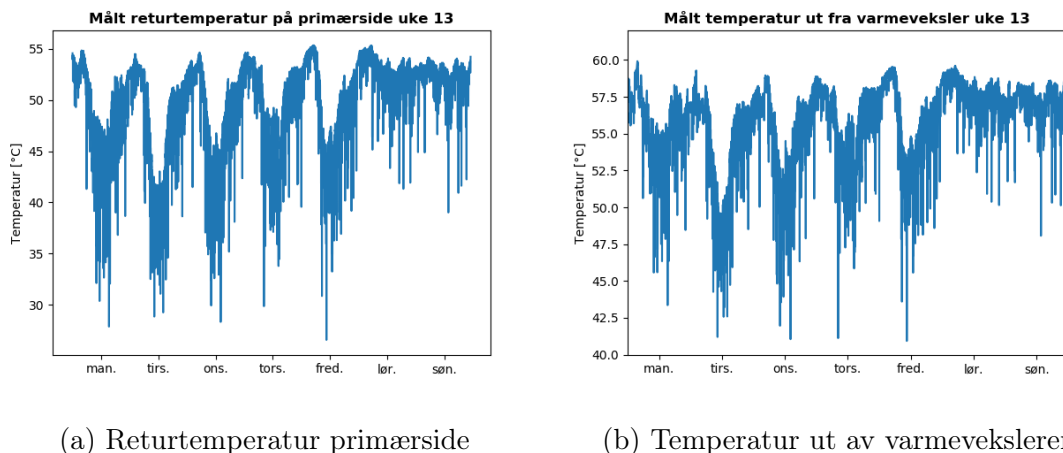
I tillegg til at turtemperaturen ikke ble opprettholdt, var det som nevnt i delkapittel 5.2.3 også en mistanke om for høy og varierende returtemperatur på primærsiden. Delfigur 7.4a viser målte returtemperaturer på primærsiden i uke 13. Av figuren er det tydelig at retur-



Figur 7.3: Øyeblikksbilde fra simuleringer av tappevannskretsen på tirsdag i uke 13

temperaturen varierer i stor grad. Gjennomsnittlig målte returtemperatur ligger på 49,5 °C hvilket er langt over ønsket returtemperatur på 40 °C.

Driftspersonale på sykehuset hadde også en mistanke om at ventilmotoren som styrer vannmengden over varmeveksleren på primærsiden ikke regulerte, men sto i åpen stilling til enhver tid. Delfigur 7.4b viser målte temperaturer ut fra varmeveksleren i uke 13. Som figuren viser, varierer temperaturen fra 40,9 °C til 59,9 °C. Totalt er det gjort 422 målinger av temperaturer over 59 °C, hvilket støtter påstanden til driftspersonale på sykehuset.



(a) Returtemperatur primærside

(b) Temperatur ut av varmeveksleren

Figur 7.4: Målinger på returtemperatur på primærside og på temperatur ut av varmeveksleren på sekundærsiden i uke 13

7.2 Simuleringer før første forbedringstiltak

For å se hvordan tappevannskretsen presterte ved ulike oppsett, og for å komme med forslag til forbedringstiltak ble det gjort simuleringer på tappevannskretsen. Hvert simuleringsscenario

analyseres med nøkkeltall og relevante figurer for å gi et godt grunnlag for sammenligning. Simuleringene i dette delkapittelet (7.2) ble gjort med bakgrunn i målt forbruk fra uke 13 og førte til det gjennomførte forbedringstiltaket på sykehuset. Oppsett av de ulike simuleringene er forklart i vedlegg F.

7.2.1 Dimensjonerende volumstrøm over varmeveksleren

Før oppgavens start, og gjennom uke 13 var volumstrømmen over varmeveksleren over det dobbelte av hva den var dimensjonert for. I delkapittel 2.3 i litteraturstudiet ble det nevnt at denne volumstrømmen kan være avgjørende for hvordan en slik tappevannskrets presterer. Det var derfor naturlig å gjøre en simulering med dimensjonerende volumstrøm.

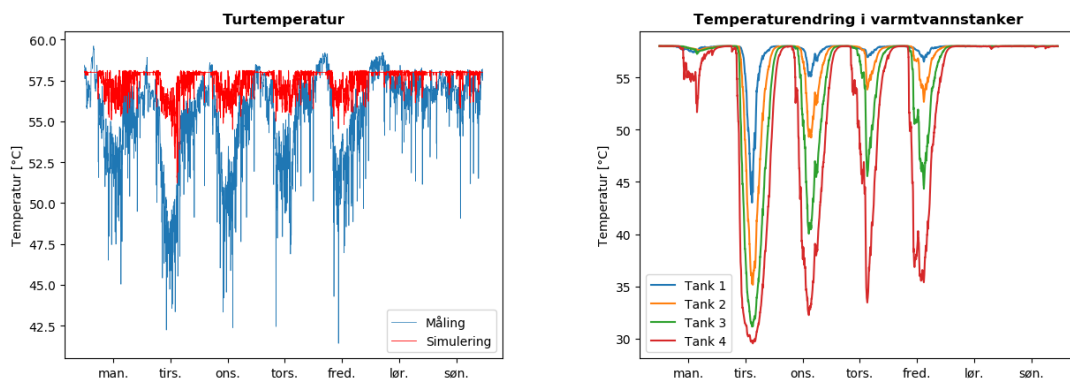
Figur 7.5a viser simulerte turtemperaturer plottet i rødt sammen med målte turtemperaturer i blått gjennom den aktuelle uken. Av figuren er det tydelig at turtemperaturen forbedrer seg ved dimensjonerende pådrag. Ut i fra behov, ligger turtemperaturen mellom 58 °C og 55 °C utenom et avvik på tirsdag, der turtemperaturen er simulert ned i 51,2 °C.

Av nøkkeltallene i tabell 7.1 ser man at tankene er i forbruksmodus i 18 % av tiden. Dette synliggjøres i figur 7.5b som viser hvordan temperaturen endrer seg i varmtvannstankene ettersom tiden går. I motsetning til figur 7.2, kommer det frem at tankene suksessivt tømmes og lades ved behov. Nøkkeltallene kan sammen med figur 7.5b også forklare temperaturavviket på tirsdag. Vi ser her at vannet i tankene blir svært kaldt, og at laveste temperatur i Tank 1 er simulert til 43 °C. Da turtemperaturen i forbruksmodus er en blanding av vann ut fra varmeveksleren, og vann fra Tank 1, vil det kalde vannet i Tank 1 medføre kaldere turtemperatur. Det kan derfor stilles spørsmål om hvorvidt kretsen burde hatt en ekstra varmtvannstank, eller eventuelt en større varmeveksler.

En animasjonsvideo som viser hvordan temperaturen i tappevannskretsen endrer seg gjennom hele tirsdag i uke 13 ligger tilgjengelig på internett (Prestvold, 2019). Et øyeblikkbilde fra denne er vist i figur 7.6 for å tydeliggjøre hvordan tankene utnyttet ved økt tappevannsbehov.

Tabell 7.1: Nøkkeltall for simulering med dimensjonerende volumstrøm

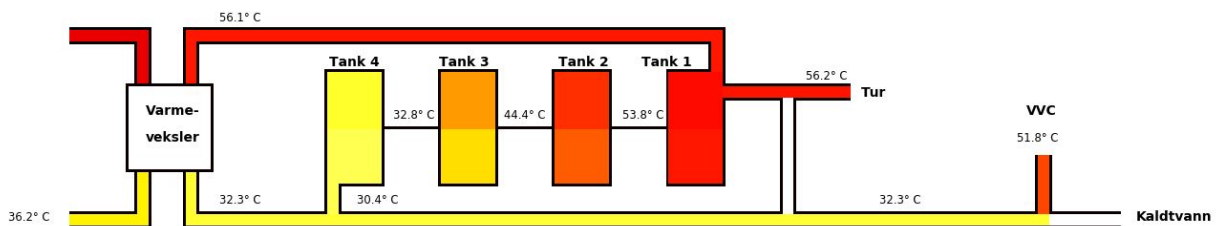
Nøkkeltall	Simulert verdi
Gjennomsnittlig turtemperatur	57,6 °C
Minste turtemperatur	51,2 °C
Antall turtemperaturer under 54 °C	32
Laveste temperatur i øvre del av Tank 1	43,0 °C
Gjennomsnittlig returtemperatur primærside	47,1 °C
Andel tankene er i forbruksmodus	18 %



(a) Turtemperatur

(b) Temperatur i varmtvannstanker

Figur 7.5: Simulert turtemperatur og temperatur i tanker med dimensjonerende volumstrøm



Figur 7.6: Øyeblikksbilde fra animasjonsvideo som viser simuleringer med dimensjonerende volumstrøm tirsdag i uke 13 (Prestvold, 2019)

7.2.2 Større varmeveksler

Som vist i kapittel 7.2.1, opprettholdes ikke turtemperaturen til enhver tid ved dimensjonerende pådrag. For å se om varmeveksleren er underdimensjonert, ble det gjort en simulering

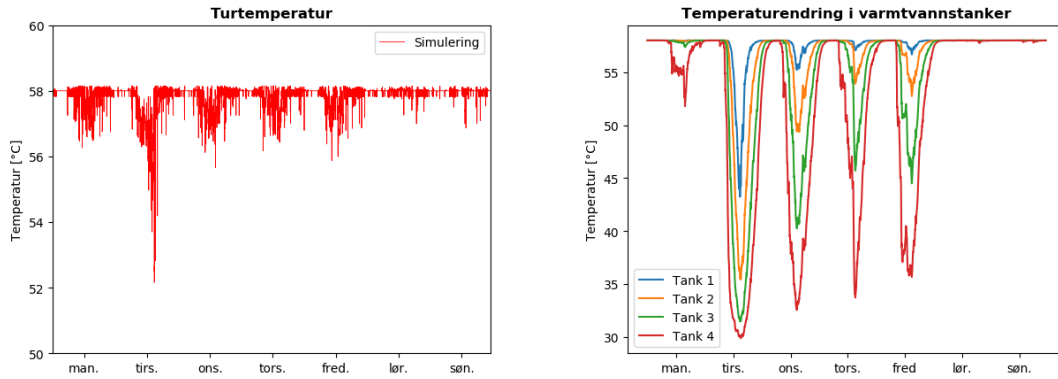
hvor effekten ble satt til å være 200 kW.

Figur 7.7a viser simulert turtemperatur gjennom uke 13. Ved å sammenligne med resultatene fra dimensjonerende pådrag, kan man se at den generelle variasjonen i turtemperaturen er ca. 1K mindre med større varmeveksler. Likevel får turtemperaturen en nedgang på tirsdag. Denne nedgangen er mindre enn ved dimensjonerende pådrag, og kretsen ser dermed ut til å prestere noe bedre med en større varmeveksler. Nedgangen i turtemperatur på tirsdag kan forklares med figur 7.7b som viser simulert temperatur i varmtvannstankene. Som ved dimensjonerende pådrag, blir temperaturen i varmtvannstankene for kald, og dette medfører turtemperaturer under ønsket settpunkt.

Av nøkkeltallene i tabell 7.2 kan man se at den gjennomsnittlige returtemperaturen på primærsiden er simulert til 46,6 °C. Dette er 3,1 K lavere enn målt gjennomsnittlig returtemperatur, og en liten nedgang fra simuleringer med dimensjonerende pådrag.

Tabell 7.2: Nøkkeltall for simulering med varmeveksler på 200 kW

Nøkkeltall	Simulert verdi
Gjennomsnittlig turtemperatur	57,8 °C
Minste turtemperatur	52,2 °C
Antall turtemperaturer under 54 °C	11
Laveste temperatur i øvre del av Tank 1	43,2 °C
Gjennomsnittlig returtemperatur primærside	46,6 °C
Andel tankene er i forbruksmodus	18 %



(a) Turtemperatur

(b) Temperatur i varmtvannstanker

Figur 7.7: Simulert turtemperatur og temperatur i tanker med en varmeveksler på 200 kW

7.2.3 Ekstra varmtvannstank

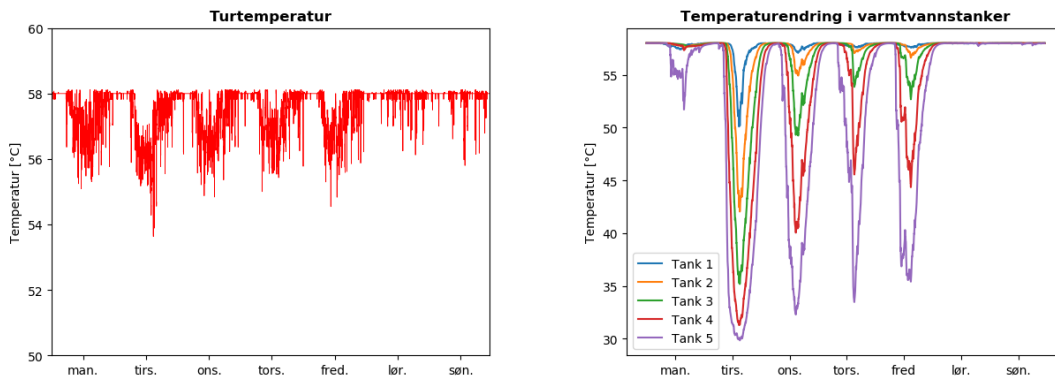
I tillegg til å simulere hvordan kretsen ville prestert med en varmeveksler på 200 kW ble det også gjort en simulering med en ekstra varmtvannstank. Effekten på varmeveksleren ble da satt tilbake til dimensjonerende 145 kW.

Figur 7.8a viser at den simulerte turtemperaturen varierer mellom 58 °C og 55,5 °C i meste-parten av tilfellene, men at den har et utslag på tirsdag. Kaldeste simulerte turtemperatur er her 53,6 °C. Dette er 2,4 K varmere enn for dimensjonerende pådrag og svært nære temperaturkravet på 54 °C. Figur 7.8b og nøkkeltallene i tabell 7.3 viser at den kaldeste temperaturen i Tank 1 er 7 K varmere enn ved dimensjonerende pådrag, hvilket bidrar til å opprettholde turtemperaturen. Av nøkkeltallene i tabell 7.3 ser man at den gjennomsnittlige simulerte returtemperaturen på primærsiden var 47 °C.

En ekstra varmtvannstank ville bidratt til å opprettholde en tilfredsstillende turtemperatur i tappevannskretsen, og er dermed et mulig tiltak for sykehuset. Dette tiltaket krever innkjøp av ny tank og kostnader knyttet installasjon av denne. Et overslag gjort av en fagarbeider på sykehuset er presentert i vedlegg E og medførte en kostnad på 68 800 NOK.

Tabell 7.3: Nøkkeltall for simulering med ekstra varmtvannstank

Nøkkeltall	Simulert verdi
Gjennomsnittlig turtemperatur	57,6 °C
Minste turtemperatur	53,6 °C
Antall turtemperaturer under 54 °C	7
Laveste temperatur i øvre del av Tank 1	50,1 °C
Gjennomsnittlig returtemperatur primærside	47,0 °C
Andel tankene er i forbruksmodus	18 %



(a) Turtemperatur

(b) Temperatur i varmtvannstanker

Figur 7.8: Simulert turtemperatur og temperatur i tanker med ekstra varmtvannstank

7.2.4 Endring av volumstrøm over varmeveksleren

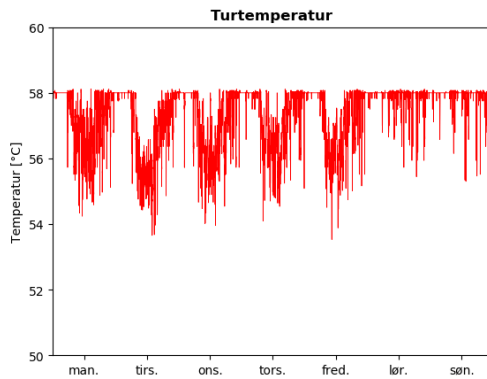
Selv om en ekstra varmtvannstank ville løst problemene med turtemperaturen i uke 13, var det aktuelt for sykehuset å se på rimeligere tiltak. Et kostnadsfritt tiltak for sykehuset ville vært å justere pådraget på pumpe JP0001/JP0002 som bestemmer volumstrømmen over varmeveksleren. Det ble derfor gjort simuleringer med ulik volumstrøm over varmeveksleren, og resultater fra en volumstrøm på 1,2 l/s presenteres i dette delkapittelet.

Ved å se på nøkkeltallene i tabell 7.4 og figur 7.9 ser man at turtemperaturen i stor grad opprettholdes over 54 °C og at tankene utnyttet på riktig måte. Det er kun 12 minutter hvor temperaturen er simulert til lavere enn 54 °C og laveste turtemperatur er simulert til 53,5 °C. Med en gjennomsnittlig returtemperatur på 47,3 °C er disse resultatene tilnærmet like gode som å installere en ekstra varmtvannstank i kretsen. Det ble derfor gjort en beslutning

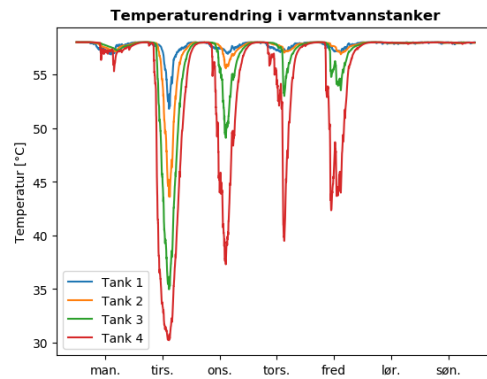
om å endre pådraget på pumpe JP0001.

Tabell 7.4: Nøkkeltall for simulering med volumstrøm på 1,2 l/s

Nøkkeltall	Simulert verdi
Gjennomsnittlig turtemperatur	57,4 °C
Minste turtemperatur	53,5 °C
Antall turtemperaturer under 54 °C	12
Laveste temperatur i øvre del av Tank 1	51,8 °C
Gjennomsnittlig returtemperatur primærside	47,3 °C
Andel tankene er i forbruksmodus	13 %



(a) Turtemperatur



(b) Temperatur i varmtvannstanker

Figur 7.9: Simulert turtemperatur og temperatur i tanker med volumstrøm på 1,2 l/s

7.2.5 Sammendrag av resultater fra simuleringer før første forbedringstiltak

I løpet av delkapittel 7.2 har simuleringer med følgende oppsett blitt analysert:

- Dimensjonerende volumstrøm over varmeveksler
- Større varmeveksler
- Ekstra varmtvannstank
- Endret volumstrøm over varmeveksleren

Resultatene viste at en nedjustering av volumstrømmen over varmeveksleren medførte langt bedre driftsforhold for tappevannskretsen. En større varmeveksler medførte bedre driftsbedingungen, og en ekstra varmtvannstank eliminerte problemene med turtemperaturen. Likevel var det mulig å oppnå tilsvarende resultater med korrekt justering av pådraget på pumpe JP0001/JP0002. Det konkluderes da ikke med at kretsen var underdimensjonert, men at reguleringen av pumpe JP0001/JP0002 kunne vært bedre. Med bakgrunn i disse resultatene ble det derfor besluttet å endre pådraget på pumpe JP0001/JP0002. Selv om resultatene tilsa at 1,20 l/s var beste volumstrøm, ble pumpen satt til å gi en volumstrøm på 1,25 l/s.

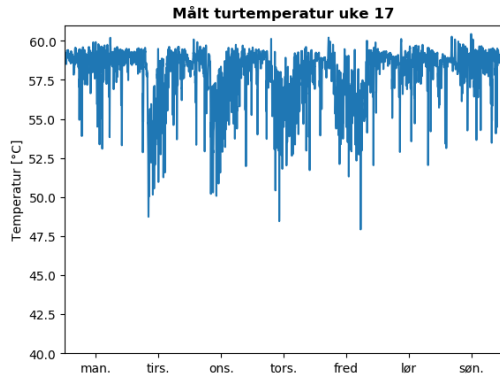
7.3 Målinger etter endret pådrag på pumpe JP0001/JP0002

Etter resultater fra simuleringer gjort med bakgrunn i forbruk for uke 13, ble pådraget på pumpe JP0001/JP0002 redusert fra 2,6 l/s til 1,25 l/s. Pådraget på pumpe JP0001 ble redusert den 10.04.19, kl.07:00, mens pådraget på pumpe JP0002 ble justert den 17.04.19. Da disse pumpene jobber alternerende fra uke til uke og bytter på mandag kl. 08:00 var det en periode hvor volumstrømmen over varmeveksleren lå på 2.6 l/s. Denne perioden er utelatt i resultatene under, og det presenteres derfor kun resultater fra uke 17 og 18.

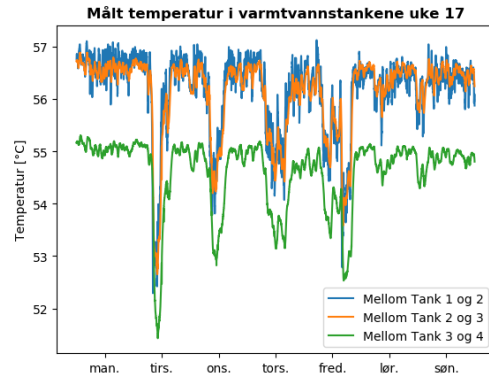
Figur 7.10 og 7.11 viser målt turtemperatur og temperatur i rørene mellom tankene i henholdsvis uke 17 og 18. Av figurene kan man se at turtemperaturen fortsatt varierer i stor grad, og at det er en del målinger som viser under 50 °C. Figurene viser også at temperaturen mellom Tank 1 og 2, og mellom Tank 2 og 3 var relativt lik fra minutt til minutt, og at tankene ikke tømmes og fylles som i figur 7.9b. Forbedringstiltaket var dermed mindre suksessfullt.

Forklaringen ligger i forskjellen på varmtvannsforbruket i uke 13, 17 og 18. Figur 7.12a viser forbruket i tappevannskretsen plottet som total tilførsel av kaldtvann. Av figuren kommer det tydelig frem at forbruket var høyere i uke 13 og 14, enn hva det var i de i uke 17 og 18. Som forklart i kapittel 5.2.3, er summen av volumstrømmen på VVC og kaldtvann avgjørende for om tankene er i lade- eller forbruksmodus. Det reduserte inntaket av kaldtvann medførte at volumstrømmen på blandingen sjeldent oversteg 1,25 l/s, hvilket betyr at tappevannskretsen for det meste var i lademodus i uke 17 og uke 18. Dette er visualisert i figur 7.12b, hvor volumstrømmen på blandingen av VVC og kaldtvann er plottet sammen med volumstrømmen over varmeveksleren. Totalt var tankene i lademodus i 99,6 % i de to ukene og dette medførte samme problem som i uke 13.

Som nevnt i kapittel 5.2.3 mente driftspersonell at ventilmotoren på primærsiden av tappevannskretsen ikke regulerte. Temperaturen ut av varmeveksleren på sekundærsiden ble målt over 59,5 °C i 2856 tilfeller, og det er dermed tydelig at denne ikke regulerer.

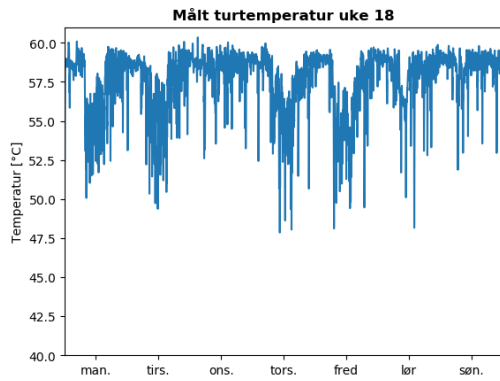


(a) Turtemperatur

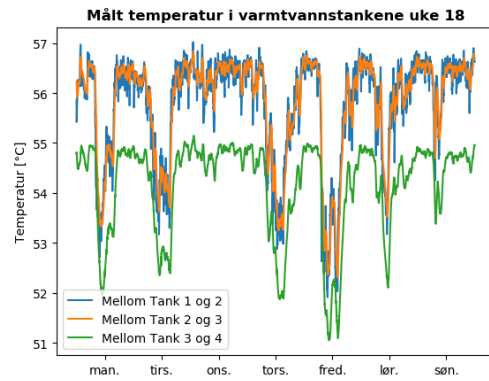


(b) Temperatur mellom varmtvannstanker

Figur 7.10: Målt turtemperatur og temperatur mellom varmtvannstanker i uke 17

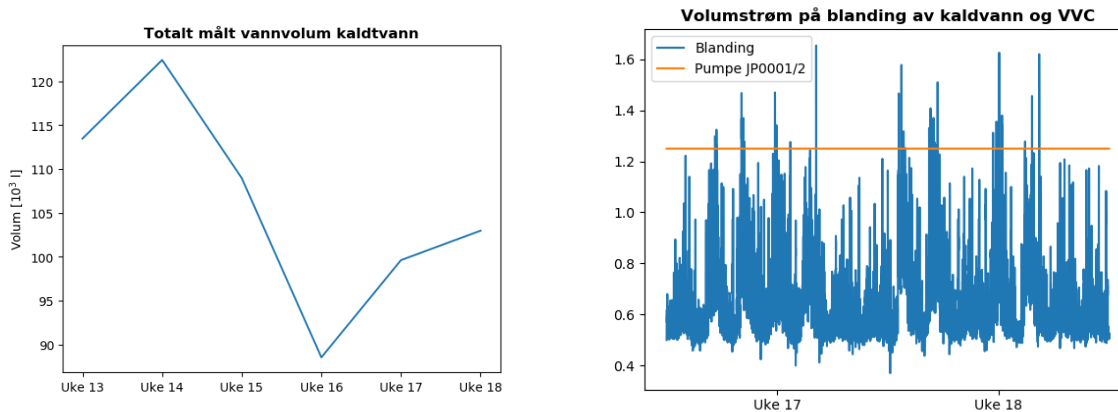


(a) Turtemperatur



(b) Temperatur mellom varmtvannstanker

Figur 7.11: Målt turtemperatur og temperatur mellom varmtvannstanker i uke 18



(a) Ukentlig vannvolum kaldtvann

(b) Volumstrøm på blanding av kaldtvann og VVC

Figur 7.12: Totalt ukentlig vannvolum og volumstrøm på blanding av kaldtvann og VVC

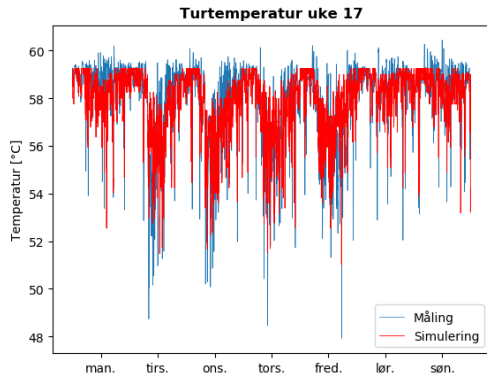
7.4 Simuleringer etter endret pådrag

Da målingene etter forbedringstiltaket viste at dette var mindre suksessfullt, ble det gjort flere simuleringer med forbruk fra uke 13, 17 og 18 for å kunne foreslå en bedre løsning. Fullstendig oppsett av disse simuleringene er presentert i vedlegg F.

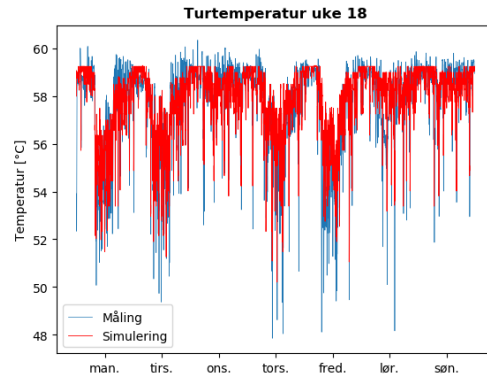
7.4.1 Sammenligning av simuleringer og målinger fra uke 17 og 18

Av ryddighet presenteres en sammenligning av simuleringer og målinger på tappevannskretsen fra uke 17 og 18. Figur 7.13a og 7.13b viser målt turtemperatur plottet i blått, og simulert turtemperatur plottet i rødt for henholdsvis uke 17 og 18. Som figurene viser samsvarer simuleringene med målingene, og modellen ser ut til å predikere trendene for turtemperatur godt.

Figur 7.14a og 7.14b viser henholdsvis målt temperatur i Tank 2 og Tank 4 i uke 18 sammenlignet med simulert temperatur. Av figurene ser man at det er et klart avvik mellom målte og simulerte temperaturer, hvor målingene ligger 2-4 K lavere enn simuleringene ut fra hvilken tank man ser på. En begrunnelse for dette kan være at målepunktene står mellom tankene, mens simuleringene blir gjort som en gjennomsnittlig verdi i øvre halvdel av tankene. En nærmere diskusjon av dette presenteres i kapittel 8.3.1 hvor det konkluderes med at simuleringene kan være sannsynlige.

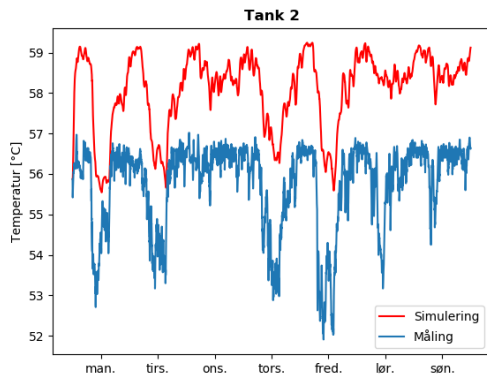


(a) uke 17

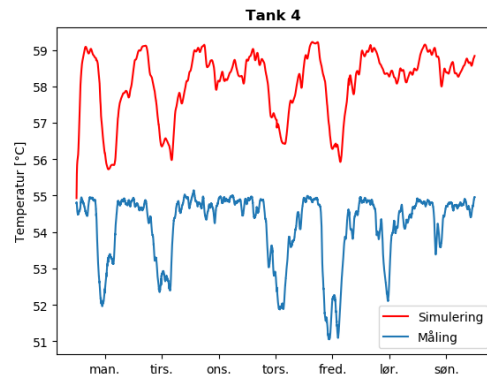


(b) Uke 18

Figur 7.13: Målinger og simuleringer av turtemperatur for uke 17 og 18



(a) Tank 2



(b) Tank 4

Figur 7.14: Målinger og simuleringer av temperatur i Tank 2 og Tank 4 i uke 18

7.4.2 Annen volumstrøm over varmeveksler

Som forklart i delkapittel 7.3, var tappevannskretsen i lademodus i store deler av uke 17 og 18. Da simuleringer i delkapittel 7.2 viste at riktig volumstrøm over varmeveksleren kunne medføre tilfredsstillende turtemperaturer var det også naturlig å gjøre simuleringer med ulik volumstrøm i uke 17 og 18. Simuleringer med en volumstrøm på 0,9 l/s gav veldig gode resultater. Disse er presentert i figur 7.15, 7.16 og i nøkkeltallene i tabell 7.5.

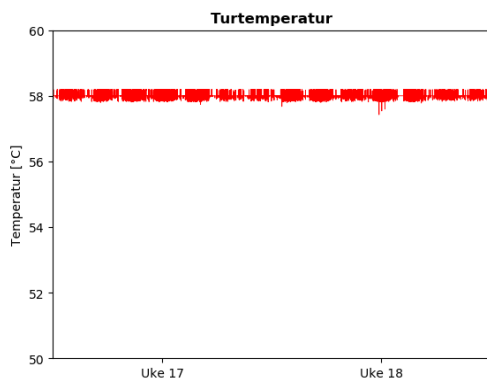
Figur 7.15a og 7.16a viser simulert turtemperatur med en volumstrøm på 0,9 l/s med henholdsvis fungerende og ikke fungerende ventilmotor på primærsiden. Med fungerende ventilmotor, ligger turtemperaturen mellom 57,4 °C og 58,1 °C over 2 uker hvilket er veldig lo-

vende. Uten fungerende ventilmotor varierer temperaturen mellom 57,4 °C og 59,9 °C. Uten fungerende ventilmotor blir massestrømmen på primærsiden unødvendig høy. Dette fører til unødvendige høye temperaturer ut av varmeveksleren, og en gjennomsnittlig returtemperatur som er 2,7 K høyere enn med fungerende ventilmotor. Sykehuset anbefales derfor å finne en løsning på problemene med denne ventilmotoren.

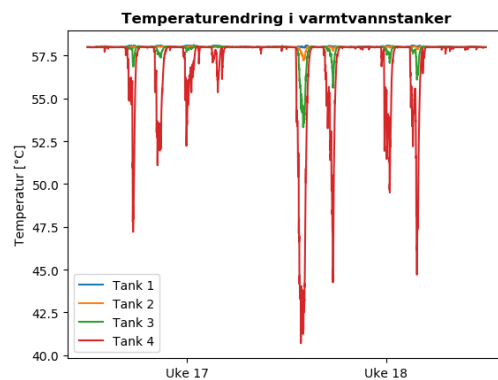
Figur 7.15b og 7.16b viser simulerte temperaturendringer i varmtvannstankene gjennom uke 17 og 18 henholdsvis med og uten fungerende ventilmotor på primærsiden. I begge figurene ser man at tankene tømmes og lades ut fra behov, men at temperaturen i Tank 1 opprettholder høy temperatur til enhver tid.

Tabell 7.5: Nøkkeltall fra simuleringer med volumstrøm på 0,9 l/s i uke 17 og 18

Nøkkeltall	m/ventil	u/ventil
Gjennomsnittlig turtemperatur	58,0 °C	59,4 °C
Minste turtemperatur	57,4 °C	57,4 °C
Antall turtemperaturer under 54 °C	0	0
Laveste temperatur i øvre del av Tank 1	58,0 °C	58,1 °C
Gjennomsnittlig returtemperatur primærside	46,6 °C	49,3 °C
Andel tankene er i forbruksmodus	7,4 %	7,4 %

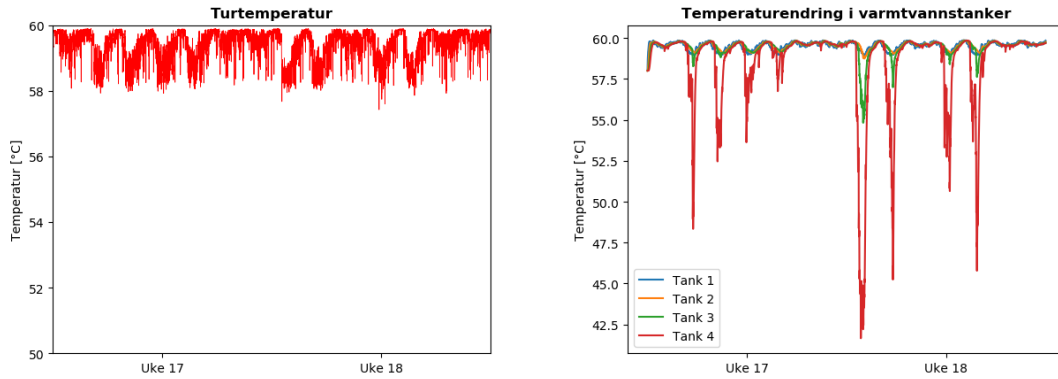


(a) Turtemperatur



(b) Temperatur i varmtvannstanker

Figur 7.15: Simulert turtemperatur og temperatur i tanker med fungerende ventilmotor og en volumstrøm på 0,9 l/s for uke 17 og 18



(a) Turtemperatur

(b) Temperatur i varmtvannstanker

Figur 7.16: Simulert turtemperatur og temperatur i tanker uten fungerende ventilmotor og en volumstrøm 0,9 l/s for uke 17 og 18

7.5 Redusering av returtemperatur på primærside

I tillegg til å forbedre turtemperaturen på tappevannskretsen i Behandlingsbygg 08 var det også et ønske om å redusere returtemperaturen på primærsiden. I følge litteraturstudiet i kapittel 2 vil dette medføre bedre driftsforhold for varmepumpene i energisentralen.

For å oppnå lavere returtemperatur på primærsiden ble det sett på to muligheter: Den ene gikk ut på å redusere settpunkt for turtemperatur på tappevannskretsen, og den andre gikk ut på å introdusere en varmeveksler som forvarmet blandingen av kaldtvann og VVC. Resultater fra simuleringer på disse scenarioene presenteres i dette delkapittelet.

7.5.1 Redusering av settpunkt på turtemperatur

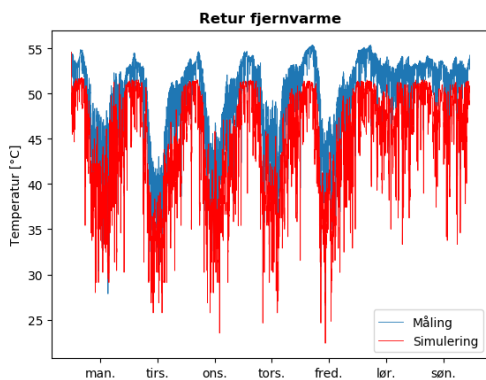
Simuleringer ble gjort med settpunkt for turtemperatur på 55 °C for å se hvordan dette påvirket turtemperaturen og returtemperaturen på primærsiden. Av nøkkeltallene presentert i tabell 7.6 ser man at den gjennomsnittlige returtemperaturen er redusert med 5 til 6 K for de ulike ukene. Samtidig opprettholdes turtemperaturen på tappevannet i uke 17 og 18, hvor laveste simulerte turtemperatur ligger på 54,8 °C. Selv om turtemperaturen er simulert under 54 °C i 31 av tidsstegene i uke 13, er laveste simulerte turtemperatur 53 °C. Da dette var en uke med høyere behov enn de to andre ukene, er dette resultatet ansett som relativt godt.

Figurene 7.17a, 7.17b og 7.18 viser en sammenligning av målinger og simuleringer av returtemperatur på primærsiden av varmeveksleren for henholdsvis uke 13, uke 17 og uke 18. Av figurene ser man tydelig at den simulerte returtemperaturen er lavere enn den målte. Det kommer også frem av figuren at returtemperaturen varierer relativt mye.

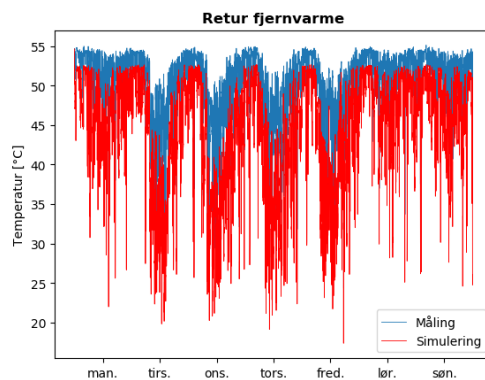
En reduksjon av settpunkt på turtemperatur medfører altså både redusert gjennomsnittlig returtemperatur på primærsiden og tilfredsstillende turtemperatur på tappevannet. Likevel lykkes ikke dette tiltaket med å opprettholde en mer stabil returtemperatur på primærsiden.

Tabell 7.6: Nøkkeltall fra simuleringer med settpunkt for turtemperatur på 55 °C for uke 13, 17 og 18

Nøkkeltall	Uke 13	Uke 17	Uke 18
Gjennomsnittlig turtemperatur	55,0 °C	55,0 °C	55,0 °C
Minste turtemperatur	53,0 °C	54,8 °C	54,8 °C
Antall turtemperaturer under 54 °C	31	0	0
Laveste temperatur i øvre del av Tank 1	49,5 °C	55,0 °C	55,0 °C
Gjennomsnittlig returtemperatur primærside	44,5 °C	44,3 °C	44,1 °C
Målt Gjennomsnittlig returtemperatur primærside	49,5 °C	50,7 °C	50,6 °C
Andel tankene er i forbruksmodus	13 %	6,6 %	8,2 %

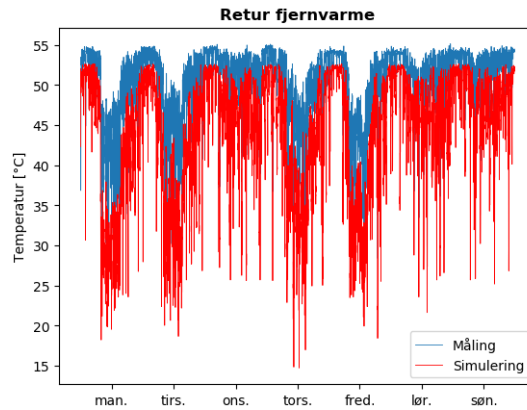


(a) Uke 13



(b) Uke 17

Figur 7.17: Simulert returtemperatur med lavere settpunkt sammenlignet med målt returtemperatur for uke 13 og 17



Figur 7.18: Simulert returtemperatur med lavere settpunkt sammenlignet med målt returtemperatur for uke 18

7.5.2 Ekstra varmeveksler for forvarming

Som nevnt i kapittel 2.3 kan forvarming av tappevann i en to-trinns løsning medføre bedre ΔT og lavere returtemperatur på primærsiden. Simuleringer med en varmeveksler på 70 kW som avgir varme til blandingen av kaldtvann og VVC ble gjennomført med utgangspunkt i målt behov fra uke 13, 17 og 18. Settpunkt for turtemperatur ble under simuleringene satt tilbake til 58 °C.

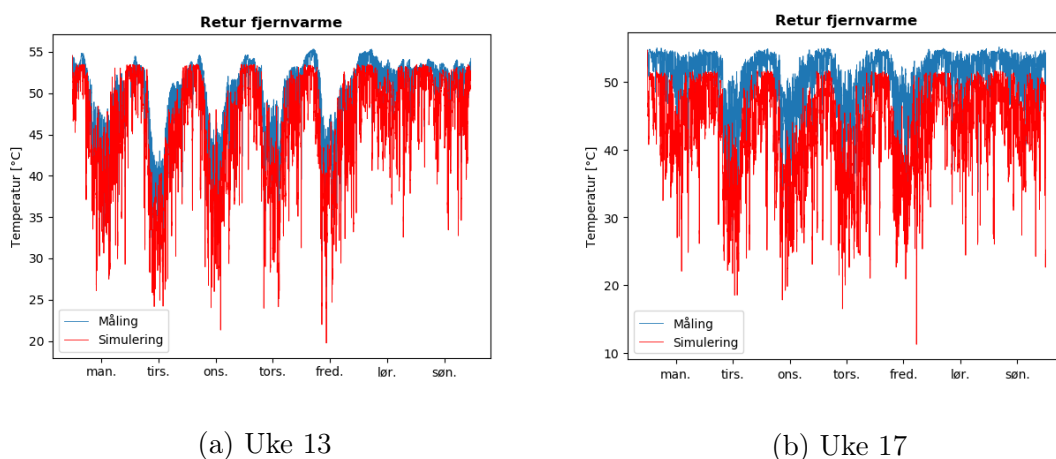
Resultatene fra simuleringen er presentert i nøkkeltallene i tabell 7.7 og i figurene 7.19a, 7.19b og 7.20. Av nøkkeltallene kan man se at turtemperaturen til enhver tid opprettholdes over 54 °C og at i uke 17 og 18 er laveste simulerte turtemperatur 57,8 °C. Returtemperaturen ble henholdsvis redusert med 4,4 K, 7,2 K og 7,8 K for de ulike ukene.

Simulert og målt returtemperatur for uke 13, 17 og 18 er presentert i figur 7.19a, 7.19b og 7.20. Som ved en reduksjon av turtemperaturen, ser man også her at returtemperaturen blir lavere, men at det fortsatt er store variasjoner. Den gjennomsnittlige reduksjonen i returtemperatur er noe bedre enn ved redusert settpunkt på turtemperatur, men ikke i stor grad.

Et kostnadsoverslag på installering av en ekstra varmeveksler er vist i vedlegg E og ble beregnet til 83 000 NOK. Da sykehuset kan oppnå tilnærmet like driftbetingelser ved regulering av settpunkt på turtemperaturen var dette ikke aktuelt. Disse resultatene støtter opp under litteraturstudiet i kapittel 2.3, hvor det ble nevnt at fordelene man får fra to-steps forvarming av tappevann ikke nødvendigvis berettiger investeringen.

Tabell 7.7: Nøkkeltall fra simuleringer med en ekstra varmeveksler i uke 13, 17 og 18

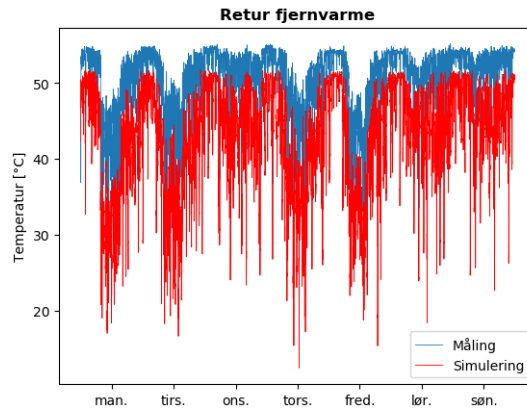
Nøkkeltall	Uke 13	Uke 17	Uke 18
Gjennomsnittlig turtemperatur	57,7 °C	58 °C	58 °C
Minste turtemperatur	54,3 °C	57,8 °C	57,8 °C
Antall turtemperaturer under 54 °C	0	0	0
Laveste temperatur i øvre del av Tank 1	51,9 °C	58,0 °C	58,0 °C
Gjennomsnittlig returtemperatur primærside	45,9 °C	42,9 °C	43,0
Målt Gjennomsnittlig returtemperatur primærside	49,5 °C	50,7 °C	50,6 °C
Andel tankene er i forbruksmodus	13 %	6,6 %	8,2 %



Figur 7.19: Simulert returtemperatur på primærsiden med ekstra varmeveksler sammenlignet med målt returtemperatur for uke 13 og 17

7.6 Foreslått forbedringstiltak

Målsettingen med denne masteroppgaven vår å komme med forslag til forbedringer med bakgrunn i simuleringer. I kapittel 7 har det blitt gjennomført en rekke simuleringer hvor ulike tiltak har medført tilfredsstillende tappevannstemperatur og redusert returtemperatur. Forslag som installering av ekstra varmtvannstank eller en varmeveksler for forvarming av tappevannet er kostbare investeringer som kan være vanskelig å gjennomføre ettersom sykehuset er i drift til enhver tid. Et langt bedre forslag er regulering av volumstrøm på sekundærsiden og en reduksjon av settpunkt på turtemperaturen. Med disse tiltakene er det som vist i kapittel 7.4.2 og 7.5.1 mulig å opprettholde tilfredsstillende turtemperatur, og re-



Figur 7.20: Simulert returtemperatur på primærsiden med ekstra varmeveksler sammenlignet med målt returtemperatur for uke 18

duasere returtemperaturen på primærsiden. Det endelige foreslåtte forbedringstiltaket krever derfor ikke installering av verken ny varmtvannstank eller en ekstra varmeveksler, men er i stedet en ny reguleringsstrategi for tappevannskretsen.

Reguleringsstrategi

Pumpe JP0001/JP0002 blir satt til å ha et pådrag tilsvarende en volumstrøm på 0,9 l/s frem til temperaturen i øvre del av Tank 2 blir kaldere enn 51 °C . Når dette skjer, vil pumpen trinne opp til et pådrag på 1,25 l/s for å forhindre at tankene tømmes helt. Et pådrag på 1,25 l/s medfører også at varmeveksleren oppnår ønsket ΔT i mesteparten av tilfellene. Dette pådraget bidrar til at tankene raskere går i lademodus. Når temperaturen i nedre del av Tank 4 er over 54,6 °C, anses tankene fulladet, og pådraget reduseres tilbake til 0,9 l/s.

Simuleringer på foreslått forbedringstiltak

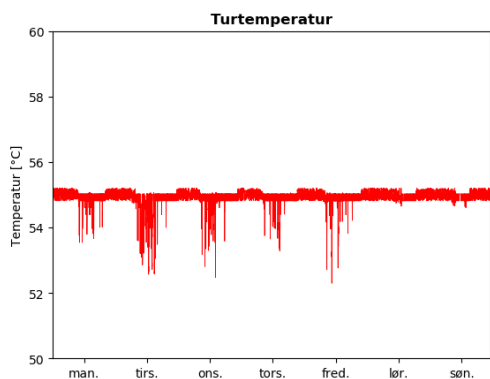
Simuleringer med det foreslåtte forbedringstiltaket ble gjennomført med bakgrunn i forbruk fra uke 13, 17 og 18 er presentert under.

Figur 7.21a, 7.21b og 7.22a viser simulert turtemperatur for henholdsvis uke 13, 17 og 18. Av figurene ser man at turtemperaturen opprettholdes mellom 54,8 °C og 55,2 °C grader for uke 17 og uke 18, men at den får noen utslag i uke 13. Disse utslagene er maksimalt 1,7 K lavere enn kravet på turtemperatur i en uke med høyt forbruk. Da dette ikke medfører fare

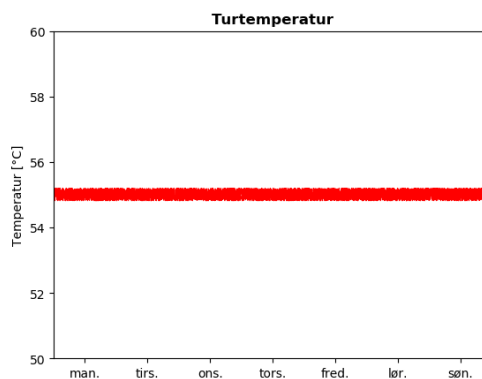
for legionella, og da turtemperaturen er simulert over 54 °C i 99,3 % av tiden anses disse resultatene som gode.

Tabell 7.8: Nøkkeltall fra simuleringer med foreslått forbedringstiltak

Nøkkeltall	Uke 13	Uke 17	Uke 18
Gjennomsnittlig turtemperatur	54,9 °C	55,0 °C	55,0 °C
Minste turtemperatur	52,3 °C	54,8 °C	54,8 °C
Antall turtemperaturer under 54 °C	205	0	0
Laveste temperatur i øvre del av Tank 1	49,0 °C	55,0 °C	55,0 °C
Gjennomsnittlig returtemperatur primærside	44,4 °C	44,3 °C	44,1 °C
Målt Gjennomsnittlig returtemperatur primærside	49,5 °C	50,7 °C	50,6 °C
Andel tankene er i forbruksmodus	38,2 %	6,5 %	8,2 %



(a) Uke 13

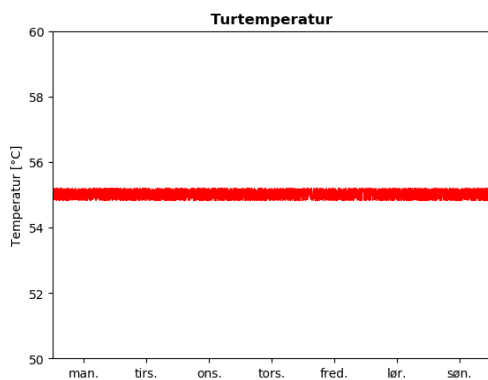


(b) Uke 17

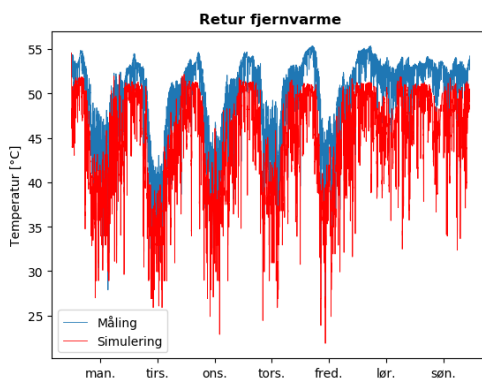
Figur 7.21: Simulert turtemperatur med foreslått forbedringstiltak i uke 13 og uke 17

Figur 7.22b, 7.23a og 7.23b viser simulert returtemperatur på primærsiden sammenlignet med målinger. Figurene viser at returtemperaturen reduseres med 5-6 K ut fra uken, men at de fortsatt varierer en del.

Det foreslåtte forbedringstiltaket medfører altså tilfredsstillende turtemperaturer i 99,3 % av tilfellene, og bidrar til en reduksjon av den gjennomsnittlige returtemperaturen på 5-6 K.

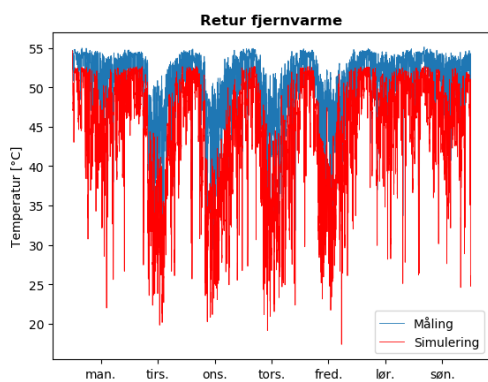


(a) Turtemperatur uke 18

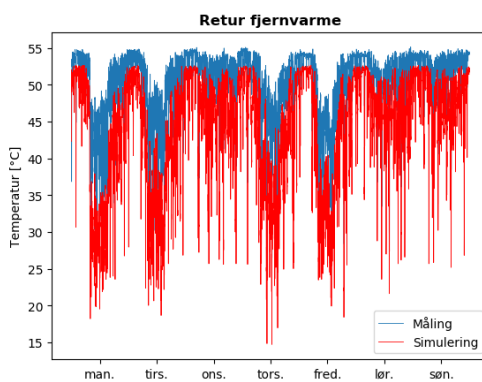


(b) Returtemperatur uke 13

Figur 7.22: Simulert turtemperatur med forbedringstiltak uke 18 og simulert returtemperatur med forbedringstiltak sammenlignet med målt returtemperatur for uke 13



(a) Uke 17



(b) Uke 18

Figur 7.23: Simulert returtemperatur med foreslått forbedringstiltak sammenlignet med målt returtemperatur for uke 17 og uke 18

8. Diskusjon

I kapittel 7 ble analyser av målinger og simuleringer på tappevannskretsen i Behandlingsbygg 08 presentert. Målingene ble brukt til å gi en forklaring av problemene i tappevannskretsen, og simuleringer ble brukt for å komme med forbedringsforslag. Simuleringene viste at det var mulig å oppnå tilfredsstillende turtemperatur ved å regulere volumstrømmen over varmeveksleren korrekt, og at returtemperaturen kunne reduseres ved å redusere settpunkt på turtemperatur. I dette kapitlet diskuteres validiteten av resultatene fra målinger, og fra simuleringer gjort med simuleringmodellen.

8.1 Målinger

Med bakgrunn i målinger fra uke 13, ble problemene på tappevannskretsen forklart i kapittel 7.1. Der kom det frem at turtemperaturen var altfor lav grunnet for høy volumstrøm over varmeveksleren. Den høye volumstrømmen medførte at varmeveksleren ikke greide å løfte temperaturen til 58 °C, og at tankene hele tiden var i lademodus. Dette delkapitlet diskuterer validiteten av denne forklaringen med bakgrunn i måleusikkerheten til de ulike målerne nevnt i delkapittel 4.2 og 4.3.

Målingene på temperaturen ut fra varmeveksleren støtter opp under denne forklaringen. Laveste målte temperatur var 40,9 °C, høyeste målte ΔT over varmeveksleren var 20,7 K og gjennomsnittlig ΔT 5 K. Med en måleusikkerhet på temperaturmålingene på under 0,9 K, er dette fellende resultater. Den høye volumstrømmen medfører for liten ΔT og for lave temperaturer i varmeveksleren. Volumstrømmåleren på turledningen har en usikkerhet på 3 %. Med denne usikkerheten er fortsatt alle målingene under 2,6 l/s hvilket betyr at tankene var i lademodus hele denne uken. Forklaringen på problemene i tappevannskretsen beskrevet i kapittel 7.1 er dermed ansett som god ut fra måleusikkerheten på de ulike målingene.

8.2 Simuleringsperioder og endelig forbedringstiltak

Det første forbedringstiltaket var en endring av pådraget på pumpe JP0001/JP0002 for å få bedre ΔT over varmeveksleren, og for å forhindre at tankene alltid var i lademodus. Dette

forslaget ble foreslått med bakgrunn i simuleringer som kun tok utgangspunkt i målinger fra uke 13. Som forklart i delkapittel 7.3, var tappevannsbehovet i denne uken en del høyere enn ukene som kom, og dette resulterte i et mindre suksessfullt forbedringstiltak. Å anta at tappevannsbehovet skulle vært konstant fra uke til uke var dermed en svakhet ved gjennomføringen av denne oppgaven. Det første forbedringstiltaket burde vært begrunnet i simuleringer på flere uker.

Det er da naturlig å stille spørsmål om hvorvidt det endelige forbedringstiltaket vil takle fremtidens tappevannsbehov. Dette forslaget er testet på målt forbruk fra uke 13, 17 og 18. Tappevannsbehovet varierer i disse ukene, og validiteten av dette forslaget er derfor langt bedre enn det første forbedringstiltaket. Likevel er det vanskelig å forutsi tappevannsbehovet i fremtiden, og det endelige forbedringstiltaket ville vært ansett sikrere om det hadde blitt gjort simuleringer med bakgrunn i forbruk fra langt flere uker.

8.2.1 Endelig forbedringstiltak

Som et resultat av alle målingene og simuleringene i kapittel 7, ble det foreslått et reguleringsforslag på pumpe JP0001/JP0002. Dette forslaget tok utgangspunkt i at pumpene kun regulerte volumstrømmen over varmeveksleren mellom 0,9 l/s og 1,25 l/s hvilket er en relativt enkel regulering. Pumpene kan i utgangspunktet trinnreguleres, og et bedre forslag kunne utnyttet dette. Pådraget kunne da blitt justert opp og ned ut fra behov i kretsen, og denne reguleringen ville vært mer robust til å takle fremtidens tappevannsbehov.

8.2.2 Flere simuleringer

I kapittel 7 ble det gjennomgått en rekke simuleringer med ulike oppsett i tappevannskretsen og ulik volumstrøm over varmeveksleren. Det ble lagt vekt på å teste én ting av gangen for å se virkningen av ulike forbedringsforslag. For eksempel ble det i delkapittel 7.2.2 gjort en simulering med en større varmeveksler hvor volumstrømmen over varmeveksleren ble satt til dimensjonerende 1,15 l/s. Resultatene fra denne simuleringen viste at turtemperaturen ble noe kaldere enn ønsket på tirsdag. Kanskje ville en simulering gjort med en annen volumstrøm gitt bedre resultat? Et annet eksempel er simuleringen med forvarming i kapittel 7.5.2. Denne ble gjort med én volumstrøm over varmeveksleren, og uten å senke settpunkt på turtemperaturen. Kanskje ville flere simuleringer på de ulike forbedringstiltakene, eller også en

blanding av disse gitt langt mer positive resultater enn hva det endelige forbedringstiltaket viser?

Et systematisk oppsett av simuleringer på ulike forbedringstiltak tydeliggjør godt hva som fungerer og hva som ikke fungerer. Dette går likevel på bekostning av hvor nøye hvert forbedringstiltak er testet ut.

8.3 Svakheter ved simuleringsmodellen og avvik fra målte verdier

Simuleringsmodellen av tappevannskretsen ble programmert i programmeringsspråket Python som forklart i kapittel 6. I kapittel 7.4 kom det frem at modellen simulerte høyere verdier i varmtvannstankene enn hva som var målt. Disse resultatene kan stille spørsmål ved validiteten av simuleringsmodellen og diskuteres derfor i dette kapitlet.

8.3.1 Avvik mellom målte og simulerte temperaturer i varmtvannstankene

I kapittel 7.4 ble det presentert en sammenligning mellom målte og simulerte data fra uke 17 og 18. Som figur 7.13a og 7.13b viser, simulerer modellen turtemperaturen relativt godt. Derimot ser man av figur 7.14 at simuleringen av temperaturen i tankene i uke 18 ligger 2-4 K over målte temperaturer i disse ukene. Dette er resultater som kan stille spørsmål ved nøyaktigheten av modellen, og diskuteres derfor nærmere her.

Temperaturuten ut av varmeveksleren og turtemperaturen er begge målt av Schneider sitt system. I uke 18 viser disse målingene henholdsvis 7295 og 6052 temperaturer over 58 °C. Som vist i kapittel 7.3, var tankene i lademodus i 99,6 % av tiden, og det ville derfor vært naturlig å se temperaturer over 57 °C i varmtvannstankene. En forklaring kan være at målepunktene på dataloggeren ikke lå langt nok under rørisolasjonen og at de ble påvirket fra temperaturen i kundesentralen, eller at dataloggeren måler for lave verdier. Sistnevnte burde i så fall kommet frem av testmålinger på dataloggeren nevnt i kapittel 4.2. En annen forklaring kan være at målingene på Schneider sitt system måler for høye temperaturer. Det ble aldri gjort en test av disse temperaturmålingene, og det kan derfor ikke konkluderes hvilke av målingene som måler feil, eller om noen av dem gjør det i det hele tatt. Om temperaturen

i varmtvannstankene blir beregnet til å være varmere enn den egentlig er, kan dette medføre at resultatene fra forbedringstiltakene nevnt i kapittel 7 ikke er like positive som det kommer frem av nøkkeltallene og grafene.

En tredje og bedre forklaring ligger i beregningsmetoden på simuleringsmodellen. Som forklart i delkapittel 6.4 er hver varmtvannstank modellert som to tanker på 500 l og temperaturen i disse deltankene er beregnet som en gjennomsnittsverdi. Målepunktet for Tank 3 ligger på røret mellom Tank 2 og Tank 3 mens den simulerte verdien er satt til å være gjennomsnittsverdien i øvre del av Tank 3. I Uke 18 var tankene i lademodus nærmest hele tiden, og nedkjølingen av tankene skjedde derfor fra Tank 1 til Tank 2 osv. Dette betyr at når kaldt vann fra Tank 1 strømmer til Tank 2, vil måleren registrere dette langt før øvre delvolum av Tank 2 blir avkjølt og simuleringene registrerer denne temperaturnedgangen. Med denne forklaringen gir det fullstendig mening at de simulerte temperaturene i varmtvannstankene i uke 18 skal ligge over målingene. Det gir derimot ingen garanti for at dette avviket bør være så mye som 4 K, og en mer nøyaktig beregning av temperaturen i varmtvannstankene kunne derfor vært å foretrekke.

I vedlegg A er det presentert en rekke grafer som sammenligner målte temperaturer med simulerte temperaturer. Simuleringsmodellen viser her at den simulerer temperaturtrender relativt godt for alle målinger, og er med dette med på å styrke validiteten av modellen og resultatene presentert i kapittel 7. Selv om det stilles spørsmål ved nøyaktigheten av beregningene i varmtvannstankene er det med overnevnte forklaring og sammenligninger mellom målinger og simuleringer i vedlegg A sannsynliggjort at simuleringsmodellen gir et godt bilde av hvordan temperaturen endrer seg i tappevannskretsen. Resultatene i kapittel 7, og den positive virkningen av det endelige forbedringsforslaget er da også sannsynliggjort.

8.4 Diskusjon opp mot teori

Resultatene i delkapittel 7.1 viste at turtemperaturen på tappevannskretsen ikke ble opprettholdt som følger av altfor stor volumstrøm over varmeveksleren på sekundærsiden. Dette er helt i tråd med teorien i delkapittel 2.3 hvor det eksplisitt legges vekt på at denne volumstrømmen er avgjørende for hvordan kretsen presterer. Disse resultatene kan også brukes som en begrunnelse og en oppfordring til å gjøre mer forskning på hvordan ulike reguleringsstrategier av volumstrømmen på sekundærsiden påvirker drift av eksisterende og fremtidige kundesentraler.

Redusering av returtemperatur er som nevnt i kapittel 2 første steg mot 4GFV og er med på å gi bedre driftsbetingelser for varmepumpene i energisentralen. I delkapittel 7.5.2 ble det gjennomført simuleringer med en ekstra varmeveksler for to-trinns forvarming. Som forventet fra faglitteratur i delkapittel 2.3 medførte dette en reduksjon i returtemperaturen på fjernvarmesiden. Denne reduksjonen var likevel ikke spesielt bedre enn reduksjonen som ble oppnådd i delkapittel 7.5.1 ved lavere settpunkt på tappevannet. Installering av en ekstra forvarmer er langt dyrere enn å endre settpunkt på turtemperatur. Funnene i denne oppgaven støtter derfor opp under litteratur fra delkapittel 2.3 hvor det nevnes at installeringskostnadene knyttet til forvarming ikke nødvendigvis rettferdiggjør fordelene. Disse resultatene peker også mot at to-trinns forvarming i LTFV er mindre aktuelt, men at man heller bør se på reguleringsstrategier.

9. Konklusjon

I denne oppgaven ble det programmert og validert en simuleringsmodell av tappevannskretsen i Behandlingsbygg 08 på Sykehuset Østfold Kalnes. Målinger og simuleringer på kretsen tydeliggjorde at problemene med å oppnå ønsket turtemperatur var grunnet altfor høy volumstrøm over varmeveksleren på sekundærsiden. Dette medførte for lav temperatur ut av varmeveksleren, og varmtvannstanker som ble ladet med for kaldt vann. Ved å regulere pådraget på pumpen som styrer volumstrømmen over varmeveksleren var det i alle tilfellene mulig å opprettholde tilfredsstillende turtemperatur. Dette stemmer overens med faglitteratur hvor korrekt volumstrøm er trukket frem som avgjørende for hvordan lignende tappevannskretser presterer (Zijdemans, 2012).

For å redusere returtemperaturen på fjernvarmen ble det gjort simuleringer med redusert settpunkt på turtemperatur, og med en ekstra varmeveksler som forvarmet tappevannet. Simuleringene viste at en reduksjon av turtemperaturen utgjorde en gjennomsnittlig reduksjon i returtemperaturen på 5 til 6 K uten at dette gikk ut over turtemperaturen. Tilsvarende resultat ble oppnådd ved simuleringer av forvarming med ekstra varmeveksler koblet i serie på primærsiden. Med tanke på kostnadene av å installere en ny varmeveksler kontra å endre reguleringen av en pumpe, støtter disse simuleringene erfaringer fra svensk fjernvarmesystemer hvor man etter hvert har gått bort fra dette (Frederiksen and Werner, 2013).

Med bakgrunn i resultatene nevnt over ble det foreslått et forbedringstiltak som gikk ut på å endre reguleringsstrategien i kretsen. Et enkelt reguleringsforslag hvor pådraget på pumpen justeres ettersom temperaturen i øvre del av Tank 2 går under et settpunkt ble programmert og simuleringer viste tilfredsstillende turtemperatur i 99,3 % av tidsstegene over 3 uker. Laveste turtemperatur ble simulert til 52,3 °C noe som kun er 1,7 K lavere enn kravet fra Sykehuset. Gjennomsnittlig returtemperatur på primærsiden ble redusert med 5 til 6 K.

10. Videre arbeider

I denne oppgaven ble en simuleringsmodell brukt til å foreslå et forbedringstiltak på Sykehuset Østfold Kalnes. Modellen er som nevnt i delkapittel 6.7 programmert med begrensninger som at den ikke tar hensyn til trykk, og at den ikke beregner varmetap fra rørstrekk og varmtvannstanker. Et naturlig forbedringspotensial og forslag til videre arbeider er derfor å videreutvikle simuleringsmodellen ved å utbedre disse begrensningene.

I kapittel 7.4 ble det presentert målinger som stilte spørsmål ved beregningsmetoden for temperaturen i varmtvannstankene. I en videreutviklet simuleringsmodell bør beregningen av temperaturer i varmtvannstanker være mer nøyaktig og mulig å validere opp mot målinger.

Med en forbedret simuleringsmodell kan det gjennomføres simuleringer som kan brukes til å komme med et bedre forbedringstiltak. Det nye forbedringstiltaket bør benytte seg av pumpe-nes mulighet til å trinnreguleres for å sikrere kunne ta hånd om fremtidens tappevannsbehov.

En slik simuleringsmodell vil også kunne bli brukt til å analysere driftsstrategier for kundesentraler i fremtidens fjernvarmenett.

10.1 Tanker om fremtiden

Fokuset på miljøvennlige løsninger står etter hvert sterkere og sterkere i bygg- og anleggsbransjen. Dette medfører nytenkende og energieffektive løsninger som implementeres i bygninger. Flere nyere anlegg har installert mange temperatur- og energimålere. Disse målerne kan potensielt generere enorme mengder data om hvordan ulike bygg driftes og hvor problemene ligger. I fremtiden bør disse dataene analyseres av algoritmer som ikke bare kan motta data, men som også kan gjennomføre endringer på systemet selv. På denne måten vil man kunne gi jobben med å innregulere et system til en algoritme. Den samme algoritmen bør kunne utføre tester på anlegget selv, og lære av sine feil. Denne oppgaven er et resultat av 20 ukers arbeid og presenterer simuleringer fra 8 ulike forbedringstiltak. Med algoritmer som nevnt over, ville det vært mulig å gjennomføre disse simuleringene på noen sekunder og forbedret driftssituasjonen uten at noen ville merket problemene.

Bibliografi

- DVGW (2004). *Drinking water heating and drinking water piping systems - Technical measures to reduce Legionella growth - Design, construction, operation and rehabilitation of drinking water installations*. Tilgjengelig fra: <https://www.beuth.de/en/technical-rule/dvgw-w-551/74193855>. (Hentet: 31. januar 2019).
- Ebnes, K. and Hagen, E. (2017). *Kalnes energisentral*. Masteroppgave, Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.
- Elmegaard, B., Ommen, T. S., Markussen, M., and Iversen, J. (2016). Integration of space heating and hot water supply in low temperature district heating. *Energy and Buildings*, 124:255 – 264.
- EuropeanCommission (2019). *Energy performance of buildings*. Tilgjengelig fra: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings>. (Hentet: 1. juni 2019).
- Frederiksen, S. and Werner, S. (2013). *District Heating and Cooling*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Kamstrup (2017). *MULTICAL 602*. Tilgjengelig fra: <http://www.vit.sk/wp-content/uploads/2017/01/MULTICAL602-TechnicalDescription-en.pdf>. (Hentet: 10. desember 2018).
- Kamstrup (2018). *Multical 62*. Tilgjengelig fra: <http://products.kamstrup.com/ajax/downloadFile.php?uid=5ae8293d00371&display=1>. (Hentet: 28. februar 2019).
- Kontu, K., Rinne, S., and Junnila, S. (2019). Introducing modern heat pumps to existing district heating systems – global lessons from viable decarbonizing of district heating in finland. *Energy*, 166:862 – 870.
- Kothandaraman, C. and Subramanian, S. (2006). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New Age International.
- Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., and Mathiesen, B. V. (2014). 4th generation district heating (4gdh): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*, 68:1 – 11.

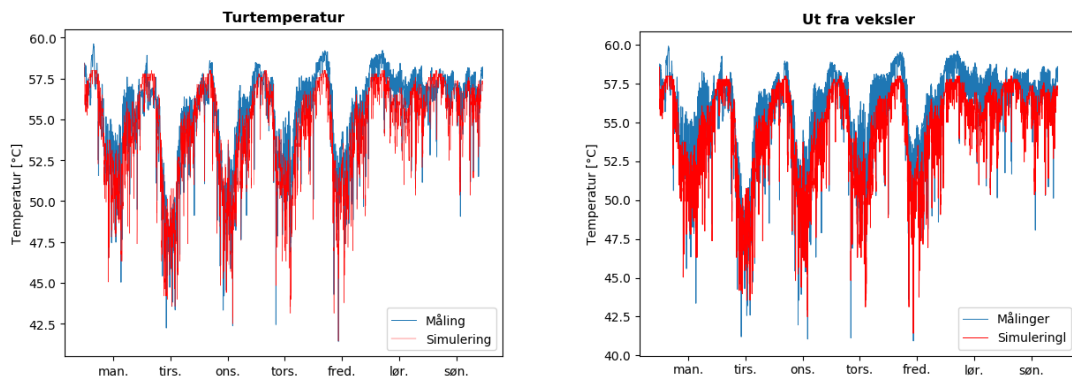
- Lund, H., Østergaard, P. A., Chang, M., Werner, S., Svendsen, S., Sorknæs, P., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., Mortensen, B. O. G., Mathiesen, B. V., Bojesen, C., Duic, N., Zhang, X., and Möller, B. (2018). The status of 4th generation district heating: Research and results. *Energy*, 164:147 – 159.
- Lund, R., Østergaard, D. S., Yang, X., and Mathiesen, B. V. (2017). Comparison of low-temperature district heating concepts in a long-term energy system perspective.
- matplotlib (2017). *Choosing Colormaps*. Tilgjengelig fra: <https://matplotlib.org/users/colormaps.html>. (Hentet: 28. mars 2019).
- Moran, M. J., Shapirro, H. N., Boettner, D. D., and Bailey, M. B. (2012). Principles of engineering thermodynamics.
- picoTechnology (2018). *TC-08 8-channel thermocouple data logger*. Tilgjengelig fra: <https://www.picotech.com/download/datasheets/usb-tc-08-thermocouple-data-logger-data-sheet.pdf>. (Hentet: 28. februar 2019).
- Ploskic, A. (2013). *Technical solutions for low-temperature heat emission in buildings*. PhD thesis, KTH Royal Institute of Technology.
- Prestvold (2019). *Simulation on Temperature Variations in Domestic Hot Water System*. Tilgjengelig fra: <https://www.youtube.com/watch?v=hV70X0ULwCs&feature=youtu.be>. (Hentet: 08. juni 2019).
- Prestvold, K. (2018). *Analyse av kundesentral med hensyn på overdimensjonering*. Prosjekt-oppgave, Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet.
- Reichelt, A. (2005). *Legionella (legionærsyken)*. Tilgjengelig fra: <https://www.lommelegen.no/infeksjoner/artikkel/legionella-legionaersyken/69089767>. (Hentet: 20. januar 2019).
- Schneider (2013). *STP100*. Tilgjengelig fra: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Technical+leaflet&p_File_Name=STP100_DataSheet_03-00203-04-en.pdf&p_Doc_Ref=03-00203. (Hentet: 28. februar 2019).
- Stout, J. E. and Yu, V. L. (2003). Experiences of the first 16 hospitals using copper-silver ionization for legionella control: implications for the evaluation of other disinfection modalities. *Infection control and hospital epidemiology*, 24 8:563–8.

- Tereshchenko, T. and Nord, N. (2018). Future trends in district heating development. *Current Sustainable / Renewable Energy Reports*, 5(2):172–180.
- Yang, X., Li, H., and Svendsen, S. (2016a). Alternative solutions for inhibiting legionella in domestic hot water systems based on low-temperature district heating. *Building Services Engineering Research & Technology*, 34(4):468–478.
- Yang, X., Li, H., and Svendsen, S. (2016b). Decentralized substations for low-temperature district heating with no legionella risk, and low return temperatures. *Energy*, 110:65 – 74. Special issue on Smart Energy Systems and 4th Generation District Heating.
- Zijdemans, D. (2012). *Vannbaserte oppvarmings- og kjølesystemer*. Oslo: Skarland Press AS.
- Østergaard, D. and Svendsen, S. (2017). Space heating with ultra-low-temperature district heating – a case study of four single-family houses from the 1980s. *Energy Procedia*, 116:226 – 235. 15th International Symposium on District Heating and Cooling, DHC15-2016, 4-7 September 2016, Seoul, South Korea.
- Østergaard, D. S. and Svendsen, S. (2018). Are typical radiators over-dimensioned? an analysis of radiator dimensions in 1645 danish houses. *Energy and Buildings*, 178:206 – 215.

A. Figurer fra validering av simuleringssmodellen

I dette vedlegget presenteres grafer som sammenligner målinger og simulerte verdier. Måleusikkerhet for målingene er forklart i kapittel 4.2, og oppsett for simuleringen i vedlegg F.

Figur A.1a viser simulert og målt turtemperatur. Av figuren kommer det frem at simuleringene følger trendene, men i noen tilfeller underestimerer målt turtemperatur. Dette kan ha sin forklaring i figur A.1b som viser simulert og målt turtemperatur ut fra varmeveksleren. Denne viser også at simuleringen ved flere anledninger underestimerer de målte temperaturene. En underestimering av temperaturen ut fra varmeveksleren tyder på at funksjonen som skal simulere varmeveksleren kunne vært bedre eller at termometeret etter varmeveksleren måler for høye verdier.



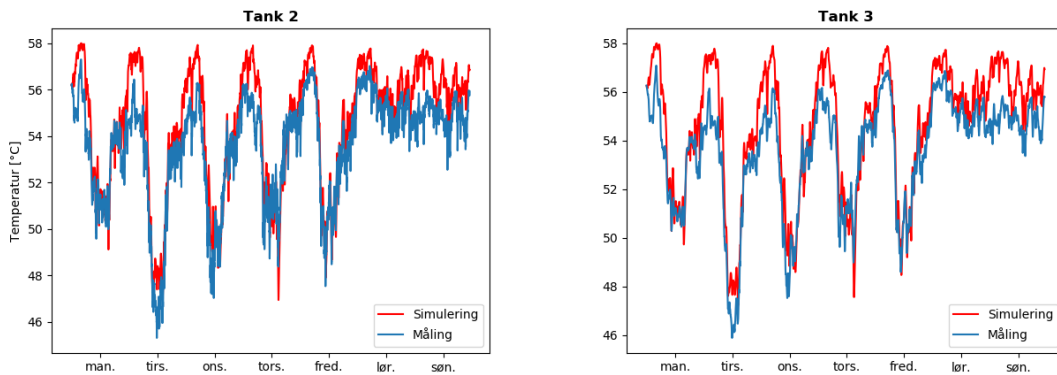
(a) Turtemperatur

(b) Temperatur ut av varmeveksler

Figur A.1: Sammenligning mellom simulert og målt turtemperatur og temperatur ut av varmeveksler

Figur A.2a, A.2b og A.3a viser henholdsvis en sammenligning mellom målte og simulerte verdier i Tank 2, Tank 3 og Tank 4. Målepunktene ligger på rørene mellom tankene, mens de simulerte verdiene er hentet i øvre del av tanken. Figur 6.6a viser da simulerte verdier for øvre del av Tank 2, og målte verdier på røret mellom Tank 1 og Tank 2 osv. Av figurene ser man

at temperaturen i Tank 2 og Tank 3 estimeres relativt godt, men at simuleringen av temperaturen i Tank 4 har en tendens til å overestimere temperaturen. Målingene mellom tankene ble gjort av en datalogger med en potensiell målefeil på $\pm 1,2K$ (kapittel 4.2). Legger man denne målefeilen i simuleringsmodellens favør, vil modellen treffe langt bedre overens med målingene. Likevel kan man se at simuleringen gir større temperaturvariasjoner enn målingene tilsier. Dette kan tyde på at beregningsmetoden av temperaturen i varmtvannstankene tar utgangspunkt i for stor blanding, og at det reelt sett er større grad av sjikting i tankene.



(a) Temperatur i Tank 2

(b) Temperatur i Tank 3

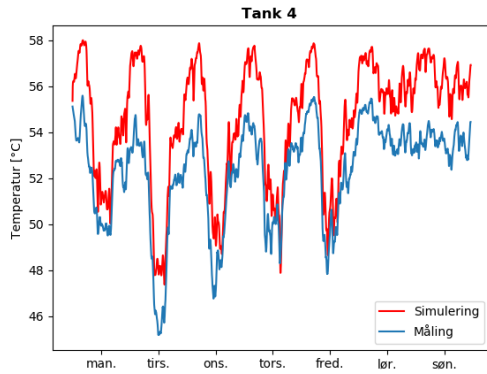
Figur A.2: Sammenligning mellom simulert og målt temperatur i Tank 2 og Tank 3

Figur A.3b viser simulert temperatur inn på varmeveksleren sammenlignet med målt temperatur inn på varmeveksleren. Simuleringen ser ut til å gi et godt bilde av temperaturtrendene, men overestimerer i enkelte tilfeller temperaturen inn på veksleren. En overestimering av temperaturen inn på veksleren og en underestimering av temperaturen ut av veksleren forsterker mistanken om at modellen av varmeveksleren kunne vært mer nøyaktig.

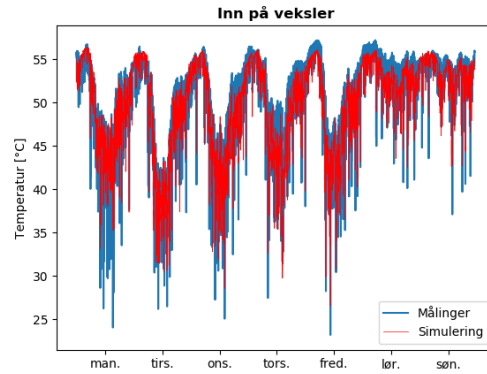
Figur A.4a viser simulerte og målte verdier på varmtvannssirkulasjon. Som man ser av figuren, simuleres temperaturtrendene med noen avvik. Disse avvikene er i størrelsesorden 2K og skyldes med stor sannsynlighet den enkle beregningsmodellen av temperaturen på sirkulasjonen forklart i kapittel 6.4.

Figur A.4b viser simulerte og målte verdier på blanding av kaldtvann og varmtvannssirkulasjon. Temperaturtrendene simuleres også her relativt godt, hvilket betyr at metoden for å beregne temperaur i møtende strømmer forklart i kapittel 3.1 er god.

Figur A.5 viser simulerte og målte returtemperaturer på primærsiden av varmeveksleren. Også her simuleres temperaturtrendene ganske godt, men man kan se en tendens av at disse

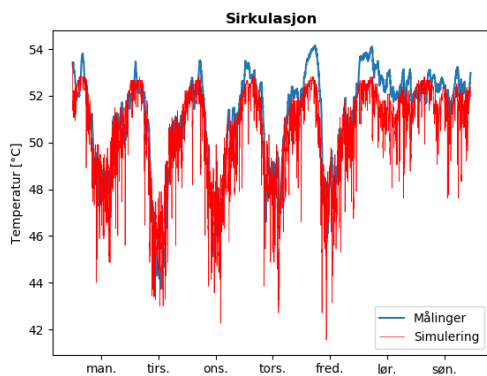


(a) Temperatur i Tank 4

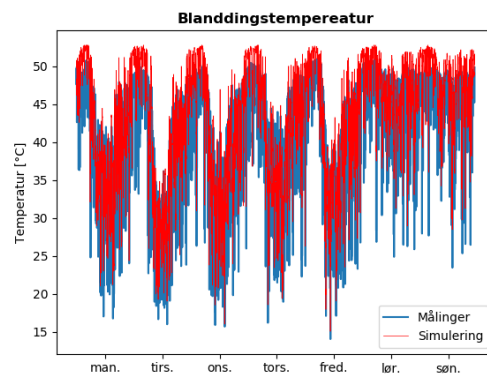


(b) Temperatur i Tank 3

Figur A.3: Sammenligning mellom simulert og målt temperatur i Tank 4 og temperatur inn på varmeveksleren



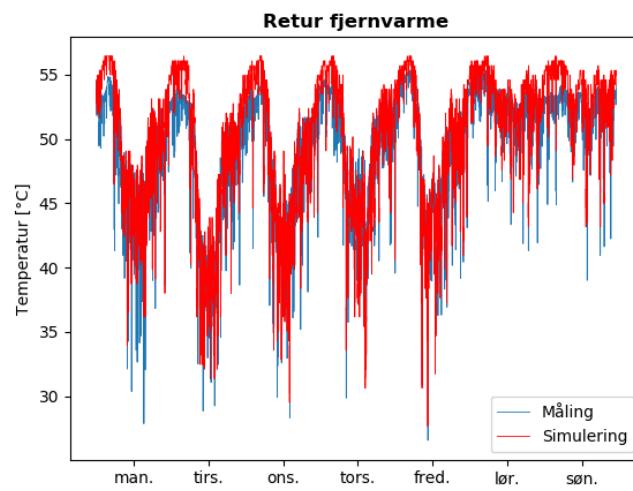
(a) Temperatur på varmtvannssirkulasjon



(b) Temperatur på blanding av varmtvannssirkulasjon og kaldtvann

Figur A.4: Sammenligning mellom simulert og målt temperatur på varmtvannssirkulasjon, og blanding av varmtvannssirkulasjon og kaldtvann

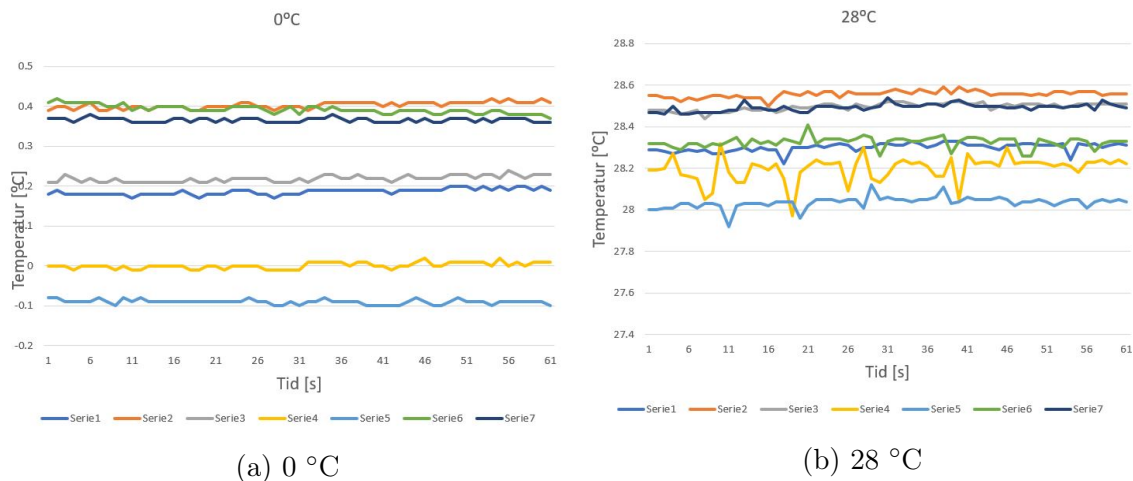
overestimeres. Dette bidrar til at gjennomsnittelig målte returtemperatur er 0,8 K lavere enn gjennomsnittlige simulerte returtemperatur.



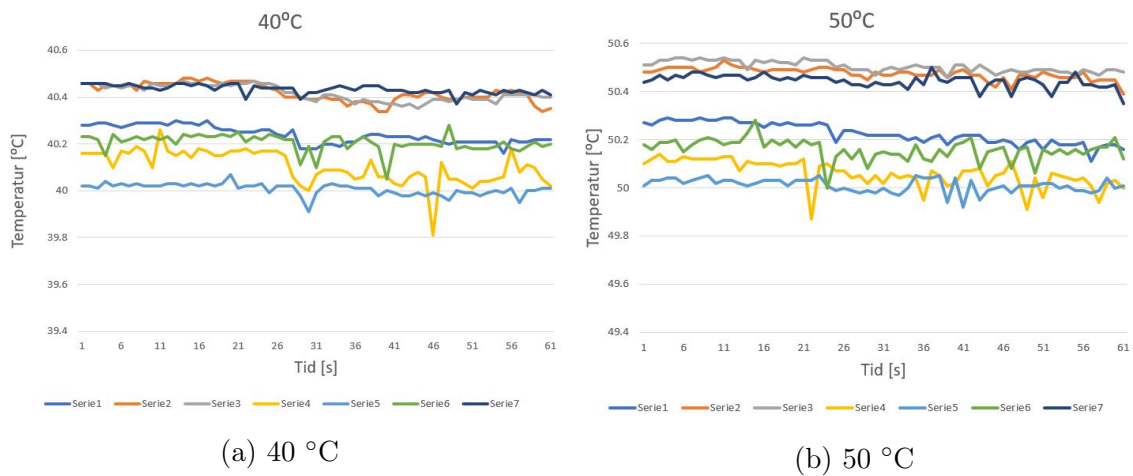
Figur A.5: Sammenligning mellom simulert og målt returtemperatur på primærside av varmeveksleren

B. Testmålinger gjort med datalogger

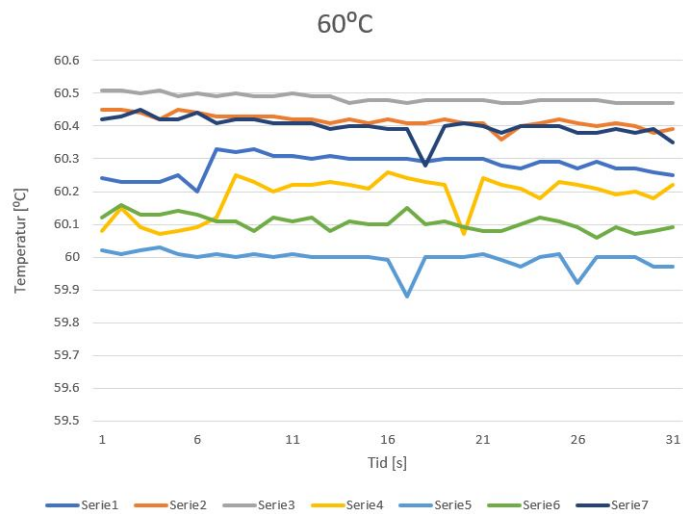
For å se om dataloggeren målte temperaturer innefor spesifikasjonene gitt i kapittel 4.2, ble det gjort testmålinger i et termisk sirkulasjonskar av typen HAKE N2. Målinger ble gjort med temperatursettpunkt på 0 °C, 28 °C, 40 °C, 50 °C og 60°C, og grafene fra disse målingene er presentert i henholdsvis figur B.1a, B.1b, B.2a, B.2b og B.3. Som figurene viser er alle målingene innenfor spesifikasjonene på dataloggeren som sier at den har en måleusikkerhet på mellom 1,10 K til 1,17 K for temperaturer mellom 30 °C og 60 °C (picoTechnology, 2018).



Figur B.1: Målinger gjort av datalogger i termisk blandekar med temperatur på 0 °C og 28 °C

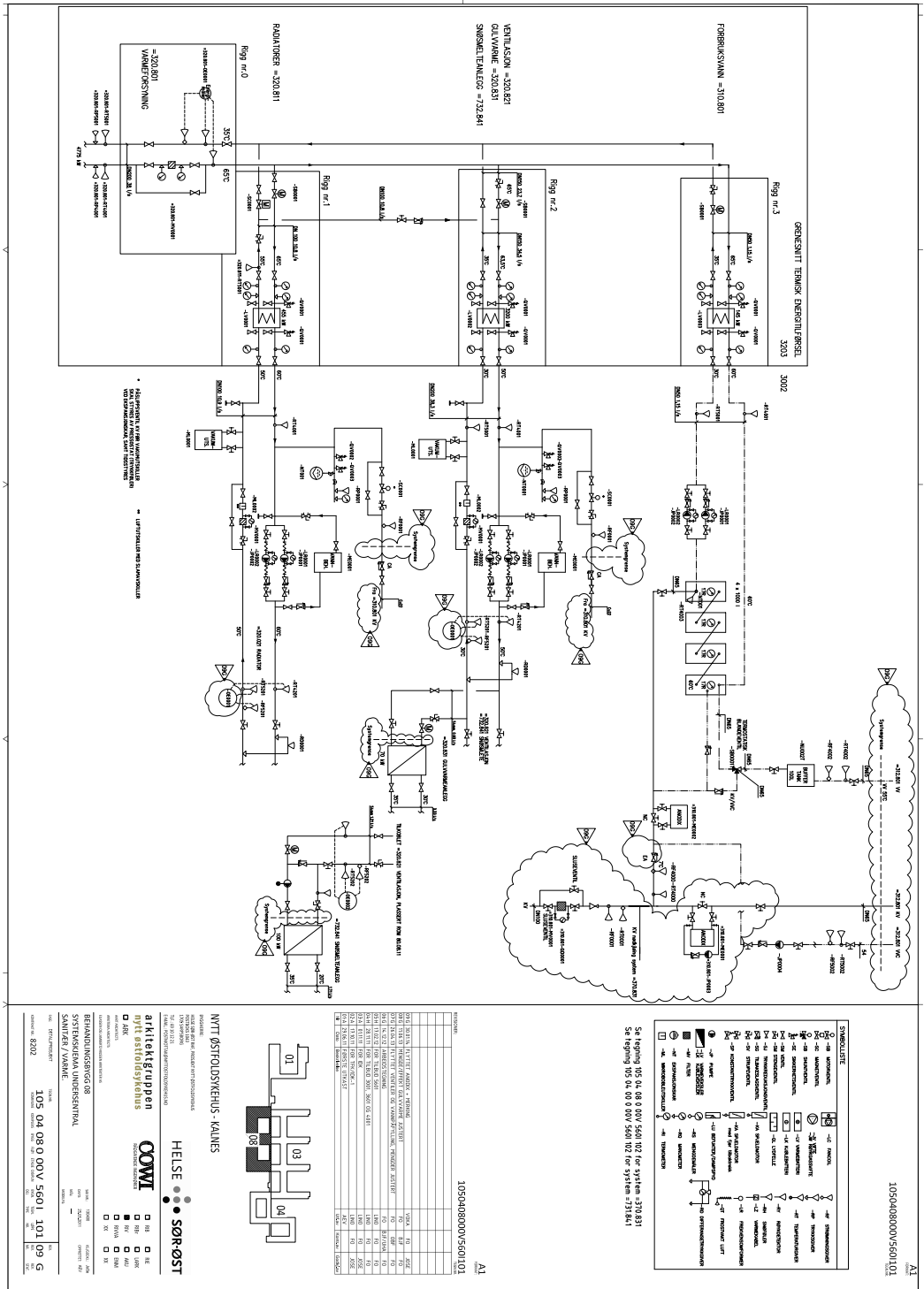


Figur B.2: Målinger gjort av datalogger i termisk blandekar med temperatur på 40 °C og 50 °C

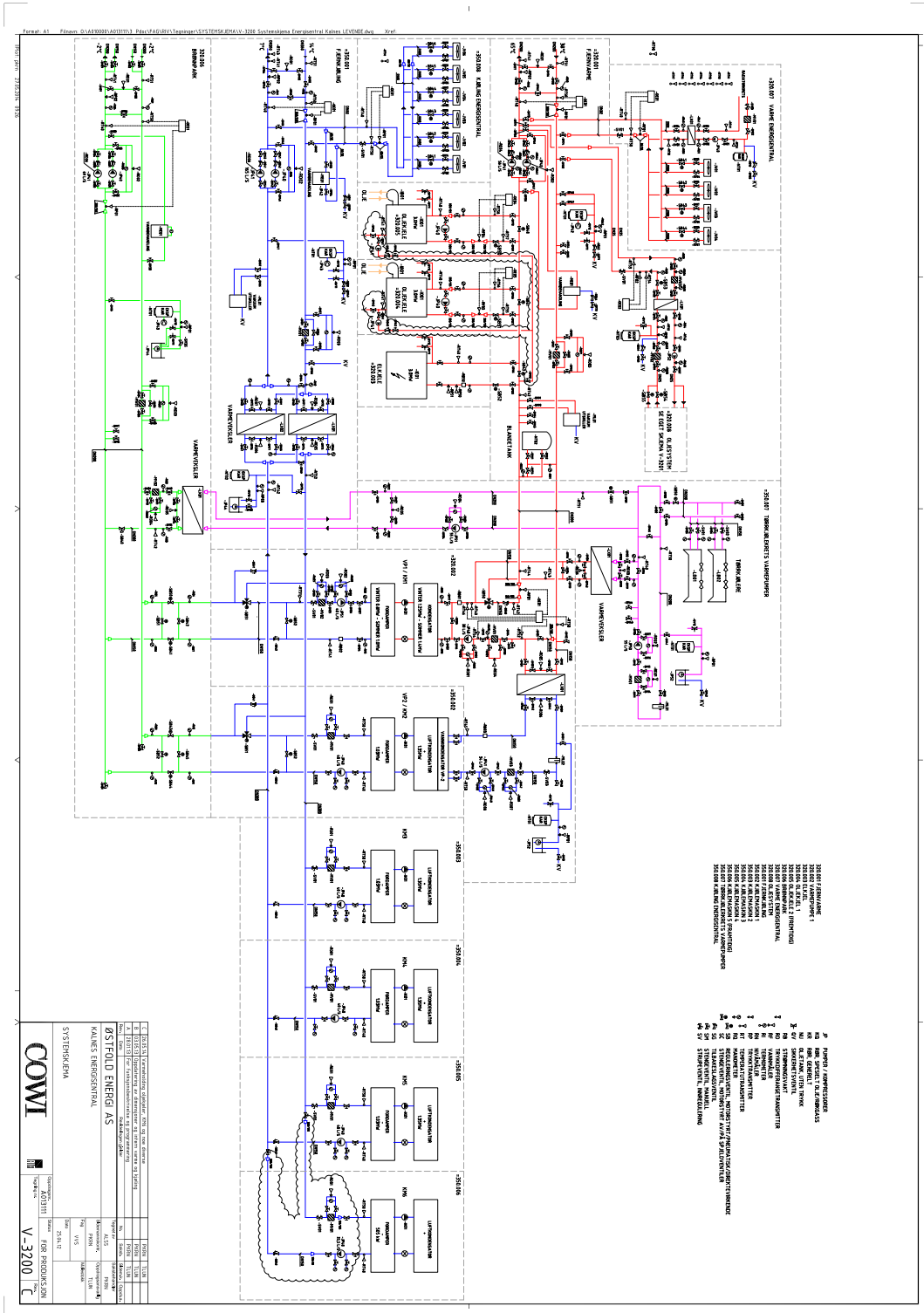


Figur B.3: Målinger gjort av datalogger i termisk blandekar med temperatur på 60 °C

C. Systemskjema kundesentral bygg 08



D. Systemskjema Kalnes energisentral



E. Kostnadsoverslag

For å gi en pekepinn på hva kostnaden av å implementere ulike forbedringstiltak, ble en fagarbeider på sykehuset spurt om han kunne komme med et prisoverslag. Prisoverslaget i tabell E.1 viser hvilke kostnader som kan forventes ved installering av en ekstra varmeveksler til forvarming av tappevannet eller installering av en ekstra varmtvannstank.

Tabell E.1: Prisoverslag for installering av ekstra varmeveksler eller ekstra varmtvannstank

	Ekstra varmeveksler	Ekstra varmtvannstank
Timeantall	72	48
Timespris	600	600
Kostnad arbeidstimer	43 200	28 800
Kostnad rør og fittings	20 000	20 000
Kostnad varmtvannstank		20 000
Kostnad varmeveksler	20 000	
Total kostnad	83 200 NOK	68 800 NOK

F. Oppsett av simuleringer

Programmering, virkemåte og validering av simuleringsmodellen er forklart i kapittel 6. Dette vedlegget tar for seg endringer som ble gjort for å simulere ulike scenarioer.

Alle simuleringer på tappevannskretsen tar utgangspunkt i filen *Modellen.py* som også ble brukt til å validere simuleringsmodellen. Flere av simuleringene er gjort ved å endre verdier i *Modellen.py*. Disse endringene er forklart i dette vedlegget slik at det skal være mulig å reprodusere eksakte grafer og resultat som er brukt i oppgaven. Noen scenarioer krevde en del mer programmering. For å gjøre det enklere for leser å gjøre de samme testene, er disse scenarioene lagret som egne filer.

Hvert simuleringsscenario beskrevet i kapittel 7 har sitt eget delkapittel i dette vedlegget hvor en tabell for oppsett presenteres. Disse endringene kan gjøres direkte i *Modellen.py*, eller i filen som er nevnt i delkapittelet. Tabell F.1 viser henvisning til hvor man kan gjøre endringene i modellen. De fleste simuleringene tar under 5 minutter, men noen av dem tar langt lengre tid. Dette er kommentert der det er aktuelt.

Tabell F.1: Henvisninger til endringsmuligheter i Python-script

Endring	Henvisning i script
Navn på datafil	A
Fra rad/ til rad	B
Settpunkt turtemperatur	C
Volumstrøm varmeveksler sekundærside	D
Initiering av temperaturer i tankene	E
Modellering av temperatur på sirkulasjon	F
Areal på varmeveksler	G
Ventilmotor på primærside	H

F.1 Validering av simuleringsmodellen

Oppsettet i tabell F.2 henviser til simuleringer gjort for å validere modellen, og for å generere figurer brukt i delkapittel 6.6 og vedlegg A.

Tabell F.2: Oppsett for validering av simuleringsmodell

Endring	Henvisning i script
Navn på Python-fil	Modellen.py
Navn på datafil	Datalogger3.csv
Fra rad/ til rad	2/10022
Settpunkt turtemperatur	58,0°C
Volumstrøm varmeveksler sekundærside	2,6 l/s
Initiering av temperaturer i tankene	Fra målinger
Modellering av temperatur på sirkulasjon	Ja
Areal på varmeveksler	14,3 m ²
Fungerende ventilmotor på primærside	Ja

F.2 Dimensjonerende volumstrøm over varmeveksleren

Oppsettet i tabell F.3 henviser til simuleringer gjort for å oppnå resultatene som er presentert i kapittel 7.2.1, *Dimensjonerende volumstrøm over varmeveksleren*.

Tabell F.3: Oppsett for simuleringer med dimensjonerende volumstrøm

Endring	Henvisning i script
Navn på Python-fil	Modellen.py
Navn på datafil	Datalogger3.csv
Fra rad/ til rad	2/10022
Settpunkt turtemperatur	58, 0°C
Volumstrøm varmeveksler sekundærside	1,15 l/s
Initiering av temperaturer i tankene	Ja, 58, 0°C
Modellering av temperatur på sirkulasjon	Ja
Areal på varmeveksler	14,3 m ²
Fungerende ventilmotor på primærside	Ja

F.3 Større varmeveksler

Oppsettet i tabell F.4 henviser til simuleringer gjort for å oppnå resultatene som er presentert i kapittel 7.2.2, *Større varmeveksler*.

Tabell F.4: Oppsett for simuleringer med en varmeveksler på 200 kW

Endring	Henvisning i script
Navn på Python-fil	Modellen.py
Navn på datafil	Datalogger3.csv
Fra rad/ til rad	2/10022
Settpunkt turtemperatur	58, 0°C
Volumstrøm varmeveksler sekundærside	1,15 l/s
Initiering av temperaturer i tankene	Ja, 58, 0°C
Modellering av temperatur på sirkulasjon	Ja
Areal på varmeveksler	19,7 m ²
Fungerende ventilmotor på primærside	Ja

F.4 Ekstra varmtvannstank

Oppsettet i tabell F.5 henviser til simuleringer gjort for å oppnå resultatene som er presentert i kapittel 7.2.3, *Ekstra varmtvannstank*.

Som det står i tabell F.5, er simuleringen programmert i en fil kalt *Ekstra_tank.py*. Denne filen er kopi av *Modellen.py* med noen enkle justeringer: I funksjonene *tomme_tank* og *fylle_tank* er det lagt inn to linjer ekstra som representerer den ekstra tanken. Som i *Modellen.py* er denne tanken programmert som to delvolum med 500 l.

Tabell F.5: Oppsett for simuleringer med en ekstra varmtvannstank

Endring	Henvisning i script
Navn på Python-fil	Ekstra_tank.py
Navn på datafil	Datalogger3.csv
Fra rad/ til rad	2/10022
Settpunkt turtemperatur	58, 0°C
Volumstrøm varmeveksler sekundærside	1,15 l/s
Initiering av temperaturer i tankene	Ja, 58, 0°C
Modellering av temperatur på sirkulasjon	Ja
Areal på varmeveksler	14,3 m ²
Fungerende ventilmotor på primærside	Ja

F.5 Volumstrøm på 1,20 l/s over varmeveksleren

Oppsettet i tabell F.6 henviser til simuleringer gjort for å oppnå resultatene som er presentert i kapittel 7.2.4, *Endring av volumstrøm over varmeveksleren*.

Tabell F.6: Oppsett for simuleringer med volumstrøm på 1.20 l/s

Endring	Henvisning i script
Navn på Python-fil	Modellen.py
Navn på datafil	Datalogger3.csv
Fra rad/ til rad	2/10022
Settpunkt turtemperatur	58, 0°C
Volumstrøm varmeveksler sekundærside	1,20 l/s
Initiering av temperaturer i tankene	Ja, 58, 0°C
Modellering av temperatur på sirkulasjon	Ja
Areal på varmeveksler	14,3 m ²
Fungerende ventilmotor på primærside	Ja

F.6 Volumstrøm på 0,9 l/s over varmeveksleren

Oppsettet i tabell F.7 henviser til simuleringer gjort for å oppnå resultatene som er presentert i kapittel 7.4.2, *Annen volumstrøm over varmeveksleren*.

Tabell F.7: Oppsett for simuleringer med pådrag på 0.90 l/s

Endring	Henvisning i script
Navn på Python-fil	Modellen.py
Navn på datafil	Etter_test.csv
Fra rad/ til rad	20162/40321
Settpunkt turtemperatur	58, 0°C
Volumstrøm varmeveksler sekundærside	0,9 l/s
Initiering av temperaturer i tankene	Ja, 58, 0°C
Modellering av temperatur på sirkulasjon	Ja
Areal på varmeveksler	14,3 m ²
Fungerende ventilmotor på primærside	Ja

F.7 Redusering av settpunkt på turtemperatur

Oppsettet i tabell F.8 henviser til simuleringer gjort for å oppnå resultatene som er presentert i kapittel 7.5.1, *Redusering av settpunkt på turtemperatur*. Disse simuleringene er tidkrevende.

Tabell F.8: Oppsett for simuleringer med redusert turtemperatur

Endring	Uke 13	Uke 17	Uke 18
Navn på Python-fil	Modellen.py	Modellen.py	Modellen.py
Navn på datafil	Datalogger3.csv	Etter_test.csv	Etter_test.csv
Fra rad/ til rad	2/10022	20162/30241	30242/40321
Settpunkt turtemperatur	55, 0°C	55, 0°C	55, 0°C
Volumstrøm varmeveksler sekundærside	1,2 l/s	0,9 l/s	0,9 l/s
Initiering av temperaturer i tankene	Ja, 55, 0°C	Ja, 55, 0°C	Ja, 55, 0°C
Modellering av temperatur på sirkulasjon	Ja	Ja	Ja
Areal på varmeveksler	14,3 m ²	14,3 m ²	14,3 m ²
Fungerende ventilmotor på primærside	Ja	Ja	Ja

F.8 Ekstra varmeveksler for forvarming

Oppsettet i tabell F.9 henviser til simuleringer gjort for å oppnå resultatene som er presentert i kapittel 7.5.2, *Ekstra varmeveksler for forvarming*. Disse simuleringene er tidkrevende.

Som det står i tabell F.9 er denne simuleringen programmert i filen *forvarming_veksler.py*. Denne filen er en kopi av *Modellen.py*, med noen justeringer. Det er lagt inn en ekstra funksjon i modellen som heter *forvarmer*. Denne funksjonen tar inn volumstrøm og temperatur på blandingen av VVC og kaldtvann, samt returtemperatur og volumstrøm på primærsiden av varmeveksleren på 145 kW og beregner en ny temperatur på denne blandingen. Denne temperaturen blir videre blandet med temperaturen i Tank 4 (om kretsen er i lademodus) og sendt inn på varmeveksleren på 145 kW.

Tabell F.9: Oppsett for simuleringer ekstra varmeveksler for forvarming

Endring	Uke 13	Uke 17	Uke 18
Navn på Python-fil	forvarming_veksler.py	forvarming_veksler.py	forvarming_veksler.py
Navn på datafil	Datalogger3.csv	Etter_test.csv	Etter_test.csv
Fra rad/ til rad	2/10022	20162/30241	30242/40321
Settpunkt turtemperatur	58,0°C	58,0°C	58,0°C
Volumstrøm varmeveksler sekundærside	1,2 l/s	0,9 l/s	0,9 l/s
Initiering av temperaturer i tankene	Ja, 58,0°C	Ja, 58,0°C	Ja, 58,0°C
Modellering av temperatur på sirkulasjon	Ja	Ja	Ja
Areal på varmeveksler	14,3 m ² /7 m ²	14,3 m ² /7 m ²	14,3 m ² /7 m ²
Fungerende ventilmotor på primærside	Ja	Ja	Ja

F.9 Foreslått forbedringstiltak

Oppsettet i tabell F.10 henviser til simuleringer gjort for å oppnå resultatene som er presentert i kapittel 7.6, *Foreslått forbedringstiltak*. Disse simuleringene er tidkrevende.

Som det står i tabell F.10 er denne simuleringen programmert i filen *Pumpereg.py*. Denne filen er en kopi av *Modellen.py*, med en enkel justering: For hvert tidssteg sjekker modellen om temperaturen i øvre del av Tank 2 er lavere enn 51°C. Om dette er tilfellet, økes pådraget fra 0,9 l/s til 1,25 l/s for å tvinge saktere tømning av Tank 1 eventuelt sette tankene direkte i lade-modus.

Tabell F.10: Oppsett for simuleringer med regulering av foreslått forbedringstiltak

Endring	Uke 13	Uke 17	Uke 18
Navn på Python-fil	Pumpereg.py	Pumpereg.py	Pumpereg.py
Navn på datafil	Datalogger3.csv	Etter_test.csv	Etter_test.csv
Fra rad/ til rad	2/10022	20162/30241	30242/40321
Settpunkt turtemperatur	55,0°C	55,0°C	55,0°C
Volumstrøm varmeveksler sekundærside	0,9 l/s og 1,2 l/s	0,9 l/s og 1,2 l/s	0,9 l/s og 1,2 l/s
Initiering av temperaturer i tankene	Ja, 55,0°C	Ja, 55,0°C	Ja, 55,0°C
Modellering av temperatur på sirkulasjon	Ja	Ja	Ja
Areal på varmeveksler	14,3 m ²	14,3 m ²	14,3 m ²
Fungerende ventilmotor på primærside	Ja	Ja	Ja

