

# Analyse av konsekvenser ved reduksjon av turtemperaturnivået i fjernvarmesystemer

**Marius Kind Gurholt**

Master i energi og miljø  
Oppgaven levert: Juni 2011  
Hovedveileder: Rolf Ulseth, EPT



## MASTEROPPGAVE

for

Stud.techn. Marius Gurholt

Våren 2011

### Analyse av konsekvenser ved reduksjon av turtemperaturnivået i fjernvarmesystemer

*Analysis on the consequences of reduction of the temperature level in district heating systems*

#### Bakgrunn

Det er av flere grunner fordelaktig å operere med lavt temperaturnivå i et fjernvarmesystem. Men lavere temperaturnivå i fjernvarmenettet har også noen ulemper som gjør at man i praksis alltid vil ha ulike optimale relasjoner mellom temperaturnivåene i primær- og sekundærnettet. Med stadig bedring av isolasjonen av bygninger forventes transmisjonsvarmetapet å bli redusert mens varmebehovet til varming av ventilasjonsluft og varmt tappevann må forventes å bli mer eller mindre konstant

#### Mål

Hovedmålet med denne oppgaven er å analysere konsekvensene ved ulike, optimale temperaturforhold mellom temperaturnivåene i primær- og sekundærnettet ved fjernvarme.

#### Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter

1. Redegjør for de fordeler og ulemper som reduksjon av temperaturnivået i fjernvarmesystemer vil medføre.
2. Klarlegg hvordan redusert turtemperatur i fjernvarmsystemer bør følges opp ved redusert turtemperatur i sekundærsystemet og hvordan  $\Delta T$  i primærsystemet og sekundærsystemet bør skje for å oppnå optimale forhold. Verifiser resultatet ved systematisk simulering med simuleringssystemet ChessWin.
3. Ved systematisk simuleringer ved ChessWin klarlegges hvordan kapasiteten for varmeleveranse til systemet for romoppvarming i bygningen avtar med redusert turtemperatur i fjernvarmesystemet. Klarlegg også hvilke endringer som må gjøres for at varmeanlegget til ventilasjon skal kunne oppretthold konstant ytelse for dette systemet.
4. Estimer hvordan den relative kostnad per enhet effektleveranse til bygningen/ved redusert turtemperatur i fjernvarmesystemet ved systematisk simulering med ChessWin.
5. Estimer hvordan kostnadene per enhet effektleveranse for varmesystemet for romoppvarming endrer seg ved optimal reduksjon av turtemperatur i fjernvarmesystemet



Senest 14 dager etter utlevering av oppgaven skal kandidaten levere/sende instituttet en detaljert fremdrift- og evt. forsøksplan for oppgaven til evaluering og evt. diskusjon med faglig ansvarlig/veiledere. Detaljer ved evt. utførelse av dataprogrammer skal avtales nærmere i samråd med faglig ansvarlig.

Besvarelsen redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse etc. Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelsen legges det stor vekt på at resultatene er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte, og at de er diskutert utførlig.

Alle benyttede kilder, også muntlige opplysninger, skal oppgis på fullstendig måte. (For tidsskrifter og bøker oppgis forfatter, tittel, årgang, sidetall og evt. figurnummer.)

Det forutsettes at kandidaten tar initiativ til og holder nødvendig kontakt med faglærer og veileder(e). Kandidaten skal rette seg etter de reglementer og retningslinjer som gjelder ved alle (andre) fagmiljøer som kandidaten har kontakt med gjennom sin utførelse av oppgaven, samt etter eventuelle pålegg fra Institutt for energi- og prosesssteknikk.

I henhold til "Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet" ved NTNU § 20, forbeholder instituttet seg retten til å benytte alle resultater i undervisnings- og forskningsformål, samt til publikasjoner.

Ett-1 komplett eksemplar (m/vedlegg etc.) av besvarelsen av oppgaven skal innleveres til faglærer ved Instituttet på CD-ROM i Word-format eller tilsvarende. I den komplette besvarelse skal det medfølge - i et eget dokument (fil) - et konsentrert sammendrag på maks. én maskinskrevet side med dobbel linjeavstand med forfatternavn og oppgavetittel for evt. referering i tidsskrifter. Ytterligere kopi(er) til evt. medveileder(e)/oppgavegiver(e) skal avtales med, og evt. leveres/sendes direkte til de respektive av studenten selv.

Til Instituttet innleveres et **komplett** elektronisk eksemplar av besvarelsen i systemet DAIM.

Besvarelsen skal innleveres senest 15. juni 2011.

Institutt for energi og prosesssteknikk, 15. januar 2011



Olav Bolland  
Instituttleder



Rolf Ulseth  
Faglig ansvarlig/veileder



## Forord

Denne rapporten er utarbeidet som en del av masteroppgaven, som er 10. og siste semester ved Energi og miljø på NTNU. Masteroppgaven er utført ved institutt for Energi- og Prosessteknikk, NTNU, våren 2011.

Rapporten er et resultat av en prosess der jeg og veilederen sammen utarbeidet en problemstilling i forhold til mulighetene for å redusere temperaturnivået i fjernvarmesystem, gitt et lavere fremtidig effektbehov for varme. Selve oppgavemålene er utarbeidet av veileder.

Jeg vil rette min takk til min veileder Rolf Ulseth ved institutt for Energi- og prossteknikk for hjelp og veiledning underveis. Jens Botne Jæger takkes for innspill til rapporten.

Jeg vil også takke samboeren min Anine for god hjelp og støtte, mor Tove for masse avlastning samt Håkon for oppmuntring på seige dager.

Trondheim, 13. juni 2011



---

Marius Kind Gurholt





## Sammendrag

Av mange grunner er det gunstig å operere med et lavt temperaturnivå i fjernvarmesystem. Dette reduserer tapene i nettet, og kan forbedre ytelsen til de varmeproduserende enhetene i fjernvarmesystemet. Det er interessant å undersøke hvordan skjerpede krav til bygningers varmetap påvirker temperaturnivået på primær- og sekundærside. Behovet for varming av ventilasjonsluft og varmt tappevann forventes å endres relativt mindre enn romoppvarming, derfor er det en ide at dette vil påvirke det sekundære temperaturnivået.

Det er gjort litteraturstudie av hvor mye redusert temperaturnivå i fjernvarmesystem påvirker kostnadene ved å produsere og distribuere varme og simulert hvilken innvirkning dette har på kapasitet, effektkostnad og temperaturdynamikk på sekundærsiden der varmen leveres.

Resultatene viser bl.a. at varmeproduksjonskostnaden [kr/kWh] reduseres mest for varmepumper, men også mye for spillvarme og forbrenningsanlegg som benytter røykgasskondensering ved redusert temperaturnivå. Andre kostnadsposter er også studert, som økt pumpearbeid, dårligere kapasitetsutnyttelse med lavere avkjøling og mindre varmetap fra rørnett med lavere turtemperatur. Resultatet er at et redusert temperaturnivå gir små endringer i varmeproduksjonskostnaden grunnet økt pumpearbeid og mindre varmetap fra rørnett.

Et redusert temperaturnivå på primærsiden må gjenspeiles i et redusert sekundært temperaturnivå, siden temperaturnivået på primær- og sekundærside gjensidig påvirker hverandre. Det er undersøkt teori knyttet til hvordan temperaturdynamikken fungerer i abonnentsentralen i forhold til å redusere temperaturnivået. Redusert turtemperatur gir lavere kapasitet på primærsiden og som en konsekvens av dette lavere kapasitet på sekundærsiden.

Simuleringer i ChessWin for reduisering av turtemperaturen på primærsiden fra 120 – 90 °C, viser at kapasiteten til radiatorsystemet og oppvarmingssystemet som helhet reduseres med ca 1 % per °C redusert turtemperatur. Kapasiteten til varmebatteriet påvirkes også siden den sekundære kapasiteten gjør det, men det viser seg at konstant kapasitet kan oppnås ved å øke varmegjenvinningsgraden til varmegjenvinneren med 5 – 10 %. Effektkostnadene øker omvendt proporsjonalt med kapasiteten, dvs. 1 % økning per °C redusert turtemperatur på primærsiden.

Endringen av effektbehovene til oppvarming av rom og ventilasjonsluft gitt av kravene til passivhus og TEK 10 er simulert ChessWin for å avgjøre hvordan den sekundære dynamikken påvirker temperaturnivået på fjernvarmen. Resultatene viser at effektbehovene fra passivhuskravene gir 2 K lavere returtemperatur på sekundær- og primærsiden enn det kravene fra TEK 10 gir. Dette kommer av at returtemperaturen er lavere på varmebatteriet enn radiatorsystemet, og at det er relativt større effektbehov på varmebatteriet i forhold til radiatorene for passivhus i forhold til i TEK 10.

Det er tydelig er at det relative forholdet mellom effektbehovet for rom- og ventilasjonsluftpoppvarming har liten innflytelse på temperaturnivået både på sekundærsiden og primærsiden. Simuleringene viser at massestrømmen til radiatorsystemet er mye større enn den til varmebatteriet sett i forhold til effektbehovet. Dette kommer av at varmebatteriet utnytter returledningen, noe som påvirker innflytelsen av returtemperaturen fra varmebatteriet på sekundærsiden.

Det er også analysert ved å simulere, hvordan et lavere temperaturnivå på radiatorsystemet(70/55 kontra 80/60 °C) påvirkes av et lavere temperaturnivå på fjernvarmen. Dette gir mye større effekt på avkjølingen på primærsiden enn endret effektbehov fra nye energikrav til bygg gir. Særlig ved lavere temperaturer på primærsiden, vil et lavere temperaturnivå på radiatorsystemet gi en mye større avkjøling på primærsiden. Dette verifiserer at et lavt temperaturnivå på primærsiden er avhengig av et lavt temperaturnivå på radiatorsystemet for å oppnå optima returtemperatur på primærsiden.

Konklusjonen av simuleringer med litteratursøk er at for å kunne redusere temperaturnivået i fjernvarme må det fokuseres på radiatorsystemets temperaturnivå. Endringen av effektbehov med bakgrunn i nye byggforskrifter som begrenser energibruken vil påvirke temperaturnivået minimalt. Gevinsten av å redusere temperaturnivået er potensielt stor gitt at fjernvarmesystemet benytter varmekilder med stor følsomhet for temperaturnivået og en høy varmeproduksjonskostnad.

## Abstract

There are many reasons to operate with low temperatures in a district heating area. This decreases the heat losses, and increases the efficiency of the generated heat in the different heat producing units in the district heating area. In a context of decreasing heat demand in buildings, given new energy requirements for buildings, it is interesting to analyze the effects on the primary - and secondary system. The demand for heating of ventilation air and hot tap water are expected to change relatively less than the demand for space heating, and therefore it'll influence the temperature level in the secondary system.

It has been carried out a literature search of how the decreased temperature level in district heating areas change the cost of production and distribution of heat, and simulations have been conducted to investigate the effect reduced temperature have on the costs and temperature dynamics in the secondary system.

The result show that; heat production costs reduces the most for heat pumps, also combustion of waste and biomass with smoke gas condensation and heat recovered from industry have reduced heat production costs with decreasing temperatures. Other costs in district heating systems are also investigated, like pumps, heat loss from pipes and the cost of reduced capacity. This shows that a reduced temperature level don't have a minimum impact from lowered heat loss, and increased pump work.

A decreased primary temperature level has direct consequences for the secondary system, since they're mutually affected on each other's temperature level. Theory is examined regarding a decreased temperature level and the effects on temperature dynamics in the district heating substation. A reduced supply temperature cause reduced capacity on the primary system and consequently a reduced capacity on the secondary system.

Simulations in ChessWin with reduced supply temperature from 120 – 90, show that the secondary system and the radiator system capacity reduces by 1 % per °C reduced supply temperature. The capacity of the heating coil is also reduced while the secondary capacity reduces, but constant capacity is achieved by increasing the efficiency of the heat recovering unit by 5 -10 %. The cost of capacity increases inversed proportional with the decreased capacity, resulting in an increase in the cost of capacity of 1 % per °C reduced supply temperature.

The change in the energy demand for space heating and ventilation, given from the new energy demands from the building codes of TEK 10 and passive house are simulated in ChessWin to decide how the secondary temperature level affects the primary temperature level. The results are that the energy demands in the building code of passive house gives a 2 K lower secondary- and primary return temperature than that of the TEK 10 building code. This is a result of lower return temperature from the heat coil and a relatively higher demand for ventilation than the TEK 10 building code.

It appears that the relative heat demand for ventilation have little importance on the secondary – and primary temperature level. The simulations show a higher mass flow to the radiators than the heat coil related to the output. This is a result of the heat coil's utilization of the secondary return temperature to obtain a lower mass flow.

It is also analyzed by simulating, how a reduced temperature level at the radiators (70/55 contra 80/60 °C) is influenced by a reduced primary temperature level. This increases the cooling of the primary side compared to what the new building codes gives. Particularly with low primary supply temperature, a low temperature level at the radiators gives a much higher cooling of the primary water. This verifies that a low primary temperature level demands a low secondary temperature level to get optimal primary return temperatures.

The conclusion of the simulations and the literature search is that; to be able to reduce the temperature level in district heating areas, the temperature level at the radiator system is a main concern. The changes in building heating demands won't affect the temperature level much. The gain in reducing the temperature level is potentially great in district heating areas where the heat producers are sensitive to temperature change and have a high heat producing cost.

# 1 Innhold

---

2	Innledning.....	1
2.1.1	Problematisering og hypoteser .....	1
2.1.2	Målsetning for rapport .....	2
2.1.3	Avgrensninger.....	2
2.1.4	Metodikk.....	4
2.1.5	Inndeling/ disposisjon.....	4
3	Bakgrunn.....	7
3.1	Hva er fjernvarme og hvordan bestemmes temperaturnivået? .....	7
3.2	Utviklingstrekk innen fjernvarme .....	10
3.2.1	Varmebehov for nybygg .....	10
3.2.2	Varmeavgiversystem .....	11
4	Temperaturnivåets innvirkning på varme-produksjon og distribusjon.....	15
4.1	Dominerende varmekilder i fjernvarme.....	15
4.1.2	Forbrenningsanlegg og røykgasskondenseringspotensial.....	18
4.1.3	kombinerte varme og kraft-produsenter .....	24
4.1.4	Virkningsgradsøkning for varmepumper.....	27
4.1.5	Bedre utnyttelse av spillvarme .....	31
4.1.6	Varmetap fra fjernvarmerør .....	33
4.1.7	Redusert bruk av topplast .....	37
4.2	Ulemper med et lavere temperaturnivå i fjernvarme:.....	38
4.2.1	Økte Pumpekostnader:.....	38
4.2.2	Økte Kapasitetskostnader: .....	40
4.2.3	Dyrere rør .....	41
4.2.4	Dyrere abonnentsentral .....	42
4.3	Oppsummert temperaturreduksjon og varmproduksjon .....	43
4.3.1	Kostnadsoversikt .....	43

4.3.2	Betydning for abonnentsentral.....	48
5	Respons på lavere temperaturnivå i abonnentsentralen .....	49
5.1.1	Bakgrunn for teori.....	49
5.2	Teorigrunnlag for abonnentsentral .....	49
5.2.2	Temperaturdynamikk i varmevekslere .....	54
5.2.3	Konsekvenser av temperaturendring .....	57
6	Simuleringer i ChessWin .....	63
6.1.1	Simuleringsverktøyet .....	63
6.2	Simulering av kapasitetsendring ved turtemperatursenkning: .....	65
6.2.1	Kapasitet for varmeleveranse til romoppvarming.....	65
6.3	Relativ effektkostnad .....	72
6.3.1	Relativ effektkostnad for bygg .....	73
6.3.2	Relativ effektkostnad for radiatorsystem .....	75
6.3.3	Optimalt temperaturnivå på primær – og sekundærside.....	77
6.4	Simulering av endret effektbehov for rom – og ventilasjonsoppvarming.....	80
6.4.1	Betydning for temperaturnivå på fjernvarmen .....	82
6.4.2	Forklaring av optimale temperaturnivå for de nye energistandardene? .....	86
6.5	Simulering av lavere temperaturnivå på radiatorsystemet.....	90
7	Oppsummering .....	94
7.1.1	Usikkerhetsanalyse .....	94
7.1.2	Diskusjon .....	95
7.1.3	Konklusjon.....	99
8	Kilder .....	102
	Vedlegg 1; Varmekilder i fjernvarme og lokale energisentraler .....	- 1 -
	Vedlegg 2; verdi av fjernvarmeforskning .....	- 3 -
	Vedlegg 3: Flytskjema for kjel med røykgasskondensering og luftoppfuktning. ....	- 4 -

Vedlegg 4; Kombinert varme og kraft-produksjon.....	- 5 -
Vedlegg 5; Varmetap rør .....	- 6 -
Varmetap rør: .....	- 6 -
Vedlegg 6; Prisutvikling spisslastenheter .....	- 7 -
Vedlegg 7; Simuleringsverdier i ChessWin .....	- 8 -
Vedlegg 10: Begrensninger til ulike kuldemedier.....	- 15 -

## Definisjoner og begreper

### *Definisjoner:*

$f_v$	fjernvarme	[-]
sek	sekundærside	[-]
$T_{tur}$	temperatur på turledning	[°C]
$T_{retur}$	temperatur på returledning	[°C]
$T_{omg}$	temperatur til omgivelser	[°C]
$\Delta T$	temperaturdifferanse	[Kelvin]
K	Temperaturdifferanse	[Kelvin]
I	Investeringskostnad	[kr]
a	annuitetsfaktor for investering	[ /år]
$\epsilon$	virkningsgrad for varmepumpe	[-]
W	arbeid utført	[W]
$K_{rg}$	Spesifikk varmepris for varme produsert med røykgasskondensering	[kr/kWh]



Begreper/ Forkortelser:	Betydning:
<b>TEK 10</b>	Gjeldende byggt teknisk standard som definerer tillatt energiforbruk for ulike bygningskategorier
<b>Passivhus</b>	Bygningsstandard som begrenser energiforbruket til et minimum. Oppfunnet tysk begrep om energibruk, og eksportert til andre deler av verden.
<b>Vvx</b>	Varmeveksler
<b>DUT</b>	Dimensjonerende utetemperatur. Temperatur ved kaldeste dag i året, definert som gjennomsnittet av de 3 siste år. Dimensjonerende effekt er ved denne temperaturen.
<b>Primærside</b>	Den delen av det indirekte fjernvarmesystemet som distribuerer vann mellom abonnentene og de varmeproduserende enhetene.
<b>Sekundærside</b>	Den delen av det indirekte fjernvarmesystemet som distribuerer vann fra abonnentsentralen og rundt i byggene.
<b>Oppvarmingssystem</b>	Systemet for oppvarming av rom i bygg, bestående av radiatorer og ventilasjonssystem.
<b>Radiatorsystem</b>	System for oppvarming av rom
<b>Ventilasjonssystem</b>	Innebærer varmebatteri for oppvarming av ventilasjonsluft.
<b>Varmebatteri</b>	Varmeveksler som sørger for varmeoverføring mellom varmt vann og luft. Konfigurasjonen er større enn varmevekslere fordi varmeovergangen er dårligere mot luft, noe som gjør at det er bedre plass på vannsiden. Dette gjør at vanntemperaturen inn kan reduseres.
<b>Spesifikk varmepris</b>	Produksjonskostnad på produsert fjernvarme

## Tabelliste:

Tabell 1; kostnad for ulike vannbårne systemer til næringsbygg( NOU 1998: 11) .....	12
Tabell 2; varmekilde og temperaturparameter som bestemmer effektivitet ...	17
Tabell 3; fuktvekt[%] utvalgte typer brensel(Strømberg 2005) .....	21
Tabell 4; kostnad for ulike energikilder med kilde.....	44
Tabell 5; temperaturkrav sekundærside fra Hafslund fjernvarme .....	61
Tabell 6; effektbehov for rom - og ventilasjonsluftoppvarming. ....	81
Tabell 7; varmemengde produsert og varmemengde tapt i fjernvarme .....	6 - 6 -
Tabell 8; Effektkostnad for nye varmeproduserende enheter(fv kostnader)-	14 -
Tabell 9; energikostnad for ulike energikilder i varmeproduksjon .....	14 -
Tabell 10; Aktuelle kombinasjoner av arbeidsmedier med type kompressor og maksimal vanntemperatur(kondenseringstemperatur) (Stene 2010) .....	15 -

## Figurliste

Figur 1, Skisse fjernvarmesystem(Energimyndigheten 2011).....	7
Figur 2;Utetemperaturkompensert fyringskurve for fjernvarmenett(HafslundFjernvarme 2009).....	8
Figur 3; forbrenningsannlegg med røykgasskondensering .....	19
Figur 4 Effektøkning som funksjon av fuktinnhold og returtemperatur kjølevann.....	22
Figur 5, kombinert varme og elektrisitetsproduksjon .....	24
Figur 6; ideell Rankineprosess i p-H-diagram .....	26
Figur 7, effektfaktor som funksjon av temperaturløftet(Stene 1991) .....	28
Figur 8; Temperaturfigur for høy/lav-temperatur fjernvarme i utnyttelse av spillvarme.....	31
Figur 9; temperaturfelt rundt fjernvarmerør.....	33
Figur 10; Varmetap for ulike rør.(R.ulseth 2009).....	34
Figur 11; totale grøftkostnader fjernvarmetraseer(Bioen 2010).....	42
Figur 12; kostnad for abonnentsentral avhengig av temperaturnivå.....	42
Figur 13; endring i ytelse for ulike kostnadsposter i fjernvarmesystem med temperatursenkning. ....	45
Figur 14; kostnadsreduksjon ved forbedring av ytelse .....	46
Figur 15; Gevinst av å redusere temperaturnivå med 1°C.....	47
Figur 16; Motstrøms varmeveksler.....	54

Figur 17; Temperaturutvikling for varmeveksler.....	55
Figur 18; Temperaturdynamikk varmeveksler med endret massestrøm fjernvarme .....	57
Figur 19; Temperaturdynamikk varmeveksler med endret massestrøm på sekundærside. ....	59
Figur 20; Redusert temperaturnivå på sekundærsiden .....	60
Figur 21; systemskisse av abonnentsentral i Chesswin.....	63
Figur 22; Relativ effekt og LMTD for oppvarmingssystem ved redusert turtemperatur på fjernvarmen.....	66
Figur 23; Temperaturutvikling på sekundærside(ChessWin) .....	67
Figur 24; kapasitetsreduksjon radiator- og ventilasjonssystem ved redusert turtemperatur fjernvarme.....	68
Figur 25; relativ effekt varmebatteri for ventilasjonsluftoppvarming med ulik varmegjenvinningsgrad .....	71
Figur 26; Relativ effekt og effektkostnad for oppvarmingssystemet i bygg(ChessWin) .....	74
Figur 27; relativ effektkostnad for romoppvarmingssystem(ChessWin) .....	75
Figur 28; optimal sekundær turtemperatur for redusert turtemperatur fjernvarme(ChessWin).....	78
Figur 29; sammenheng mellom temperaturnivå på primær og sekundærside. (ChessWin).....	79
Figur 30; delta T for primær- og sekundærside med redusert turtemperaturnivå på fjernvarmen.....	82
Figur 31; minste returtemperatur på fjernvarmen med ulike varmebehov(ChessWin) .....	83
Figur 32; returtemperatur fra oppvarmingssystem for ulike varmebehov(ChessWin) .....	85
Figur 33; temperaturforløp i en abonnentsentral med temperaturer på primærside til venstre; .....	87
Figur 34; returtemperaturer på sekundærside for TEK 10(ChessWin) .....	88
Figur 35; endring av massestrøm på sekundærside ved redusert temperaturnivå(ChessWin) .....	89
Figur 36; $\Delta T$ på primær- og sekundærside for redusert turtemperatur(markert)på fjernvarmen .....	91
Figur 37; Returtemperatur på fjernvarme ved turtemperaturreduksjon(ChessWin) .....	92
Figur 38; utvikling varmekilder til fjernvarme .....	- 1 -

Figur 39; Antall lokale varmesentraler med støtte fra Enova etter varmekilde - 2	-
Figur 40; Nåverdi til ulike områder innen fjernvarmeforskning, utført og potensial.....	- 3 -
Figur 41; Forbrenningsanlegg med røykgasskondensering og oppfukting.....	- 4 -
Figur 42; Rankine-prosess markert rødt med forklaring.....	- 5 -
Figur 43 Varmetap i fjernvarmenett (temp. differanse 77°C) Soma miljø.....	- 6 -
Figur 45; utvikling for oljeprisen 1996-2010 (NYMEX, <i>Prices for WTI 1996-2010</i> (2010)).....	- 7 -
Figur 44; utvikling strømpris ekskl. nettleie og avgift 1998-2011(Norge 2010-17.3).....	- 7 -

## Formelliste:

Totalt utnyttet effekt [kW].....	25
turbineffekt.....	25
økt turbinarbeid [kW/°C].....	26
Carnot-virkningsgrad varmepumpe[-].....	28
årsvarmefaktor for varmepumpe [-].....	29
forhold mellom årsvarmefaktor og effektfaktor.....	29
spesifikk varmekostnad [kr/kWh].....	29
kostnadsendring[kr/kWh].....	30
varmetap sylinder(Cengel 2007).....	34
gradtimer[°C h].....	35
årlig varmetap [W/år].....	35
endring i varmetap fra rør [W/år].....	35
Tapsreduksjon [øre/år].....	35
kostnad av varmetap [øre/kWh].....	36
gevinst redusert varmetap turledning [øre/kWh °C].....	36
tillggskostnad for hver kWh pumpearbeid.....	39
massestrømbegrensning.....	40
gevinst for ubenyttet kapasitet(Volla 1994).....	41
energibalanse [W].....	50
entalpi [W].....	50
Entalpiuttrykk med temperaturdifferanse.....	50
Overført varme [W].....	50

Overført varmeeffekt [W] .....	51
overført varmeeffekt[W].....	52
avgitt effekt fjernvarme [W] .....	52
Overført varmeeffekt varmeveksler.....	55
middeltemperaturdifferanse.....	56
overført varmeeffekt uttrykt med LMTD .....	56
Definisjon LMTD .....	56
Radiator effekt [W] .....	61
overført varmeeffekt uttrykt med LMTD .....	66
Andel ventilasjonsoppvarming .....	86
Returtemperatur sekundærside.....	86
avgitt varme radiator.....	94



## 2 Innledning

---

### 2.1.1 Problematisering og hypoteser

Optimalisering av temperaturnivået i fjernvarmesystem er sentralt i forhold til å drive eller dimensjonere et fjernvarmeområde effektivt og økonomisk optimalt. Oppgaven er svært kompleks siden temperaturnivået griper inn alle deler av fjernvarmens kjerneområder.

Abonnentsentraler, produksjonsenheter og distribusjonssystem for varme har alle individuelle optimale temperaturnivå og påvirker hverandre i stor grad. Det er ikke mulig å optimalisere temperaturnivået for en del uten å ta hensyn til de andre. For eksempel vil en reduksjon av fjernvarmens turtemperatur redusere varmetapet for distribusjonen. Men både varmeavgivelsen i abonnentsentralene og varmeproduksjonsanleggene vil påvirkes av et slikt inngrep.

Samtidig er vilkårene for fjernvarme i endring. Varmebehovet til bygg reduseres, nye metoder for å avgi varme introduseres, og nye løsninger for å distribuere og produsere varme finnes. Derfor må temperaturnivået i fjernvarme vurderes i en ny kontekst. I denne sammenheng tar rapporten sikte på å finne optimale temperaturnivå for noen av disse nye utviklingstrekkene. Noen hypoteser er;

- Et lavere temperaturnivå vil redusere kostnadene ved varmeproduksjon til fjernvarme
- Nye energikrav for bygg vil redusere det optimale temperaturnivået i fjernvarme, grunnet relativt lavere effektbehov for romoppvarming.
- Temperaturnivået på radiatorsystemet har stor innflytelse på temperaturnivået i fjernvarme.

- Kapasiteten og effektkostnadene vil endres for hele oppvarmingssystemet ved lavere temperaturnivå på fjernvarmen

### **2.1.2 Målsetning for rapport**

Det er særlig interessant å utforske hvordan det optimale temperaturnivået i fjernvarme blir i fremtiden. Et redusert varmebehov i bygg kan forandre det optimale temperaturnivået, og det er interessant å teste ut med simuleringer om det optimale temperaturnivået reduseres. Samtidig er det viktig å vise hvor følsomt temperaturnivået på fjernvarmen er for endringer på radiatorsystemet.

For å vurdere om en temperaturreducing i fjernvarme er lønnsomt er det viktig å vite fordelene og ulempene ved dette. Særlig er det viktig å få frem hvilke fordeler som enkelte varmeproduserende enheter har av endret temperaturnivå.

Dynamikken mellom temperaturnivået i det primære og det sekundære systemet er svært viktig å analysere, for å forstå konsekvensen temperaturreduksjon har for varmeavgivelsen. Den viktigste teorien presenteres på en oversiktlig måte slik at simuleringene får teoretisk relevans.

### **2.1.3 Avgrensninger**

I masteroppgaven fokuseres det kun på oppvarmingssystemet som omfatter radiatorsystem for romoppvarming og varmebatteri for ventilasjonsluftoppvarming. Dynamikken mellom romoppvarmingssystem og system for oppvarming av ventilasjonsluft er av spesiell interesse. I denne rapporten er det valgt å simulere en abonnentsentral hvor varmebatteriet for ventilasjon og



radiatorsystem er koblet i parallell på sekundærsiden. Tappevannsoppvarming behandles ikke i denne rapporten. Dette fordi det er forventet at tappevannsbehovet skal være uendret i fremtidens bygg.

I denne rapporten vil det fokuseres på yrkesbygg/kontorbygg, for å avgrense til en bygningskategori.

Det er valgt å fokusere på konsekvensene av å senke turtemperaturen på fjernvarmen i intervallet fra 120 °C til 90 °C, med 10 °C i differanse på de forskjellige simuleringene.

Det fokuseres mest på forbrenningsanlegg og varmepumper i delen som analyserer varmeproduksjon til fjernvarme. Disse er viktige i dagens og fremtidens varmeproduksjon til fjernvarme, og vil vektes fremfor spillvarme som er mindre benyttet.

Når det gjelder vurdering av fordeler ved et redusert temperaturnivå for varmeproduserende enheter tas det i utgangspunktet stilling til driftskostnadene til varmeproduksjon og ikke investeringskostnadene. Dette er en forenkling, men nødvendig for å avgrense denne delen. Det er viktig å være klar over at investeringskostnadene varierer med endret temperaturnivå, slik at for en større analyse må disse også vurderes.

Den systemparameteren som det legges størst vekt på i optimaliseringene er avkjøling og returtemperatur på fjernvarmen. Disse bestemmer hva som er optimalt for de ulike simuleringene. Kompleksiteten i temaet gjør at det ikke utledes til generelle konklusjoner når det gjelder et bestemt optimalt temperaturnivå for hele fjernvarmesystemet. Snarere vil rapporten gi innsikt i hvilke temperaturnivå som er gunstige for ulike fjernvarmesystem basert på varmekilder i systemet.

Det er stort sett samfunnsøkonomiske gevinster det fokuseres på når det gjelder en temperaturreduksjon av fjernvarmen. Det fokuseres ikke på primærenergifaktorer eller utslipp av CO<sub>2</sub>.

#### **2.1.4 Metodikk**

Simuleringer og analyser av dem danner grunnlag for drøfting av det optimale temperaturnivået i fjernvarme. Simuleringene er utført ved å variere turtemperaturene på fjernvarmen og sekundærsiden. Verdier for massestrøm og temperatur er så lest av og eksportert til Microsoft Excel hvor det er mulig å lage en grafisk fremstilling av resultatene.

Teori knyttes til simuleringene for å gi et balansert bilde mellom teori og praktisk utprøving av temperaturdynamikk i en abonnentsentral.

Det benyttes spesifikke kravene for varmetap i de ulike bygningskategoriene, for å kunne få en mer praktisk tilnærming til hva konsekvensene blir for temperaturnivået i fremtidens fjernvarme

Simuleringene skal verifisere det teoretiske grunnlaget, samt gi data på hvordan forskjellige optimale temperaturnivå henger sammen.

#### **2.1.5 Inndeling/ disposisjon**

Det er presentert en fremstilling av samspillet mellom fjernvarme og temperaturnivå i bakgrunnsdelen i kapittel 3. I tillegg er det kort presentert nye byggkrav, samt temperaturnivå på sekundærside.

Rapporten klarlegger konsekvensene av temperaturvalg for ulike varmereproduserende enheter i kapittel 4, med fokus på varmpumper, forbrenningsanlegg med røykgasskondensering og spillvarme.

Kapittel 5 vil behandle de ulempene som et lavere temperaturnivå kan medføre.

Kapittel 6 tar for seg teori knyttet til et redusert temperaturnivå og hvordan dynamikken i abonnentsentralene endres. Dette er dynamikk som er generell for alle fjernvarmesystemer. I tillegg vil det presenteres teori som omhandler innvirkningen temperaturnivået på sekundærsiden har på det primære temperaturnivået.

I kapittel 7 presenteres simuleringene i følgende rekkefølge:

- Effekten turtemperaturreduksjon har på kapasiteten til radiatorsystemet og varmebatteriet for ventilasjon. Er disse like følsomme for reduksjoner av turtemperaturen, og er det nødvendig med tiltak på sekundærsiden for at systemet skal fungere optimalt? Effektkostnadene vil estimeres og dette vil ha stor betydning på fjernvarmens lønnsomhet.
- Optimalisering av temperaturnivået på sekundærsiden i forhold til en reduksjon av temperaturnivået i fjernvarme. Det er interessant å se på hvordan nye krav for energibruken i bygg påvirker temperaturnivået i fjernvarme, og hvilke utfordringer som knyttes til dette.
- I tillegg hvor mye temperaturnivået på radiatorsystemet påvirker det optimale temperaturnivået på fjernvarmen.

Resultatene av de ulike simuleringene presenteres sammen med detaljert beskrivelse av endringen i temperaturdynamikk.

Kapittel 8 inneholder konklusjon, diskusjon og usikkerhetsanalyse.

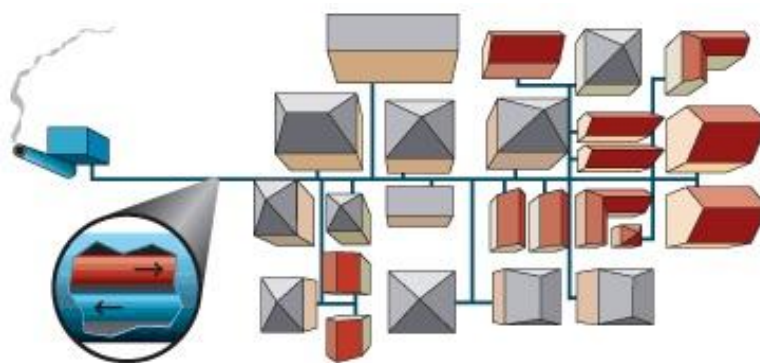
### **2.1.5.1 Fokus**

Simuleringene og drøftingene av delspørsmål 2 fra oppgaveteksten får mye fokus, i forhold til 3,4 og 5. Delspørsmål 1 er også rimelig plasskrevende grunnet de mange aspektene rundt fordeler og ulemper av et redusert temperaturnivå i fjernvarme.

## 3 Bakgrunn

---

### 3.1 Hva er fjernvarme og hvordan bestemmes temperaturnivået?



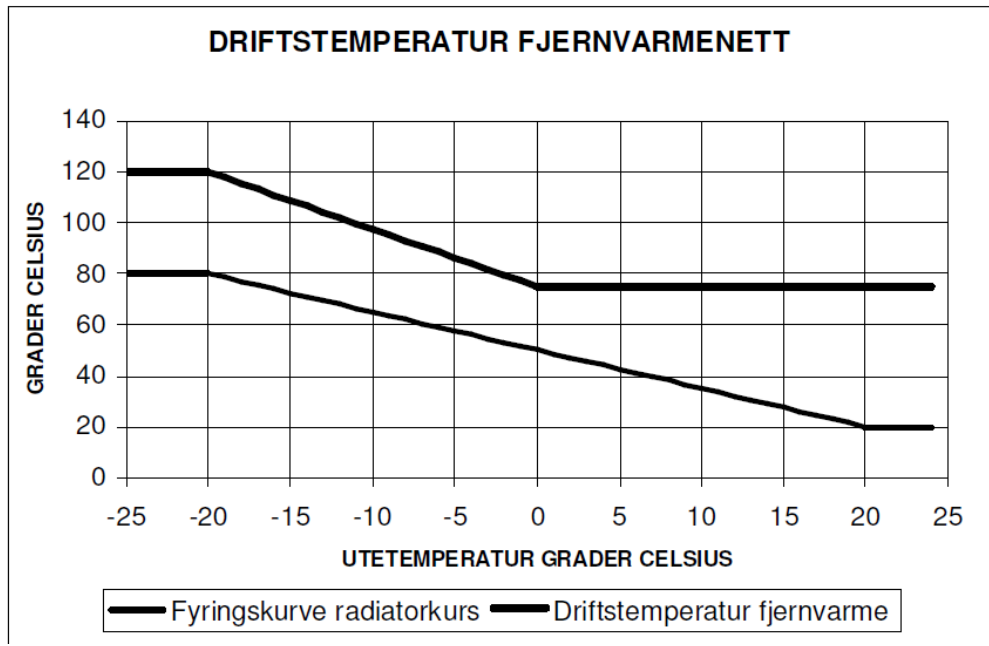
Figur 1, Skisse fjernvarmesystem(Energimyndigheten 2011)

Fjernvarme er et begrep for varmedistribusjon, som betyr å levere varme til varmekonsumenter ved vann. Varmen distribueres i et sentralnett til alle kundene, der varmen overføres gjennom en varmeveksler til et sekundært system som forsyner forbrukerne med ulike oppvarmingsbehov, som romoppvarming, oppvarming av ventilasjonsluft og tappevannsoppvarming.

Når det sekundære systemet varmer opp disse ulike postene, avkjøles samtidig vannet i det sekundære systemet. Avkjølingen på sekundærsiden vil så påvirke hvor mye fjernvarmevannet avkjøles på primærsiden. Det kalde vannet distribueres så tilbake til varmesentralene hvor vannet varmes på nytt.

Temperaturnivået i fjernvarme er bestemt av den effekten som skal leveres til alle abonnentene. Dette temperaturnivået er avhengig av utetemperaturen og reduseres ved stigende utetemperatur vist med figur under. Siden avgitt effekt er gitt av massestrøm og avkjøling på fjernvarmen, kan temperaturen og

massestrømmen reguleres for å oppnå riktig effekt. Temperaturdifferansen øker ved høyere turtemperatur.



Figur 2; Utetemperaturkompensert fyringskurve for fjernvarmenett (HafslundFjernvarme 2009)

Siden fjernvarmen skal varme opp tappevannet til 60 -70 °C, er det en begrensning på hvor lavt turtemperaturen kan senkes ved mindre varmebehov i nettet. Derfor vil turtemperaturen alltid være over 75 °C som i Figur 2. Den maksimale turtemperaturen er 120 °C, noe som er valgt som dimensjonerende turtemperatur for simuleringene i denne besvarelsen.

Turtemperaturen på fjernvarmen bestemmes også ut ifra en optimalisering i forhold til lønnsom distribusjon og produksjon. Denne temperaturoptimaliseringen er kjernen til rapporten.

### ***3.1.1.1 Kostnadsaspekter***

Et fjernvarmesystem er avhengig av en god kapasitetsutnyttelse grunnet de høye investeringskostnadene til rørrettet, som utgjør en veldig stor andel av de totale investeringskostnadene for fjernvarmesystemet (R. ulseth 2009). Dette er hovedårsaken til at avkjøling er av så sentral betydning i fjernvarme. En god avkjøling sikrer et størst mulig varmesalg på en gitt trase, noe som reduserer nedbetalingstiden på rørrettet.

Driftskostnadene er også betydelige i fjernvarme og består av brensel/energi-kostnader til de ulike varmeproduserende enhetene og pumpekostnader samt kostnader knyttet til personell, service og vedlikehold. Særlig er det kostnadene for driften av de ulike varmeproduserende enhetene som skiller kostnadene ved ulike temperaturnivå. En analyse av det optimale temperaturnivået i fjernvarme innebærer derfor en grundig analyse av hvordan effektiviteten til de ulike varmeproduserende enhetene påvirkes av temperaturnivået.

## 3.2 Utviklingstrekk innen fjernvarme

To problemstillinger innen fjernvarme er underøkt i denne rapporten. Den første gjelder hvordan endret effektbehov for rom- og ventilasjonsluftoppvarming påvirker temperaturnivået på sekundær - og primærsystem. Denne er passiv, dvs. at det er interessant å finne ut hva følgene blir av endringene.

Den andre; hvordan redusert temperaturnivå på radiatorsystemet påvirker temperaturnivået på primærsiden. Denne er aktiv, dvs. at den sier noe om hvor mye det lønner seg å gjøre en endring.

Begge disse problemstillingene har konsekvenser for temperaturnivået i fjernvarmesystem. Denne besvarelsen har som mål å undersøke hvordan det optimale temperaturnivået blir ved ulike driftssituasjoner for disse problemstillingene, med en grunnleggende interesse for en temperaturreduksjon. Med disse problemstillingene vil det også belyses hvordan temperaturdynamikken fungerer mellom primær-og sekundærside generelt. Spesielt mhp. hvordan  $\Delta T$  påvirkes av redusert temperaturnivå i fjernvarme

### 3.2.1 Varmebehov for nybygg

Det er i dag et stort fokus på energieffektivisering av energibruken til byggsektoren i Norge. I lovverket er det nedfelt tekniske forskrifter til bygg. I disse tekniske forskriftene (TEK 10) er det minstekrav til energibruken ((statensbygningstekniskeetat 2010), kap. 14), som henviser til NS 3031 som er en beregning metode som skal verifisere minstekravene. Dette gjelder for alle



byggkategorier med størrelse over 50 m<sup>2</sup>. Som et resultat av nye tekniske forskrifter endres effektbehovet for varme til bygg.

Kravene til U-verdier angir varmeoverføring gjennom ulike bygningsdeler, skjerpes i nye byggforskrifter(TEK 10 kapittel 14). Dette gjelder dører, vinduer samt vegg, tak og gulvkonstruksjoner. Alt dette bidrar til at behovet for romoppvarming reduseres kraftig. I tillegg vil behovet for oppvarming av ventilasjonsluft endres mye ved innføring av strengere krav til varmegjenvinnere for ventilasjonsluft.

Det signaliseres også at kravene til bygg kan bli ytterligere skjerpet i fremtiden, med passivhusstandarden. EU har dette som krav til 2020, og det usikkert når Norge vil innføre disse kravene.

Med et redusert varmebehov, påvirkes temperaturnivået på sekundærsiden. Radiatorkapasitet og oppvarmingskapasitet til ventilasjon reduseres, men det er uvisst i hvor stor grad, og dette har betydning for det sekundære temperaturnivået. Om det endrede oppvarmingsbehovet har innvirkning på temperaturnivået i fjernvarmesystem er interessant å undersøke.

### **3.2.2 Varmeavgiversystem**

I de siste år har det vært en del fokus på lavere temperaturnivå på sekundærsiden, dels for å kunne utnytte lavverdige energi bedre(R.ulseth 2009), som for eksempel spillvarme og varmepumper.

Det finnes et utall forskjellige måter å avgi varme i et rom på. De vanligste systemene i dag er radiatorer, konvektorer, og gulvvarme. Disse opererer på forskjellige temperaturnivå, og har forskjellige prisklasser og driftskarakteristikker.

Et mål for alle vannbårne systemer, enten det er varmpumper eller fjernvarme er å få en lav returtemperatur fra sekundærsiden for å kunne oppnå en bedre avkjøling på primærsiden. Dette har fått mer fokus i de senere år, mye fordi varmpumper er veldig aktuelle for oppvarming og har en stor fordel av å levere varme på lavere temperaturer. Forfjernvarme er dette også svært viktig.

I denne rapporten er det valgt å undersøke ulikhetene mellom det tradisjonelle 80/60- radiatorsystemet med et 70/55 radiatorsystem, dette for å analysere effekten på temperaturnivået i fjernvarme med et lavere sekundært temperaturnivå.

Problemet ved å senke temperaturnivået på varmeavgiveren er at arealet på varmeavgivelsesflaten må økes. Kostnadene er knyttet til størrelsen, så det er noe av grunnen til at lavtemperatursystemer er mindre attraktive for utbygger.

Nedenfor er det en oversikt over de vanligste systemene for å levere vannbåren varme i bygg, og installasjonskostnadene for nybygg og rehabilitering av bygg.

Tabell 1; kostnad for ulike vannbårne systemer til næringsbygg(NOU 1998: 11)

Oppvarmingssystem	Kostnad kr/m <sup>2</sup>	
	Nybygg	Rehabilitering
Gulvvarme, vannbasert	300 - 420	480 - 600
Radiator/ konvektor	120 - 200	170 - 250
Ventilasjonsoppvarming vannbasert	55 - 70	75 - 90

Det absolutt billigste er å levere varmen via ventilasjonssystemet i bygg, noe som er presentert som en løsning for bygg med lavt varmeforbruk. Det er også

billigere å installere radiatorer og konvektorer fremfor gulvvarme, som er noe av grunnen til at en utbygger ofte velger løsninger som ikke er lavtemperatursystemer.

Rent samfunnsøkonomisk er det gunstig å bruke vannbårne systemer med lavere temperatur, siden dette reduserer returtemperaturen til primærsiden. Det er en økonomisk interessekonflikt mellom utbygger og samfunnet når det gjelder temperaturnivået i vannbårne varmeanlegg til bygg.



## 4 Temperaturnivåets innvirkning på varme-produksjon og distribusjon

---

I fjernvarmesammenheng er temperaturnivået av sentral betydning. Temperaturnivået påvirker lønnsomheten i varme-produksjon, distribusjon og avgivelse. For varmeproduksjon er valg av temperaturnivå svært komplekst siden det ofte er flere varmeproduserende enheter i et fjernvarmesystem, og hver av disse har ulike karakteristikk som påvirker det optimale temperaturnivået.

Felles for alle varmeproduserende enheter er at lavere temperaturnivå øker effektiviteten og dermed lønnsomheten. Problemet er at det ikke er en felles parameter som øker effektiviteten. Varmepumper og kombinerte varme- og kraftanlegg er mer effektive ved lave turtemperaturer (Frederiksen S. 1993), mens de fleste forbrenningsanlegg og spillvarmekilder er avhengige av en lav returtemperatur på fjernvarmen for god effektivitet.

Dette gjør at det er utrolig viktig å vurdere sammensetningen av varmeprodusenter som finnes i et fjernvarmeområde. Det er vanskelig å maksimere virkningsgraden til et anlegg ved å tilpasse temperaturnivået, uten å påvirke andre varmeproduserende anlegg, og kanskje redusere virkningsgraden til disse.

Fordelene og ulempene for varme-produksjon og distribusjon ved en senkning av temperaturnivået i fjernvarme vil undersøkes i denne delen.

### 4.1 Dominerende varmekilder i fjernvarme

I rapporten gjennomgås de viktigste varmekildene i fjernvarme. Begrunnelsen for hvilke varmekilder som det fokuseres på, er basert på statistikk fra Enova

og svensk fjernvarmeforskning. Enova gir ut statistikk på hvilke varmekilder som benyttes i nær - og fjernvarme i dag, og hva som forventes i fremtidens fjernvarmesystem(vedlegg 1). Basert på denne statistikken er det valgt å fokusere på biovarme, avfallsforbrennings og varmepumpeanlegg.

Særlig vil forbrenning av pellets, flis og avfall vektlegges sammen med væske til vann-varmepumpesystemer. Spillvarme vil også behandles, men ikke like grundig pga. det relativt lave potensialet knyttet til denne varmekilden.(ENOVA SF 2003)

#### ***4.1.1.1 Lav Returtemperatur***

Det viktigste for fjernvarmen er en lav returtemperatur siden den er mest avgjørende for de fleste typer varmeproduserende anlegg. Særlig er det for forbrenningsanlegg en stor gevinst ved senkning av returtemperaturen hvis det benyttes røykgasskondensering med og uten oppfuktning. S. Werner har anslått verdien av en redusert returtemperatur på fjernvarmen til å være 1 SEK / MWh °C.(Lauenburg 2009)

En annen parameter på returtemperatur som ofte brukes er avkjøling på fjernvarmen. Med en god avkjøling blir returtemperaturen lav ved en gitt turtemperatur. Svensk fjernvarmeforskning mener det største potensialet for gevinst i fjernvarmen ligger her.(Vedlegg 2)

#### ***4.1.1.2 Lav Turtemperatur***

Spillvarmekilder og varmepumper har øvre begrensninger når det gjelder levert temperatur. Derfor begrenses turtemperaturen på fjernvarmen ved bruk av disse. Det er derfor nødvendig med ettervarming fra disse varmekildene

hvis ønsket turtemperatur på fjernvarmen overstiger den mulige leverte temperaturen.

For varmepumper er det også et spørsmål om virkningsgrad siden økt kondenseringstemperatur reduserer varmepumpens virkningsgrad.

Problemet med lav turtemperatur er at avkjølingen reduseres, og at pumpekostnadene og kapasitetskostnaden øker.

#### **4.1.1.3 *Temperaturnivå og innvirkning på varmeproducerende enheter***

Det er ikke entydig for ulike varmeproducerende anlegg hvilken temperatur som påvirker effektiviteten. Nedenfor spesifiseres det hvilken temperatur som påvirker effektiviteten til de ulike anleggene.

Tabell 2; varmekilde og temperaturparameter som bestemmer effektivitet

Type varmeproducent:	Effektivitetsfremmende temperaturendring:
<b>Forbrenningsanlegg</b> (avfall, bioolje treflis, pellets, osv.)	lavere returtemperatur
<b>Spillvarmeanlegg</b>	lavere tur- og returtemperatur
<b>CHP</b>	lavere returtemperatur
<b>Varmepumpeanlegg</b>	lavere tur - og returtemperatur

Varmekildene i tabellen over er alle av type grunnlast. Varmesentraler av typen grunnlast produserer varme med jevn effekt og lav energipris. Disse foretrekkes fremfor dyrere varmekilder(spisslastkilder) som olje, gass og elektro-kjeler. Det vil spesielt fokuseres på varmesentralene for grunnlast siden de leverer den største mengden av varmen til fjernvarme. Det vil også kort nevnes hvilken betydning temperaturnivået har for varmeproduksjon karakterisert som spisslast.

### 4.1.2 Forbrenningsanlegg og røykgasskondenseringspotensial

Forbrenningsanlegg for avfall, pellets og trevirke av forskjellige kvaliteter samt bioolje er alle aktuelle å benytte i varmeproduksjon til fjernvarme. Forbrenningen skjer i en kjel hvor brenselet forbrennes sammen med oksygen. I forbrenningsprosessen blandes oksygenet med gasser fra brenselet og disse vil få en høyere temperatur avhengig av brenselkvalitet og forbrenningsprosess. I en varmeveksler vil så avgassene kunne kjøles med vann fra fjernvarmenettet slik at varmen overføres fra gass til væskeform.

Ved å utnytte varmen fra kondensering av røykgass, kan fjernvarmen varmes i større grad. Fjernvarmevannet brukes da til å kjøle den kondenserende røykgassen. Dette vil behandles i et eget punkt.

De forskjellige brenseltypene vil kunne utnyttes forskjellig avhengig av den temperaturen som er på fjernvarmens tur- og returledning. Returtemperaturen på fjernvarmen setter en grense for hvor mye av varmen fra forbrenningen som utnyttes, dvs. hvor mye røykgassene kjøles.

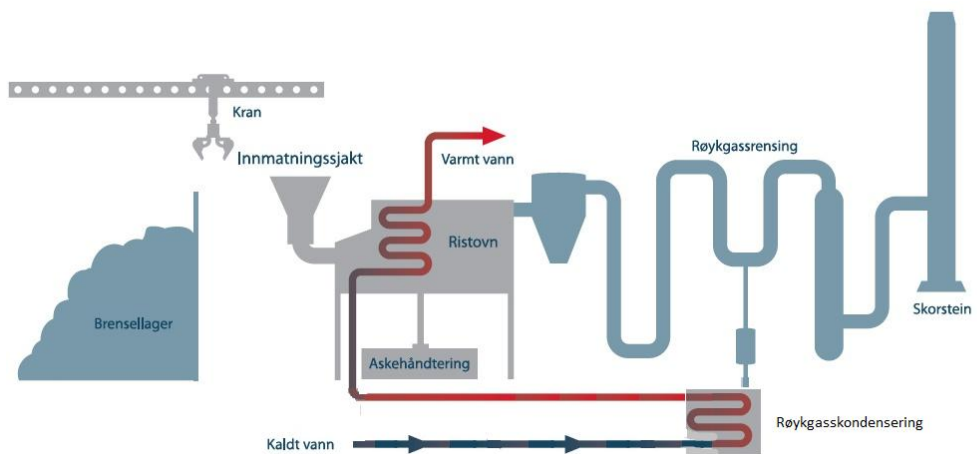
Forbrenningsprosessen varierer for ulike typer brensel, bl.a. varierer; hurtigheten på forbrenningen, utslipp, energiutbytte per kilo, osv. I denne rapporten fokuseres det på de generelle trekkene til forbrenningsanlegg. Det fokuseres på hvordan temperaturnivået i fjernvarme påvirker utnyttelsen av brenselet. Temperaturnivået påvirker særlig ytelsen til røykgasskondenseringen og kombinerte varme og kraft-anlegg(CHP).

Derfor er det en egen del som tar for seg hvordan temperaturnivået påvirker røykgasskondenseringen og en del for kombinert varme og kraft.



#### 4.1.2.1 Røykgasskondensering med/uten oppfukning:

Ved å benytte røykgasskondensering utnyttes mer av den potensielle energien i brenselet. Returtemperaturen på fjernvarmen er helt avgjørende for utnyttelse av røykgasskondensering. Nedenfor vises et flytskjema for et anlegg som benytter røykgasskondensering. Dette skjer i forbindelse med røykgassrensingsystemet, som skiller ut uønskede partikler fra røykgassen før pipen. Fjernvarmen utnytter her varmen fra kondensering av røykgass som forvarming, i tillegg til oppvarming fra røykgass i kjel. Ved utnyttelse av kondenseringsenergien i røykgassen kan effekten til forbrenningsanlegget øke mye.



Figur 3; forbrenningsanlegg med røykgasskondensering

Oppfukning av luft før og etter forbrenning kan gjøres for at kondenseringsenergien skal øke. (flytskjema i vedlegg 3) Dette er mulig siden den relative fuktigheten reduseres ved økt temperatur.

Virkningsgraden kan økes mye ved røykgasskondensering og enda mer med oppfukning av luften. Da øker varmeutbyttet for en gitt kjelstørrelse. Ved et

gitt varmebehov vil kjelstørrelsen reduseres med bedre energiutnyttelse av brenselet.

For å kunne utnytte kondensering av røykgass til fjernvarme er det svært viktig å senke fjernvarens returtemperatur(Lauenburg 2009)., siden denne vil påvirker mengden damp i røykgass som kondenseres. I tillegg til returtemperaturen vil fuktinnholdet i brenselet påvirke potensialet for røykgasskondensering.

Ved røykgasskondensering så skiller en ut uønskede gasspartikler som svoveldioksid, fenoler, hydrogenklorid i tillegg til faste partikler som metaller og organiske forurensninger.(Bioen 2010). Dette ville vært en tilleggsoppgave som måtte gjøres uansett så derfor er tilleggsinvesteringen i røykgasskondensering liten. Det er ikke behov for ekstra personell til vedlikehold av anlegget. I et miljøperspektiv vil rensing av den kondenserte væsken gjøre at røykgassene er mye renere enn uten røykgasskondensering.

#### ***4.1.2.2 Øvre og nedre brennverdi***

Ved forbrenning av hydrogenholdig brensel (som biobrensel, olje og naturgass) dannes det vanndamp fra reaksjonen med hydrogen og oksygen. Det forbrukes energi til å fordampe vannet i brenselet. Hvis vanndamp fra tørking og forbrenning av brenselet forblir ukondensert ut i skorsteinen er fordampningsvarmen til dampen tapt.

Øvre brennverdi angir den energimengde som utnyttes ved fullstendig forbrenning av brenselet og hvor all vanndamp, både den som er dannet under forbrenning og den som kommer fra vann i brenselet, kondenseres. Dette er vanlig i større moderne varmekraftverk, og da danner øvre brennverdi grensen for utnyttelse av den potensielle energien i brenselet.

Nedre brennverdi er lik øvre brennverdi minus fordampningsvarme til damp dannet under forbrenningen. Differansen på øvre og nedre brennverdi avhenger av hydrogeninnholdet(vann) i brenselet.

#### **4.1.2.3 Fuktinnhold i brenselet**

Det er viktig å kartlegge fuktinnholdet i brenselet ved eventuell benyttelse av røykgasskondensering. Nedenfor er det en tabell over fuktinnholdet til noen vanlige brenseltyper. Fuktinnholdet påvirker øvre og nedre brennverdi i stor grad.

Tabell 3; fuktvekt[%] utvalgte typer brensel(Strømberg 2005)

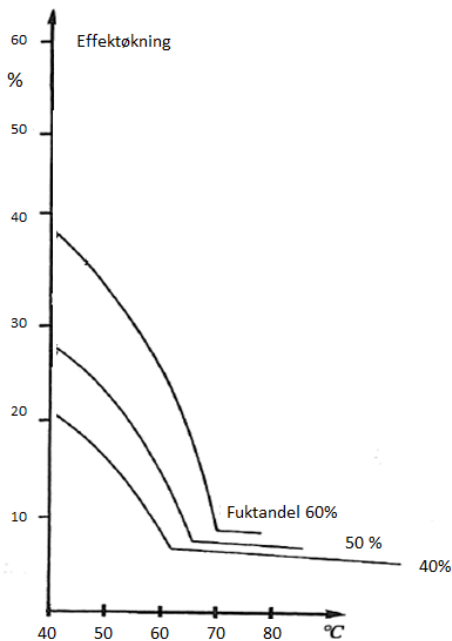
Brenseltype	Fuktvekt[%]
Flis	8 – 60
Bark	21 – 65
Pellets, Briketter	9 -10
Melkekartongretur	42 - 64

Potensialet er størst for røykgasskondensering med avfall og fuktige treprodukter som flis og bark. Pellets og briketter er alt for tørt til at det vil lønne seg å bruke røykgasskondensering for å øke energiutbyttet.

For å oppnå høy effekt av røykgasskondensering bør returtemperaturen være under 50 °C og fuktigheten i brenselet være mellom 40 og 60 prosent(Rindal 2011). Det er også mulig å benytte en varmepumpekrets som utnytter enda lavere temperaturer enn returen på fjernvarmen har. Dette gjøres hvis utbyttet økes mer enn ekstrainvesteringen i varmepumpe.

#### **4.1.2.4 Effektøkning ved røykgasskondensering**

Forholdet mellom fuktinnhold, returtemperatur fjernvarme og effektøkning for varmeproduksjon er vist i diagrammet under (S. Fredriksen 1993). Det tydelig at effektiviteten kan økes mye. Effektøkningen er størst når returtemperaturen reduseres like under kondenseringstemperaturen ved et gitt fuktinnhold. Ved ytterligere redusering av returtemperaturen vil effektøkningen avta gradvis.



Figur 4 Effektøkning som funksjon av fuktinnhold og returtemperatur kjølevann

Fra Figur 4 er det tydelig at effektøkningen av røykgasskondensering varierer mye med hvilken kjøleteperatur som benyttes. Derfor vil en eventuell reduksjon av returtemperaturnivået på fjernvarmen skille mer hvis returtemperaturen endres fra 60-58 °C enn fra 50-48 °C.

Total varmemengde levert fra et slikt anlegg kan skrives slik;

$$\dot{Q}_{fv} = \dot{Q}_{varme} + \dot{Q}_{kond} \quad [\text{KW}]$$

Der:  $\dot{Q}_{varme}$  - Varmer levert fra kjel [kW]

$\dot{Q}_{kond}$  - Varme levert fra røykgasskondensere [kW]

$\dot{Q}_{fv}$  - Total produsert varme [kW]

#### 4.1.2.5 *Lønnsomhet av en returtemperatursenkning for forbrenningsanlegg med røykgasskondensering*

Lønnsomheten ved røykgasskondensering må vurderes ut ifra hvor mye effektiviteten øker, brenselkostnader og investeringskostnaden. Spesifikk varmepris for forbrenningsanlegg med røykgasskondensering er vist under;

$$K_{rg} = \frac{i \cdot a}{\tau} \cdot \frac{K_{br}}{\eta_{varme}} \quad [\text{kr/kWh}]$$

Der:  $K_{br}$  - Kostnad for brensel [kr/kWh]

$\eta_{varme}$  - Effektivitet til varmeproduksjon [-]

Endring i energiutnyttelse av varme kan skrives slik;

$$\frac{\eta_{varme} - \eta_{varme,rg}}{\eta_{varme,rg}} = 1 - \frac{\eta_{varme}}{\eta_{varme,rg}} \quad [-]$$

Der:  $\eta_{varme,rg}$  - Effektivitet til varmeproduksjon med røykgasskondensering [-]

Investeringskostnaden øker lite for forbrenningsanlegg med røykgasskondensering. Derfor vil det bare være forbedring av virkningsgraden til forbrenningen som påvirker kostnaden. Endring i spesifikk varmepris kan skrives slik;

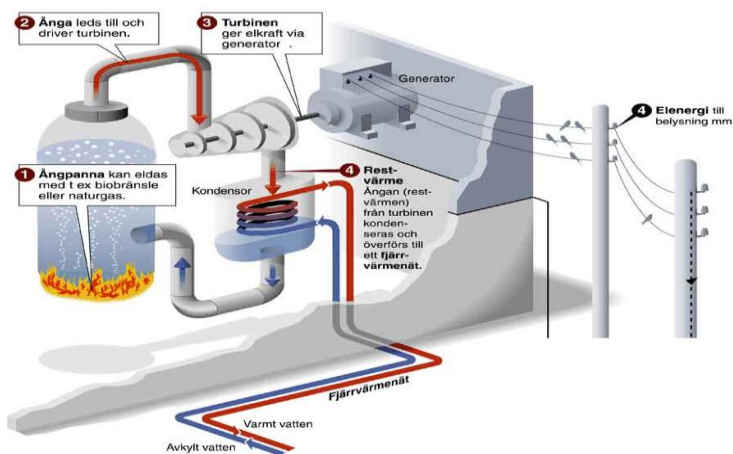
$$\Delta K_{rg} = K_{br} \cdot \left( 1 - \frac{\eta_{varme}}{\eta_{varme,rg}} \right) \quad [\text{kr/kWh}]$$

Det er viktig å vite at brenselprisen ofte er lav i utgangspunktet, noe som gjør at effektøkningen har relativt mindre å si for varmeprisen levert fra forbrenningsanlegget enn andre anlegg med høyere brenselpris.

## 4.1.3 kombinerte varme og kraft-produserter

### 4.1.3.1 Større el-utbytte av turbin

I et kraftvarmeverk for forbrenning av ulike typer brensel produseres elektrisitet og varme til fjernvarme. Det brukes ofte vann som arbeidsmedium for å overføre energien fra røyken til en lukket vannkrets, ofte betegnet som en Rankineprosess (Shapiro H.N. 2006)



Figur 5, kombinert varme og elektrisitetsproduksjon

Røykgassen varmer opp vann som fordampes. Dampen ekspanderer igjennom en turbin som kjøler dampen ned til kondenseringstemperaturen. Kondenseringstemperaturen bestemmes av fjernvarmens returtemperatur, derfor vil utbyttet fra turbinene øke med en senkning av returtemperaturen på fjernvarmen (se Vedlegg 3). Utbyttet fra kondenseringvarmen er omtrent konstant for ulike kondenseringstemperaturer, noe som er tydelig i Figur 6. Temperaturnivået på fjernvarmen vil derfor bare påvirke elektrisitetsutbyttet fra den kombinerte prosessen.

Ved benyttelse av røykgasskondensering vil varmeutbyttet øke slik at kjelstørrelsen reduseres. Ved en mindre kjelstørrelse reduseres også effekten til turbinen slik at også størrelsen på denne reduseres.

Den reduserte turbineeffekten som produserer elektrisitet gjør at lønnsomheten ved røykgasskondensering blir lavere. Forskning har vist at røykgasskondensering først blir lønnsomt ved en salgspris på produsert strøm under 60 øre / kWh.(Axby F. 2000).

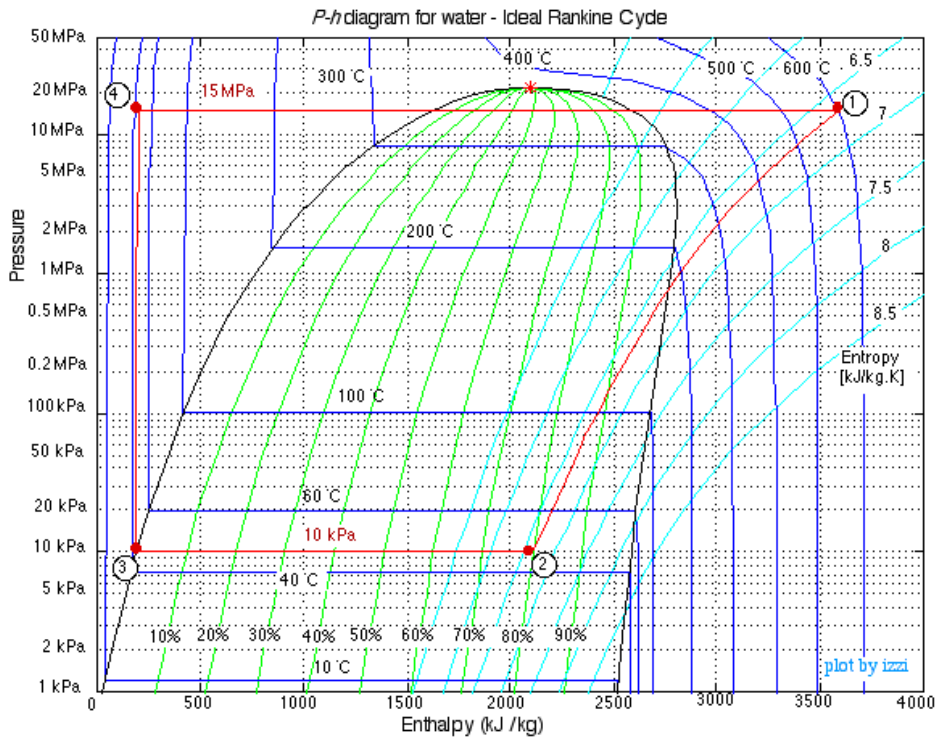
Den totale effekten som utnyttes i kraftvarmeverket uttrykkes slik:

$\dot{Q}_{total} = \dot{W}_{turbin} + \dot{Q}_{kond}$	Formel 1; Totalt utnyttet effekt	[kW]
Der $\dot{W}_{turbin}$ -	Arbeidet som turbinen yter	[kW]
$\dot{Q}_{kond}$ -	Varmeenergi ved kondensering	[kW]

Arbeid utført av turbinen uttrykkes som entalpifallet i ekspansjonen og massestrømmen(vedlegg 4).

$\dot{W}_{turbin} = \dot{m} \cdot \Delta H$	Formel 2; turbineffekt	
Der: $\dot{m}$ -	Masse til vandamp som ekspanderer gjennom turbin	[kg/s]
$\Delta H$ -	Entalpiendring gjennom turbin	[KJ/kg]

Denne entalpiendringen kan sees fra endringen til rød linje mellom punkt 1 og 2(Figur 6). Ved større differanse på H, blir effekten levert fra turbinen større. Temperaturen på turbinutløpet bestemmer hvor lavt utløpstemperaturen på turbin kan senkes. Temperaturen på turbinutløpet vil være kondenseringstemperaturen som er 3-5 °C under fjernvarmen. Ved lavere returtemperatur på fjernvarmen kan ekspansjonen i turbinen økes slik at utløpstemperaturen reduseres. Da vil elektrisitetsutbyttet øke fra generatoren som drives av akslingen på turbinen.



Figur 6; ideell Rankineprosess i p-H-diagram

Ved endring av returtemperaturen så er effekten størst for elektrisitetsutbyttet ved høye returtemperaturer. Dette fordi entalpiendringen i ekspansjonen endres mindre ved lave temperaturer enn høye. Derfor er potensialet for økt elektrisitetsutbytte størst hvis kondenseringstemperaturen allerede er høy.

Økt utbytte fra turbin med returtemperatursenkning kan skrives slik;

$$\Delta W_{turbin} = \dot{m} \cdot \Delta(\Delta H) \quad \text{Formel 3; økt turbinarbeid} \quad [\text{kW}/^\circ\text{C}]$$

Der:  $\Delta(\Delta H)$  – Entalpiendring ved redusert returtemperatur fjernvarme [kJ/ kg °C]

En økning av turbineffekten vil gi stor gevinst gitt en høy elektrisitetspris.



## 4.1.4 Virkningsgradsøkning for varmepumper

### 4.1.4.1 Egenskaper til varmepumper

En varmepumpe utnytter varmen fra en billig eller gratis varmekilde til å produsere varme på et høyere temperaturnivå. Dette skjer ved at varmekilden fordamer et kjølemedium som komprimeres gjennom en kompressor. Det økte trykket øker kondenseringstemperaturen slik at kuldemediet kan avgi varme ved kondensering på et høyere nivå. Varme overføres fra kondensator til fjernvarmen.

Varmepumpen er den varmekilden som benyttes i fjernvarme som er mest følsom for endring i temperaturnivå. Ved å senke turtemperaturen og/eller returtemperaturen på fjernvarmen er det mye å spare på energiforbruket til kompressoren til varmepumpen. Den har også en temperaturbegrensning (se vedlegg 8) som gjør at varmepumper maksimalt kan levere temperaturer på 80-90 °C. (Stene 2010)

Det er mange varmepumper i drift i fjernvarmesystemer i dag. Disse fungerer som grunnlastkilder siden de har en lav energipris og er avhengig av å levere store varmemengder for å være lønnsomme. Det kritiske for varmepumper er den høye investeringskostnaden. Investeringskostnadene er høyere enn for andre grunnlastkilder som for eksempel forbrenningsanlegg. Derfor må energikostnaden være lavere for at de skal være konkurransedyktige.

Energikostnaden reduseres ved å begrense strømforbruket til kompressoren mest mulig. Dette avhenger av en god effektfaktor( $\epsilon$ ), som betegner virkningsgraden for varmepumper.

Valg av kuldemedium påvirker også hvordan temperaturnivået spiller inn i stor grad. Temperaturen ut av varmepumpen er sterkt begrenset for alle

kuldemedier og at valg av kuldemedium påvirker effekt faktoren mye (se Vedlegg 10:)

$$\varepsilon = \eta_c \cdot \frac{T_k}{T_k - T_f} \quad \text{Formel 4; Carnot-virkningsgrad varmepumpe[-]}$$

Der:  $\eta_c$  - Carnot-virkningsgraden [-]

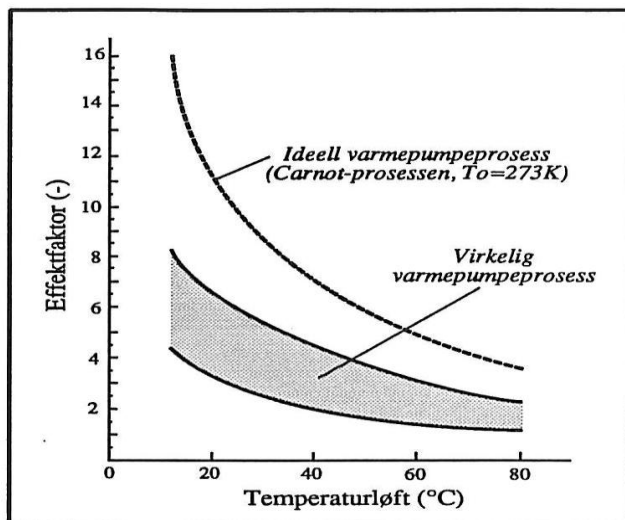
$T_k$  - Kondenseringstemperatur [°C]

$T_f$  - Fordampningstemperatur [°C]

#### 4.1.4.2 Temperaturnivå og effekt faktor

Effekt faktoren er definert som forholdet mellom kondenseringstemperatur og fordampningstemperatur, også betegnet som temperaturløft. Carnot-virkningsgraden er gitt av størrelsen til varmepumpen.

Nedenfor er det en tegning av sammenheng mellom effekt faktor og temperaturløft. Temperaturløftet betegner differansen mellom varmepumpens fordampningstemperatur og kondensatorstemperatur.



Figur 7, effekt faktor som funksjon av temperaturløftet (Stene 1991)

Siden temperaturen på varmekilden er gitt av lokale forhold, vil det i prinsippet være temperaturen på kondensatoren, dvs. levert fra varmepumpen som bestemmer effektfaktoren (Stene, 1991). Temperatur på fordampner ligger ofte rundt 2-5 °C under temperaturen til varmekilden som kan være alt fra kloakk og sjø til fjell og grunnvann. Kondensatortemperaturen må ligge 2-5 °C over turtemperaturen til fjernvarmen. Ut ifra figuren over så er det tydelig at temperaturene i systemet er helt avgjørende for anleggets effektivitet. Effektfaktoren ( $\epsilon$ ) forandres mhp. tid, og den årlige snittverdien av  $\epsilon$  betegnes som årsvarmefaktoren ( $\Phi_{VP}$ ).

$$\Phi_{VP} = \frac{Q_{VP,\text{år}}}{W_{VP,\text{år}}} \quad \text{Formel 5; årsvarmefaktor for varmepumpe} \quad [-]$$

Der:  $Q_{VP,\text{år}}$  - Årlig levert varmemengde fra varmepumpe [kWh/år]

$W_{VP,\text{år}}$  - Årlig primærenergiforbruk til varmepumpe [kWh/år]

Ved utregning med endring i effektfaktoren så regner vi med at denne endringen er like stor som endringen i årsvarmefaktor. For å kunne regne ut endringen i levert energi til kompressoren kan årsvarmefaktor erstattes med effektfaktor.

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi_{VP}} = \frac{\Delta\epsilon_{VP}}{\epsilon} \quad \text{Formel 6; forhold mellom årsvarmefaktor og effektfaktor}$$

Spesifikk varmepris for en varmepumpe er et uttrykk bestående av energi -og effektkostnad:

$$k_{VP} = \frac{i \cdot a}{\tau_{VP}} + \frac{P_{el}}{\Phi_{VP}} \quad \text{Formel 7; spesifikk varmekostnad} \quad [\text{kr/kWh}]$$

Der:  $P_{el}$  - Pris for strøm til kompressor. [kr/kWh]

Det er bare energiuttrykket som behandles i rapporten siden det er for komplekst å ta for seg endringer i investeringskostnad mhp. kondensator- og

kompressorstørrelse osv. Endring i spesifikk varmepris som følge av endret effektfaktor blir da følgende uttrykk:

$$\Delta k_{VP} = P_{el} \left( \frac{1}{\Phi_{VP}} - \frac{1}{\Phi_{VP,ny}} \right) = \frac{P_{el}}{\Phi_{VP}} \left( \frac{\varepsilon_{ny} - \varepsilon}{\varepsilon_{ny}} \right) \text{ Formel 8; kostnadsendring [kr/kWh]}$$

Kostnadsendringen er avhengig av årsvirkningsgraden og endringen i effektfaktor. Ved lav årsvirkningsgrad og stor endring i effektfaktor vil besparelsen bli størst for varmepumpen.

Formel 3 kan brukes til å finne opprinnelig effektfaktor( $\varepsilon$ ) og ny med annerledes kondenseringstemperatur( $\varepsilon_{ny}$ ).

#### **4.1.4.3 Temperaturnivåets betydning for økonomien**

Det er tydelig at høy turtemperatur i fjernvarme er det største hinderet for varmepumper. Endringen i effektfaktor kommer som følge av endret kondenseringstemperatur. effekt faktoren øker med 2-4 % per °C redusert kondenseringstemperatur. (Stene 2000)

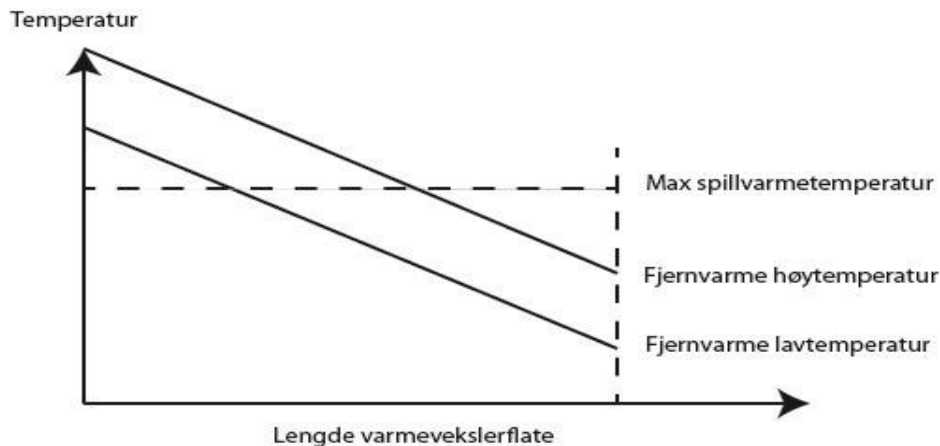
Ut ifra formel ser vi at 1 % av energien spares på kompressor ved en endring av  $\varepsilon$  med 3 % per °C redusert turtemperatur.

Varmepumpens levetid økes med lavere temperaturløft, samt at kompressorstørrelsen kan reduseres for et nytt anlegg, er det tydelig at verdien av lav turtemperatur er stor. Siden investeringskostnaden er høy for varmepumper vil lønnsomheten påvirkes sterkt av en lav turtemperatur på fjernvarmen.

### 4.1.5 Bedre utnyttelse av spillvarme

I Norge har vi en rekke typer industri som er energiintensive, dvs at de har et spesielt stort behov for energi. En del av denne energien går tapt, mye i form av varme, også kalt spillvarme. Dette gjelder bransjer som treforedling, aluminiumsverk, ferrolegeringsindustri, samt leca og sement-produksjon. Enova anslår et spillvarmepotensial på 9 TWh.(ENOVA SF 2009).

Spillvarme er klassifisert etter temperaturklasse og effekt. Viktig for utnyttelse av spillvarme er det at effekt, temperatur og lokasjon samsvarer med varmebehovet i et bebygde område. For fjernvarme er temperaturnivået helt avgjørende når det gjelder utnyttelsen av spillvarme. Er returtemperaturen på fjernvarmen for høy i forhold til temperaturen til spillvarmekilden vil utnyttelsen av den bli dårlig.



Figur 8; Temperaturfigur for høy/lav-temperatur fjernvarme i utnyttelse av spillvarme

For temperaturer på fjernvarmen som er høyere enn den maksimale spillvarmetemperaturen vil ikke spillvarmen kunne varme fjernvarmen. Det er derfor en stor fordel å senke returtemperaturen for å få en best mulig utnyttelse av spillvarmekilden. Effektutnyttelsen til spillvarmen er proporsjonal

med avkjølningen til spillvarmen. Ved en lav temperatur på spillvarmen vil det bli relativt viktigere å redusere returtemperaturen på fjernvarmen enn ved høyere temperaturer på spillvarmekilden.

I Sverige hvor det er mange fjernvarmesystemer som utnytter spillvarme, er det sett på effekten av å redusere returtemperaturen. Ved en returtemperatursenkning på 5 K så øker effektiviteten mellom 10-15 %. Dette utgjør mellom 2- 3 % / °C senkning av returtemperaturen. (P. Selinder 2009)

For å kunne vurdere lønnsomheten for returtemperatursenkning med spillvarme i systemet må det vurderes alternativkostnaden for produksjon av varme. Dvs. differansen i varmeproduksjonskostnad for spillvarme og alternativ varmekilde. Denne differansen kan være høy siden spillvarme ofte er en billig varmekilde, spesielt fra et samfunnsøkonomisk ståsted hvor tap av varme er tap av et potensielt gode for samfunnet.

$$k_{diff} = k_{varme,alt} - k_{spillvarme} \quad [\text{kr/kWh}]$$

Der:  $k_{diff}$  – differanse i pris mellom alternativkilde og spillvarme

$K_{varme,alt}$  – Alternativ varmeproduksjonskostnad

$K_{spill}$  – Varmeprodukasjonskostnad for spillvarme

Endringen i energiutnyttelse er et resultat av bedre temperaturutnyttelse

$$\Delta E_{spill} = P \cdot \frac{\epsilon_{ny} - \epsilon}{\epsilon} \cdot \tau \quad [\text{kWh/år}]$$

Der: P – Effekt til varmeutbytte fra spillvarme [kW]

$\epsilon_{ny}$  – effektutnyttelse etter returtemperatursenkning [-]

$\epsilon$  – effektutnyttelse før temperatursenkning [-]

$\tau$  – ekvivalent brukstid for spillvarme [h/år]

Kostnadsendringen for å redusere turtemperaturen er  $k_{spill}$ ;

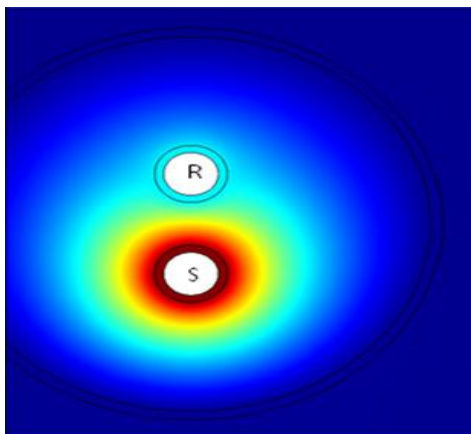
$$\Delta k_{spill} = \Delta E_{spill} \cdot k_{diff} \quad [\text{kr/år}]$$

For å finne et uttrykk for gevinsten av en temperaturreduksjon på returtemperaturen, må kostnaden for spillvarmen og alternativ produksjonskostnad være kjent. Ved å dele på årlig energiproduksjon fra spillvarmeanlegget kan besparelsen finnes per kWh levert spillvarme.

Det kan slåss fast at potesialet er stort siden  $\Delta E_{spill}$  påvirkes mye av temperaturnivået, og  $k_{diff}$  kan være betydelig ved lav varmeproduksjonskostnad på spillvarmekilden.

#### 4.1.6 Varmetap fra fjernvarmerør

Varmetapet i fjernvarmenett kommer av en temperaturdifferanse mellom røret og jorden rundt dem. Røret er oppvarmet av vannet inne i det, og isolasjon skal forhindre varmen fra å ledes gjennom et tverrsnitt av isolasjonen. Drivkraften er temperaturdifferansen og denne bestemmer varmetapet mellom jord og vann.



S: Turledning (supply) står for rundt 2/3 av varmetapet fra fjernvarmerør

R: returledning står for rundt 1/3 av totalt varmetap fra rør.

En del av varmetapet fra turledningen overføres til returledningen.

Figur 9; temperaturfelt rundt fjernvarmerør

I et fjernvarmenett regnes omkring 10 % av energien tapt i fjernvarmenettet.(NVE 2009). Dette er varme som forsvinner til omgivelsene.

For å regne på varmetapet er det viktig å vite hvilke parametre som påvirker varmetapet. Det er temperaturdifferansen, isolasjonstykkelsen, varmemotstanden og dimensjonen til røret.

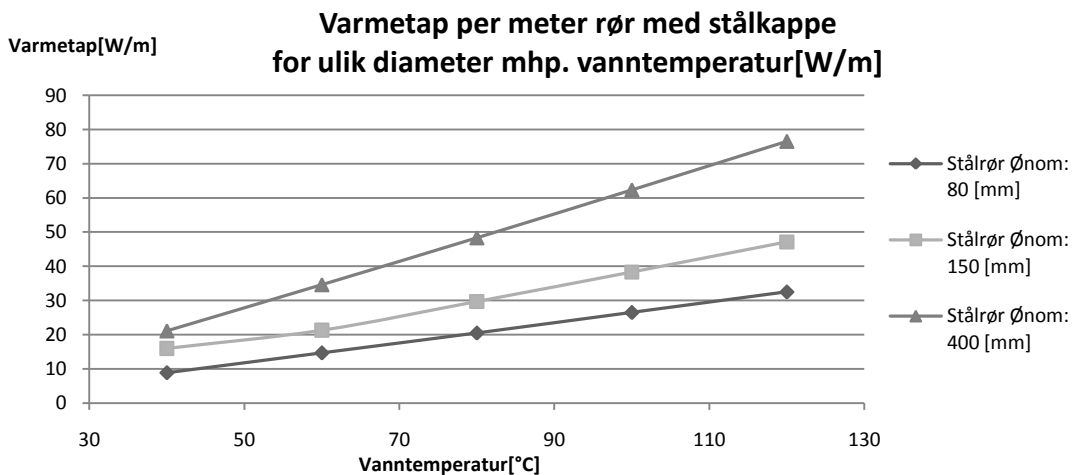
#### 4.1.6.1 Varmetap fra sylindertverrsnitt(per lengdeenhet);

$$\dot{Q} = \pi \cdot d \left( \frac{T_{FV} - T_{omg}}{R_{tot}} \right) = (T_{FV} - T_{omg}) \cdot \pi \cdot d \cdot k_m \quad [\text{W/m}]$$

Formel 9; varmetap sylinder(Cengel 2007)

Der  $k_m$  - Middelverdi for varmegjennomgangstall til rør  $[\text{W/m}^2 \text{K}]$

For et gitt rør så vil varmemotstanden, isolasjonstykkelsen og dimensjonen være konstant, og bare temperaturforskjellen påvirker varmetapet. Derfor er varmemotstanden erstattet av en konstant i uttrykket over. Varmetapet for fjernvarmerør øker lineært i forhold til temperaturdifferansen mellom vann og omgivelser. Økende diameter gir større varmetap enn mindre.



Figur 10; Varmetap for ulike rør.(R.ulseth 2009)



Det er tydelig at varmetapet er sterkt avhengig av temperaturnivået. Høyere vanntemperatur gir større varmetap fordi temperaturdifferansen øker i forhold til omgivelsene.

#### 4.1.6.2 Årsvarmetap for et fjernvarmenett

For å kunne angi hvor mye varmetapet påvirkes av temperaturnivået er det nødvendig å gjøre en helårskalkulasjon, dvs. undersøke hvor stort varmetapet er for hele året. Dette er en fremgangsmåte som er utarbeidet i en rapport fra Rune Volla (Volla 1994). Summen av temperaturdifferanse over et år kan skrives som gradtimer;

$$G = \int_{1. jan 00.00}^{31. des 24.00} \left( \frac{T_{tur} + T_{retur}}{2} - T_{omg} \right) \delta t \quad \text{Formel 10; gradtimer [°C h]}$$

Denne temperaturdifferansen er drivkraften for varmetapet fra rørene, og for å gjøre om til et uttrykk for varmetap må størrelsen på rørene og varmemotstanden kartlegges.

$$\dot{Q}_{dt} = 2 \cdot k_m \cdot \pi \cdot d_m \cdot L \cdot G \quad \text{Formel 11; årlig varmetap [W/år]}$$

Der:  $d_m$  - middelverdier for diameter [m]

L - Lengde til rørnett [m]

Tallet 2 i formelen representerer at varmetapet dobles for å sammenfatte turledning og returledning. (Volla 1994) Volla 1994)

Endring i varmetap er et resultat av endring i temperaturdifferanse gjennom 1 år. Endring i årlig varmetap kan da skrives som endring i årlig gradtimer ( $\Delta G$ ).

$$\Delta \dot{Q}_{dt} = k \cdot 2 \cdot \pi \cdot d_m \cdot L \cdot \Delta G \quad \text{Formel 12; endring i varmetap fra rør [W/år]}$$

$$K_{dt} = \Delta \dot{Q}_{dt} \cdot P_{varme} \quad \text{Formel 13; Tapsreduksjon [øre/år]}$$

Der:  $P_{varme}$  - Pris på varmen ut i nettet. [øre/kWh]

#### 4.1.6.3 *Kostnad ved varmetap fra rør*

Med tall fra NVE regnes 10 % av varmen i nettet tapt (Vedlegg 5). Med en varmeproduksjonskostnad på 44,5 øre /kWh (NVE 2007.1), er kostnaden for dette tapet( $K_{VR}$ ) følgende;

$$K_{VR} = P_{varme} \cdot 10 \left( \frac{1}{100} \right) = 4,45$$

Formel 14; kostnad av varmetap

[øre/kWh]

Redusert kostnad er en inntekt. Derfor kan redusert varmetap regnes som en inntekt. Ved å regne ut redusert varmetap for et år kan gevinsten finnes. Redusert varmetap som følge av lavere turtemperatur er følgende, siden det er et lineært forhold mellom varmetap og temperaturforskjell på omgivelser og vann i rør. Fra litteratur er det funnet at varmetapet fra turledningen utgjør 2/3 av det totale varmetapet fra rør, mens temperaturdifferansen på returledningen regnes uforandret.

$$\Delta K_{VR} = K_{VR} \cdot \frac{2}{3} \frac{\Delta G}{G} = K_{VR} \cdot \frac{2}{3} \cdot \left( \frac{\Delta(T_{tur} - T_{omg})}{T_{tur}} \right)$$

Formel 15; gevinst redusert varmetap turledning

[øre/kWh °C]

#### 4.1.6.4 *Lavere temperaturnivå og bruk av Plastrør.*

Lavere temperaturnivå gir muligheter for å benytte flere typer rør. Plastrør er mulig å benytte for temperaturer under ca. 90 °C og gjør legging billigere. Disse er mulig å bøye i større grad enn stålrør, slik at kostnadene knyttet til tilpassing av grøfter og rør reduseres.

### **4.1.7 Redusert bruk av topplast**

I fjernvarmesammenheng er sammenhengen mellom grunnlast og topplast i eksisterende og nye fjernvarmesystem viktig. Andelen kapasitet og varme som produseres i grunn- og topplast påvirker investeringskostnadene og energiutgiftene i stor grad. Et lavere temperaturnivå gjør at det blir mindre behov for topplast hvis det benyttes grunnlastkilder som har en øvre temperaturbegrensning som varmepumpe eller spillvarme har.

Dette er tydelig fra Figur 8, som viser øvre temperaturbegrensning på spillvarmen, som kan relateres til varmepumper også. For varmepumpen er fordelene størst når den dekker hele temperaturøkningen og ikke er avhengig av en spisslast til å dekke det fullstendige temperaturløftet. Et eksempel er kloakkvarmepumpen på Skøyen i Oslo hvor varmepumpen varmer vannet til rundt 90 °C, der en spisslastsentral(Hoff varmesentral) må ettervarme vannet ved høyere turtemperaturer.

Spisslast er ofte olje/ el-kjeler og er både dyrere i drift og uønsket i forhold til utslipp av klimagasser.

#### ***4.1.7.1 Driftskostnader:***

Varmeproduksjonskostnadene er billigere for grunnlastenhetene enn spisslastenhetene. Derfor er det i et driftmessig perspektiv fordelaktig å benytte grunnlastenhetene i størst mulig grad.

I de senere år har oljeprisen steget mye(vedlegg 5) og ser ut til å stabilisere seg på et høyere nivå, noe som øker betydningen av å begrense bruken av olje til bruk som spisslast. Prisen på elektrisitet har også steget mye de senere år og er veldig vanskelig å spå utviklingen til(vedlegg 5).

Gevinsten for riktig temperaturnivå er høyere ved store forskjeller i varmeproduksjonskostnad for de varmeproduserende enhetene i et fjernvarmeområde.

I tillegg er fjernvarmeselskapene pålagt å begrense bruken av fossile brensler, og da er det en fordel å begrense bruken av oljekjeler og elektrokjeler. Dette fordi elektrisiteten i utstrakt grad består av kullkraft fra Europa.

## 4.2 Ulemper med et lavere temperaturnivå i fjernvarme:

Ved lavere temperaturnivå i fjernvarme så vil avkjølingen reduseres i abonnentsentralene, noe som medfører at kapasiteten i nettet reduseres, og at pumpekostnadene øker. Dårlig avkjøling fører til at rør og abonnentsentral er unødvendig dyrt i investering.

### 4.2.1 Økte Pumpekostnader:

Når avkjølingen reduseres i abonnentsentralene må det pumpes mer vann rundt i fjernvarmesystemet for å opprettholde konstant effekt. Dette kan leses ut ifra formelen for overført varmeeffekt i fjernvarme. Den defineres slik;

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T = \rho \cdot \dot{V} \cdot C_p \cdot \Delta T = k \cdot \dot{V} \cdot \Delta T \quad [\text{W}]$$

Omskrivning:  $\dot{V} = \frac{\dot{Q}}{\Delta T}$

Der:  $\dot{V}$  – volumstrøm [m<sup>3</sup>/s]

Trykktapet i rørnettet( $\Delta p$ ) som pumpen må kompensere er;

$$\Delta p = k \cdot V^2 \quad [\text{N/m}^2]$$

Der:  $k$  -systemkonstant for fjernvarmenett. Angir hvor mye motstand det er i rørnettet

Pumpearbeid defineres som produktet av volumstrøm og trykktap. Ved å sette inn et uttrykk for  $\Delta T$  fra formelen ovenfor, kan pumpearbeidet uttrykkes med avgitt effekt og  $\Delta T$ ;

$$P_{pumpe} = \dot{V} \cdot \Delta p = k \cdot \dot{V}^3 = k \cdot \left(\frac{\dot{Q}}{\Delta T}\right)^3 \quad [\text{W}]$$

Tilleggskostnad for pumper bestemmes ekstraeffekten til pumpene for å oppheve økningen i strømningskap for en større massestrøm. Ved dårligere avkjøling som er et resultat av lavere turtemperatur vil pumpearbeidet øke.

Et uttrykk for det økte energiforbruket er følgende. Forenklingen er utledet i kompendiet til Rune Volla.(Volla 1994)

$$\Delta E_{pumpe} = \left(\left(\frac{\Delta T}{\Delta T_{ny}}\right)^3 - 1\right) \cdot P_{dim} \cdot t_e \quad [\text{kWh/år}]$$

Der:  $\Delta T_{ny}$  = ny temperaturdifferanse på primærside [K]

$P_{dim}$  = Dimensjonerende pumpeeffekt før  $\Delta T$  endring [W]

$t_e$  = Ekvivalent brukstid for pumpe [h]

Kostnadene avhenger både av prisforskjell mellom varme og elektrisitet, og virkningsgraden til pumpen( $\eta$ ).

$$k_{pumpe} = P_{el,pumpe} \cdot (1 - \eta) + (P_{el,pumpe} - P_{varme}) \cdot \eta \quad [\text{kr/kWh}]$$

Formel 16; tilleggskostnad for hver kWh pumpearbeid

Der :  $P_{el,pumpe}$  – pris for elektrisitet til pumpen [kr/kWh]

$P_{varme}$  – pris for varme levert [kr/kWh]

Første ledd er kostnaden som henger sammen med en del av arbeidet som elektromotor yter, sløses i pumpen(tap). Pumpetap regnes som ren kostnad. Det andre leddet henger sammen med at varmen som dannes av strømnings-

motstanden er produsert unødvendig dyrt. Differansen mellom varmekostnad og strømkostnad angir denne ekstrakostnaden.

$$\Delta k_{pumpe} = k_{pumpe} \cdot \Delta E_{pumpe} \quad [\text{kr}/\text{år}]$$

## 4.2.2 Økte Kapasitetskostnader:

### 4.2.2.1 Merkostnad knyttet til ubenyttet kapasitet:

En kostnad knyttes til det å ikke benytte kapasitet ved bedre avkjøling på fjernvarmen. Utnyttelsen av eksisterende nett er direkte avhengig av den massestrømmen som sirkulerer i nettet. Ved en maksimalverdi for strømningshastighet som er satt av strømningsproblemer, vil en større kapasitet oppnås ved større  $\Delta T$  på fjernvarmen. Øvre grense for strømningshastighet i rør er som regel ca. 2 m/s. (R.ulseth 2009)

$$\dot{m}_{max} = V_{max} \cdot \rho \cdot \left( \frac{\pi \cdot d_m^2}{4} \right) \quad \text{Formel 17; massestrømbegrensning}$$

Der:  $V_{max}$  - Hastighetsbegrensning i rør [m/s]

$d_m^2$  - snittdiameter til rør [m]

Ved en bedre/dårligere avkjøling på fjernvarmen vil kapasiteten i form av massestrøm endres omvendt proporsjonalt. En 2 % bedre avkjøling vil gi 2 % lavere massestrøm

$$K_{kap} = \frac{\dot{m}_{max} - \dot{m}_{ny}}{\dot{m}_{max}} \cdot I \cdot a \quad [kr/\text{\AA}r]$$

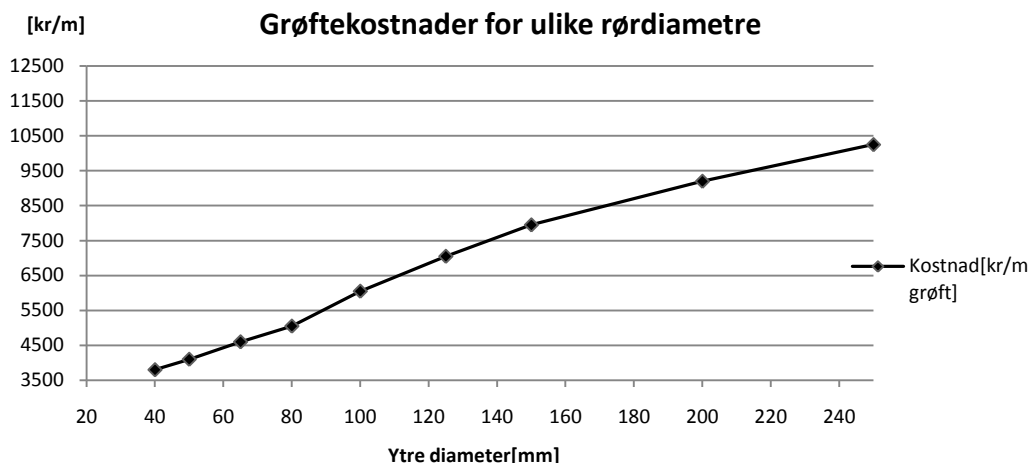
Formel 18; gevinst for ubenyttet kapasitet(Volla 1994)

Der:  $\dot{m}_{ny}$  - representerer en lavere massestrøm som kan erstatte  $\dot{m}_{max}$  i et nett med dårligere avkjøling.

Det vil ikke behandles dypere hvordan forholdet mellom investeringskostnad i nett henger sammen med besparelse i form av bedre utnyttelse av kapasitet.

### 4.2.3 Dyrere rør

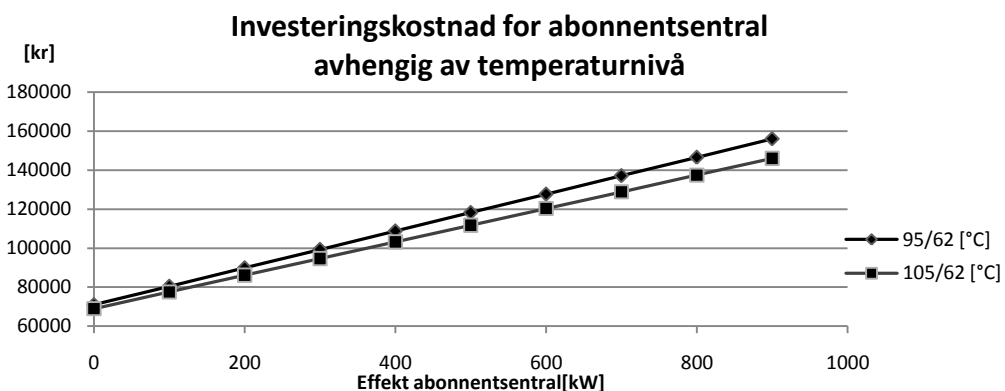
For nye fjernvarmeområder vil en bedre avkjøling gjøre at rørdimensjonene kan reduseres. Merkostnaden for større dimensjoner er stor, så det er mye å hente på å begrense diameteren mest mulig. Nedenfor følger et diagram som viser kostnadsøkningen for ulike rør avhengig av diameter som bestemmer kapasiteten.



Figur 11; totale grøftkostnader fjernvarmetraseer(Bioen 2010).

#### 4.2.4 Dyrere abonnentsentral

Investeringskostnadene øker marginalt med lavere temperaturnivå på fjernvarmen.



Figur 12; kostnad for abonnentsentral avhengig av temperaturnivå

Investeringskostnader vil ikke behandles dypere siden det fokuseres på hvordan driftskostnadene påvirkes av en temperaturreduksjon på fjernvarmen.



## 4.3 Oppsummert temperaturreduksjon og varmproduksjon

Det er mulig å gjøre store besparelser i varmeproduksjonskostnaden ved å redusere temperaturnivået i fjernvarme. Størst er gevinsten ved høy kostnad for spesifikk varmeproduksjonskostnaden og høy følsomhet i virkningsgrad/effektfaktor mhp. temperaturnivået. Særlig gjelder dette for varmepumper og spillvarmekilder. Begge disse får en betydelig forbedret virkningsgrad med lavere temperaturnivå.

For kombinerte varme og kraftproduksjon er potensialet også stort ved å senke temperaturnivået.

Det som er en utfordring er å gjøre de rette justeringene av temperaturnivået med flere varmekilder i produksjon av varme. For å fremstille konsekvensene av temperaturreduksjon for varmeprodusenter på en oversiktlig måte er det oppsummert den teorien som er forklart for hver varmeproduserende enhet og kostnad i fjernvarmessystem. Teorien er knyttet opp imot reelle kostnader for de ulike postene slik at det er lettere å danne seg et bilde av de viktigste prioriteringene i forhold til temperaturnivå i fjernvarme.

### 4.3.1 Kostnadsoversikt

Det er ikke tilstrekkelig å vite hvor mye ytelsen øker ved å redusere temperatur på enten tur eller retur- ledning på fjernvarmen. Det er også nødvendig å vite verdien av økt ytelse. Dette vil presenteres under.

#### 4.3.1.1 Kostnad for ulike utgifter i fjernvarme

Tabellen nedenfor presenterer den kostnaden som varmeproduserende anlegg må betale for å produsere varme. Varmeprisen representerer produksjonskostnad av varme til fjernvarme. Pumpekostnaden er den kostnaden som er forbundet med ikke nyttegjort tap (jf. Formel 16). Kostnaden av varmetap fra fjernvarmerør er definert som 10 % av total varmemengde overført av nettet.

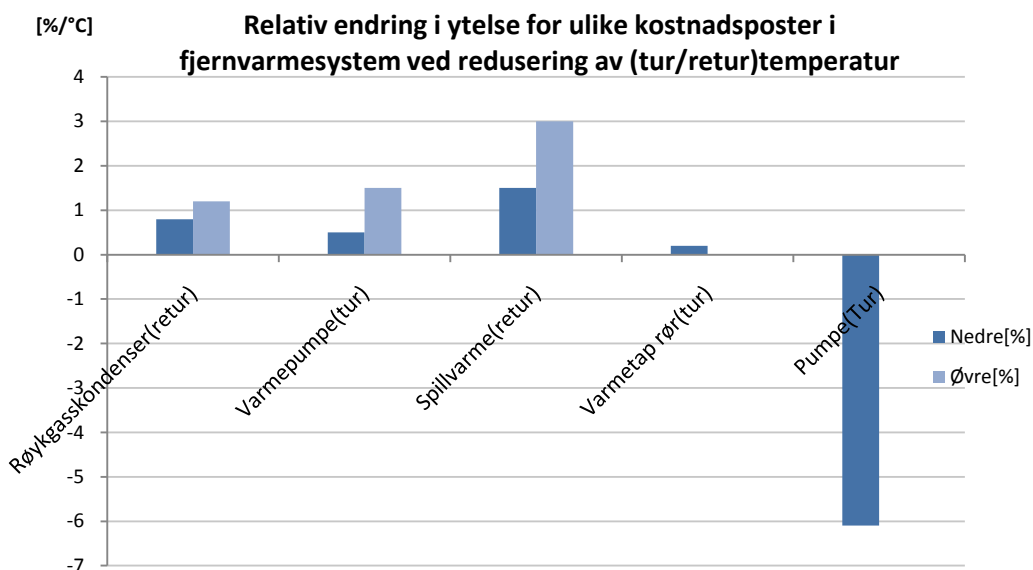
Tabell 4; kostnad for ulike energikilder med kilde

Kostnad	[øre/kWh]	Kilde
Varmepris	0,445	(NVE 2007.1)
Elektrisitetspris	0,84	(NordPool 2011),(NVE 2011)
Fuktig flis	0,19	(NVE 2007.1)
Spillvarme	0,2	antatt
Pumper	0,5585	(Utne 2011)
Varmetap rør	0,0445	(NVE 2009)

Endringen av ytelse med temperaturreduksjon vil påvirke kostnadene av produksjon eller tap.

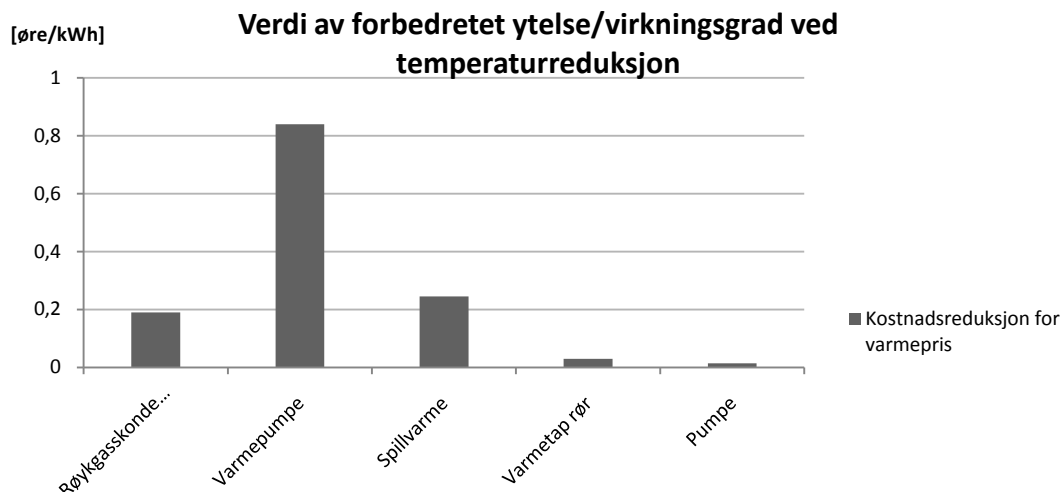
Søylediagrammet under viser sammenhengen mellom prosentvis forbedring av ytelsen ved å endre temperatur på retur eller tur på fjernvarmen.

### 4.3.1.2 Temperatureduksjon og økning i ytelse



Figur 13; endring i ytelse for ulike kostnadsposter i fjernvarmesystem med temperatursenkning.

For en endring av ytelsen vil dette ha ulik verdi fordi de ulike kostnadspostene fordi de ikke har like stor innvirkning på varmeprisen. Spart ytelse på varmpumpen gjør at elektrisitet spares, slik at denne kostnadsreduksjonen blir høy. Spillvarmen vil spare inn differansen mellom varmepris og salgspris på spillvarme, siden økt ytelse betyr at varmen kan skaffes billigere. Dette er regnet inn i tabellen under. Det er for hver varmekilde regnet med at denne er den eneste varmeproduzenten i fjernvarmesystemet.

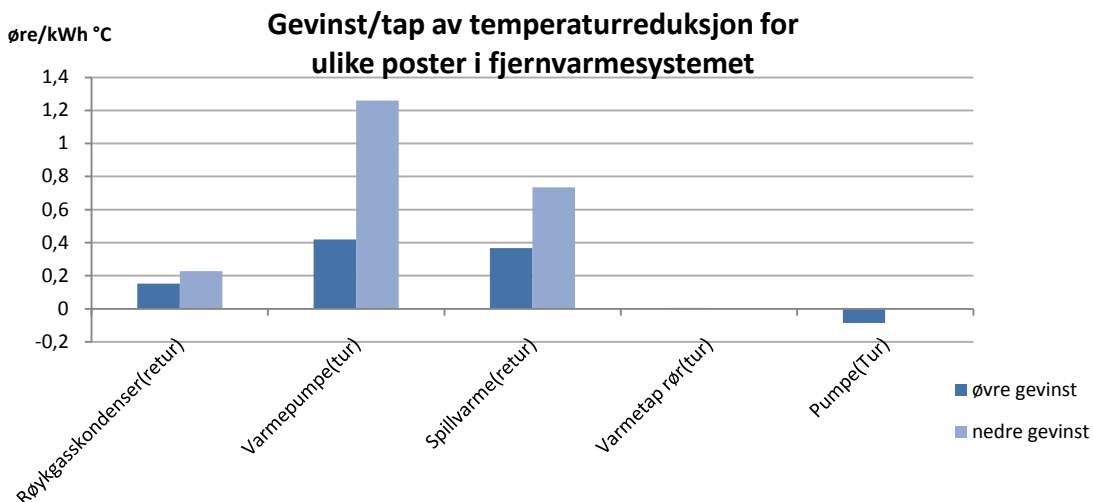


Figur 14; kostnadsreduksjon ved forbedring av ytelse

Siden pumpearbeidet står for så liten del av energiforbruket i fjernvarmesystemet (ca. 2,5 % i Trondheim, (Utne 2011)), vil ikke en kostnadsreduksjon på pumpene ha stor innvirkning på varmeprisen. Pumpearbeidet endres eksponentielt i forhold til økt mengde, derfor vil en lavere turtemperatur gi en stor økning i pumpearbeid. Dette forklarer den høye verdien i Figur 13.

For varmetap til rør er gevinsten av en turtemperaturreduksjon avhengig av varmetapet i nettet. Kostnadsreduksjonen ligger i reduksjon av tap, derfor regnes potensialet som tapsandelen av totalt varmesalg, som er ca 10 % (NVE 2009)

Besparelsen er produktet av kostnadsreduksjon og prosentvis endring av ytelsen. Med høy verdi på begge disse vil gevinsten av temperaturendring på fjernvarmen være stor.



Figur 15; Gevinst av å redusere temperaturnivå med 1°C

Dette er ikke overraskende gitt den store økningen i ytelse og den høye elektrisitetskostnaden at varmepumpen får størst gevinst av en temperaturreduksjon. Spillvarmen har også et høyt potensial, men er veldig følsom for innkjøpskostnaden. Det kan også gi en viss gevinst å redusere returtemperaturen på fjernvarmen ved benyttelse av røykgasskondensering på forbrenningsanleggene. Det er også verdt å nevne at gevinsten ovenfor er for per kWh varme produsert. Store forbrenningsanlegg som ofte benytter røykgasskondensering har også ofte en høy installert effekt og en lang brukstid noe som gjør at gevinsten i kr/ år kan bli høy. Varmepumper og spillvarmekilder produserer mindre varme enn forbrenningsanlegg, noe som gjør at gevinsten reduseres mhp verdien av solgt varmemengde.

### **4.3.2 Betydning for abonnentsentral**

Det viktigste med optimalisering av temperaturnivået i fjernvarmesystemet er at optimaliseringen tar hensyn til kvalitetene til de ulike varmeproduserende enhetene. Med kunnskap om varmepumpers følsomhet for høye turtemperaturer er det en fordel å sørge for lave temperaturkrav på sekundærsiden. Ved alle de andre varmeprodusentene er det svært viktig å få en god avkjøling på fjernvarmen, siden det er en gevinst i å redusere returtemperaturen på fjernvarmen.

For simuleringene i ChessWin er det et primært mål å finne ut om temperaturnivået kan reduseres i fremtidens fjernvarme. Og hva som gjør at temperaturnivået kan reduseres. Det vil også være viktig å identifisere om det er turtemperaturen eller returtemperaturen på fjernvarmen som endres mest ved å endre på parameterverdiene på sekundærsiden.

# 5 Respons på lavere temperaturnivå i abonnentsentralen

---

## 5.1.1 Bakgrunn for teori

Problemstillingene presentert i bakgrunn danner grunnlaget for å undersøke konsekvensene av en av turtemperatursenkning på fjernvarmen i forhold til temperaturdynamikk i abonnentsentralen. Disse er;

For å belyse følgende problemstillingene er det nødvendig med en innføring i teori knyttet til temperaturdynamikk i abonnentsentral, og forholdet mellom temperaturnivå på fjernvarme – og sekundærsystem.

Redusert turtemperatur på fjernvarmen fører til at temperaturdynamikken i abonnentsentralen forandres. Når dynamikken forandres vil varmeoverføring og avkjøling både på primær - og sekundærside endres, noe som påvirker det optimale temperaturnivået. Det optimale temperaturnivået er de temperaturene som gir best avkjøling og dermed lavest returtemperatur på fjernvarmen. Hvordan endringene skjer, er svært interessant og viktig å vite for å kunne analysere konsekvensene av en reduksjon av turtemperaturen på fjernvarme.

## 5.2 Teorigrunnlag for abonnentsentral

### 5.2.1.1 *Grunnleggende termodynamikk*

Ved redusert turtemperatur i fjernvarmesystemet vil temperaturredifferansen mellom tur på fjernvarmen og retur på sekundærsystemet reduseres. Det betyr at den teoretisk mulige nedkjøling avtar. Mindre avkjøling reduserer

kapasiteten per mengde vann. Termodynamikkens lover viser dette. I kommende avsnitt vil de mest sentrale parametrene for temperaturdynamikken til primær – og sekundærside fremstilles. Varmeoverføring er grunnleggende, siden varmeoverføringen fra fjernvarmen til sekundærsiden er grunnlaget for at de ulike abonnentene mottar varme. En energibalanse for varmeoverføring gjelder på mange områder i fjernvarme. Energibalansen for et lukket system er definert med følgende formel;

$$Q - W = \Delta U = dU \quad \text{Formel 19; energibalanse} \quad [W]$$

I abonnentsentraler er det ikke noe arbeid som utføres, bare varmeoverføring. Derfor kan likningen forenkles slik at energi erstattes av varme som består av den indre energien(U). For å kunne gjøre om formelen til størrelser som massestrøm, varmekapasitet og temperaturdifferanse trenger vi å innføre entalpi(H).

Entalpi er definert med følgende formel og forenkles ved å slette endring av trykk og volum som regnes konstant;

$$dH = dU + d(pV) = dU \quad \text{Formel 20; entalpi} \quad [W]$$

Det er et trykkfall over varmevekslere men denne trykkendringen antas overført til varmeenergi tilbake til fjernvarmevannet.

Indre energi kan da erstattes av entalpi.

$$dH = m \cdot C_{p,vann} \cdot dT \quad \text{Formel 21; Entalpiuttrykk med temperaturdifferanse}$$

Der:	m	-	Masse til vann	[kg]
	$C_{p,vann}$	-	Varmekapasitet til vann	[KJ/kg K]
	dT	-	Temperaturdifferanse	[K]

Overført varmeeffekt uttrykkes da slik; (Shapiro H.N. 2006)

$$Q = m \cdot C_{p,vann} \cdot dT \quad \text{Formel 22; Overført varme} \quad [W]$$



Overført varmeeffekt sier noe om hvor mye varme som overføres per tidsenhet(sekund). Siden det omhandles dynamiske system vil det være gunstig å benytte effektverdier.

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dm}{dt} \cdot C_{p,vann} \cdot \Delta T = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad \text{Formel 23; Overført varmeeffekt [W]}$$

Utleddningen av overført varmeeffekt gir innsikt i hvilke parametre som avgjør hvordan varmeeffekt overføres. Som varmeoverførende medium er det vann det er snakk om i fjernvarme. Vann har høy volumetrisk varmeoverføringskapasitet noe som er svært viktig når varme skal overføres. Dette skyldes at varmekapasitet og tettheten til vann er høye. Høy volumetrisk varmeoverføring er viktig siden overført volum bestemmer størrelsen til rørene i fjernvarme. Dette volumet vil begrenses pga økende leggekostnader for rør med større dimensjon. I denne rapporten brukes følgende verdier for varmekapasitet og tetthet til vann;

$$C_p = 4,2 \text{ kJ/K kg}$$

$$\rho = 1000 \text{ kg / m}^3$$

Et mål for ethvert fjernvarmenett er å utnytte kapasiteten mest mulig, dvs overføre mest mulig varme på en mest mulig effektiv måte for en gitt rørstrekning. Avgitt effekt i et nett består av akkumulert effekt fra alle de tilknyttete abonnentsentralene(varmeforbrukerne).

I denne rapporten fokuseres det på en abonnentsentral avgrenset til den delen som tar seg av oppvarmingssystemet for et gitt bygg. Oppvarmingssystemet,

og dynamikken i denne sentralen kan brukes til å forstå dynamikken i et fjernvarmeområde. For å begynne med det elementære.

### 5.2.1.2 *Varmeoverføring fra fjernvarme til sekundærside:*

I en abonnentsentral for fjernvarme overføres det varme fra fjernvarmen ved at fjernvarmevannet avkjøles mot kaldere vann på sekundærsiden. Dette skjer i en varmeveksler hvor vannet på sekundær/fjernvarme-siden er separert av tynne metallplater.

$$Q_{avgitt, fv} = Q_{vvx, tap} + Q_{mottatt, sek} \quad \text{Formel 24; overført varmeeffekt [W]}$$

I en varmeveksler er det lite tap og dette tapet overføres ofte til vannet igjen, derfor neglisjeres varmevekslertapet slik at avgitt effekt fra fjernvarmen tilsvarer mottatt effekt på sekundærsiden.

### 5.2.1.3 *Avgitt effekt fra fjernvarmen*

Avgitt effekt for fjernvarmen i en abonnentsentral kan uttrykkes slik gitt av utledningen fra generell termodynamikk;

$$Q_{avgitt, fv} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{tur} - T_{retur}) = \dot{m}_{FV} \cdot C_p \cdot \Delta T_{fjernvarme} \quad \text{Formel 25; avgitt effekt fjernvarme [W]}$$

Fjernvarmens kapasitet reguleres av turtemperatur på fjernvarmen og massestrøm. Turtemperaturen bestemmer avkjølingen på fjernvarmen ( $\Delta T_{fjernvarme}$ ). Avkjølingen på fjernvarmen er en svært viktig faktor når det gjelder optimaliseringen av temperaturnivået i fjernvarme. Ut ifra formel 7 kan en lese at avkjølingen er avhengig av tur/retur-temperaturen på fjernvarmen.

Kapasiteten til fjernvarmen per masseenhet avtar med redusert turtemperatur på fjernvarmen. Dette verifiserer formel 7.

Returtemperaturen til fjernvarmen er bestemt av størrelsen på varmeveksleren til oppvarmingssystemet og returtemperaturen på sekundærsiden. Økt varmevekslerstørrelse og lavere sekundær returtemperatur gir en større avkjøling på fjernvarmen. Den høyeste teoretiske avkjølingen vil være differansen mellom turtemperaturen til fjernvarmen og returtemperaturen til sekundærsiden. Lave massestrømmer på fjernvarmesiden vil øke avkjølingen og en økning av massestrømmen vil redusere avkjølingen.

#### **5.2.1.4 Mottatt effekt sekundærside**

For sekundærsiden er energibalansen slik;

$$Q_{mottatt,sek} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{tur} - T_{retur}) = \dot{m}_{sekundær} \cdot C_p \cdot \Delta T_{sekundær} \text{ [W]}$$

Formel 26

En stor avkjøling betyr at massestrømmen er lav og en liten avkjøling betyr at massestrømmen er høy. Det betyr at massestrøm og avkjøling er omvendt proporsjonale. Denne omvendte proporsjonaliteten påvirker temperaturdynamikken i stor grad og gjør at det optimale temperaturnivået er et resultat av optimal massestrøm. Dette skal forklares dypere med eksempler for å tydeliggjøre viktige momenter for temperaturdynamikk.

Den vannmengden som blir oppvarmet til oppvarmingssystemet blir så avkjølt i varmebatteriet for ventilasjon og radiatorsystem. Avgitt effekt fra disse er bestemt av følgende likninger:

$$Q_{avgitt,radiator} = \dot{m}_{radiator} \cdot C_p \cdot (T_{tur} - T_{retur,radiator}) \text{ [W]}$$

Formel 27

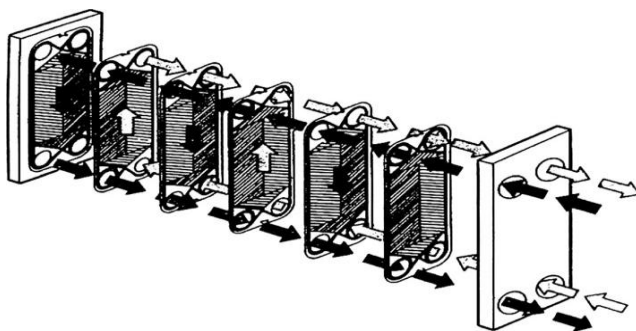
$$Q_{avgitt,vent} = \dot{m}_{venti} \cdot Cp \cdot (T_{tur} - T_{retur,vent}) \quad [W]$$

Formel 28

Formlene over gjelder for avgitt varmeeffekt. Det som er verdt å merke seg er at returtemperaturen ikke er den samme for de 2. Dette vil behandles senere i rapporten.

## 5.2.2 Temperaturdynamikk i varmevekslere

Varmevekslere i abonnentsentraler for fjernvarme er som regel platevarmevekslere av ulike typer. Disse er kompakte og kan overføre store mengder varme per volumenhet. Det finnes ulike typer varmevekslere, og denne rapporten konsentrerer seg om motstrøms platevarmevekslere for å forklare temperaturdynamikken for varmeoverføring.



En varmeveksler overfører varme fra et varmt medium til et kaldt.

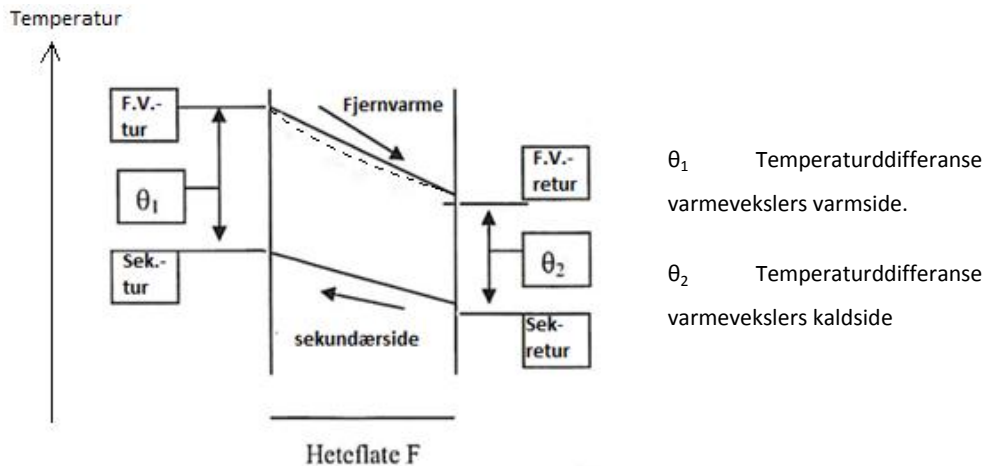
Dette skjer ved at vannet strømmer motstrøms over plater i en annenhver konfigurasjon

Figur 16; Motstrøms varmeveksler

Siden varmeoverføringen skjer ved at vannet strømmer motstrøms er det mulig for fjernvarmen å kjøles helt ned til returtemperaturen på sekundærsiden.

Selve prinsippet er enkelt. Det som er avgjørende for varmevekslerens ytelse er massestrøm og temperaturnivå. Nedenfor vises hvordan temperaturutviklingen skjer teoretisk i en varmeveksler. Venstre side av varmeveksleren betegnes som varmside og høyre for kaldside.

### 5.2.2.1 Temperaturparametre for varmevekslere.



Figur 17; Temperaturutvikling for varmeveksler

Varmeoverføring i varmevekslere uttrykkes ved temperaturdifferanse og UA-verdi. For en varmeveksler regnes U-verdien og arealet som konstant noe som gjør at kapasiteten til varmeveksleren er avhengig av temperaturdifferansen mellom varm - og kaldside. Dette er en forenkling siden varmevekslerens U-verdi vil variere med strømningshastighet og temperatur.

For varmeveksleren er varmeoverføringen avhengig temperaturdifferansen mellom det kalde og varme mediet. Middelttemperaturdifferansen er den gjennomsnittlige temperaturdifferansen i varmeveksleren og denne gjelder for alle varmevekslere. Denne temperaturdifferansen kan uttrykkes teoretisk på forskjellige måter.

$$Q_{vtx} = U \cdot A \cdot T_m \quad \text{Formel 29; Overført varmeeffekt varmeveksler}$$

Ved like massestrømmer i varmevekslere benyttes middelttemperaturdifferanse til å definere overført effekt i en varmeveksler.

Dvs. snittet av temperaturdifferansen på inn og utløp. Denne er vist i figur 2 med heltrukket linje.

$$T_m = \theta_1 + \theta_2/2 \quad \text{Formel 30; middeltemperaturdifferanse}$$

Problemet er når massestrømmene er ulike så vil den lave massestrømmen ha en eksponentiell temperaturendring. Denne er vist som stiplet linje i Figur 17. Da benyttes logaritmisk middeltemperaturdifferanse(LMTD) som er en tilnærming av temperaturdifferansen i varmeveksleren. LMTD uttrykkes her som  $\Delta T_{ln}$ . Dette kan gi feilmarginer i tilfeller hvor massestrømmene er rimelig like. Overført effekt i varmeveksleren er definert slik med logaritmisk middeltemperaturdifferanse(LMTD);

$$Q_{vwx} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ln} \quad \text{Formel 31; overført varmeeffekt uttrykt med LMTD}$$

Logaritmisk middeltemperaturdifferanse brukes for å uttrykke temperaturdifferansen mellom varm - og kaldside med ulikhet i massestrømmene. Logaritmisk middeltemperaturdifferanse uttrykkes ved formel 5 slik;

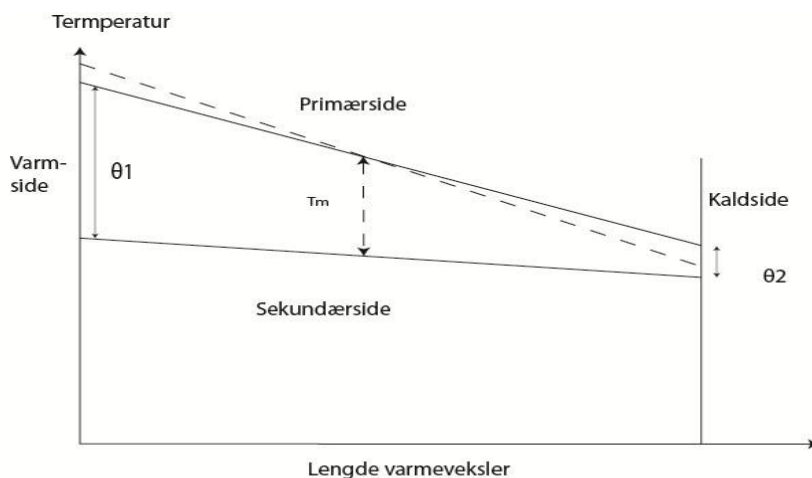
$$\Delta T_{ln} = (\theta_1 - \theta_2)/\ln(\theta_1/\theta_2) \quad \text{Formel 32; Definisjon LMTD}$$

$\theta_1$  og  $\theta_2$  er definert i figur 2. Redusert turtemperatur fører til at temperaturdifferansen på varmevekslerens varmside( $\theta_1$ ) avtar, noe som igjen begrenser kapasiteten til varmeveksleren.

## 5.2.3 Konsekvenser av temperaturendring

### 5.2.3.1 Endret turtemperatur på fjernvarmen

Endring av turtemperaturen på fjernvarmen endrer avkjølingen på primærsiden, som resulterer i at massestrømmen endres for en gitt kapasitet(s.52). Virkningen av endret turtemperatur illustreres ved en skisse. Stiplet linje viser økning av massestrøm grunnet turtemperaturøkning på primørside.



Figur 18; Temperaturdynamikk varmeveksler med endret massestrøm fjernvarme

Endringer av temperaturparametrene  $\theta_1$  og  $\theta_2$  til varmeveksler med turtemperatursenkning på fjernvarmen;

- Massestrøm øker på fjernvarmen
- $\theta_1$  avtar med økt massestrøm på fjernvarmen.
- $\theta_2$  øker med økt massestrøm på fjernvarmen.
- Siden  $T_m$  er konstant vil  $\theta_1$  avta med økende  $\theta_2$  og motsatt

Ved å redusere turtemperaturen på fjernvarmen øker temperaturdifferanse på varmevekslerens kaldside( $\theta_2$ ), noe som betyr at returtemperaturen på fjernvarmen øker. Dette er ikke ønskelig siden god avkjøling er en viktig målsetning for et fjernvarmesystem. I praksis vil det finnes ulike optimale temperaturer på sekundærsiden avhengig av turtemperatur på fjernvarmen.

### ***5.2.3.2 $\Delta T$ primær - og sekundærside***

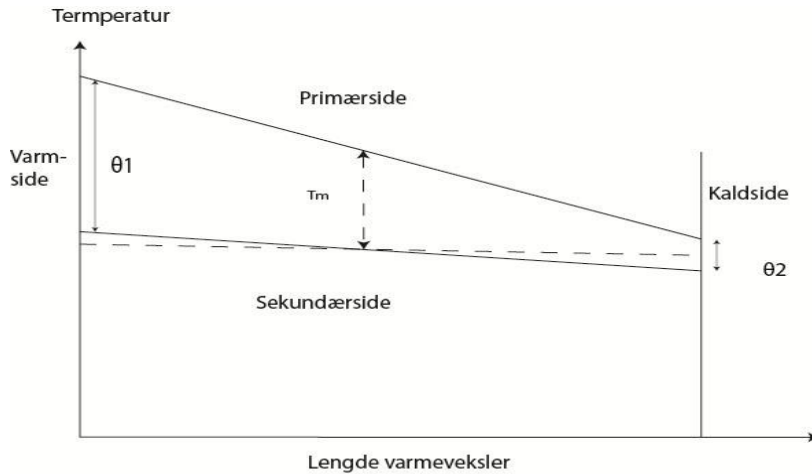
$\Delta T$  på primærsiden bestemmes i stor grad av returtemperaturen på sekundærsiden. Dette fordi turtemperaturen reguleres i forhold til en effekt behovet i fjernvarmenettet.

$\Delta T$  reduseres på sekundærsiden med redusert sekundær turtemperatur. Dette fordi et konstant effektbehov på sekundærsystemet øker massestrømmen. Temperaturnivået i rommet som radiator- og ventilasjonssystemet avgir varmen til er konstant, derfor må massestrømmen øke for å opprettholde effekten.

### ***5.2.3.3 Endret turtemperatur på sekundærsiden***

Ved en reduisering av turtemperaturen på sekundærsiden vil avkjølingen fra radiatorene avta for en gitt massestrøm(5.2.3.5). Dette gjør at massestrømmen øker for å opprettholde konstant ytelse. Dette reguleres ved at massestrømmen på sekundærsiden øker slik at temperaturforholdene endres i varmeveksleren. For det første vil en økt massestrøm på sekundærsiden føre til en mindre temperaturøkning gjennom varmeveksleren gitt at massestrømmen er konstant på fjernvarmesiden. Dette lar seg best illustrere ved en figur. Stiplet linje angir økt massestrøm på sekundærsiden.





Figur 19; Temperaturdynamikk varmeveksler med endret massestrøm på sekundærside.

Endringen av LMTD varmeveksler med turtemperatursenkning sekundærside;

- $\theta_1$  øker med økt massestrøm på sekundærside.
- $\theta_2$  avtar med økt massestrøm på primærside.

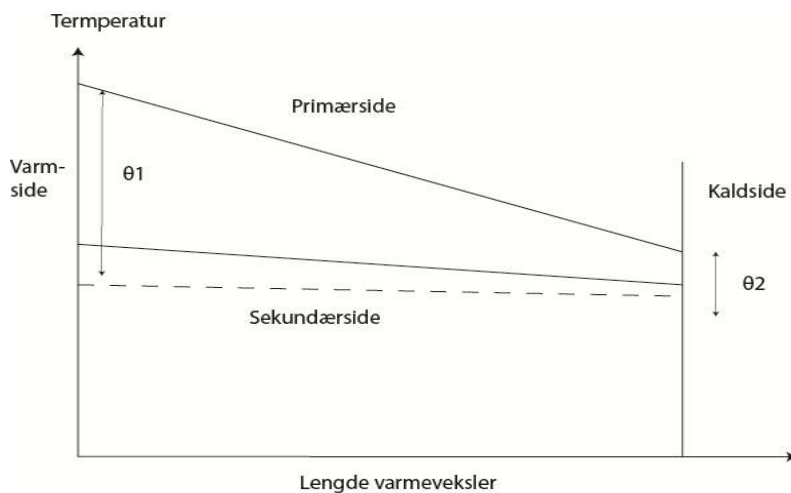
Det optimale temperaturnivået på sekundærsiden varierer med temperaturnivået på primær- og sekundærsiden, ettersom lavere turtemperatur på sekundærsiden gir lavere avkjøling. Lavere turtemperatur øker varmeoverføringen på varmevekslerens varmside. Derimot vil varmeoverføringen reduseres på varmevekslerens kaldside, pga. en høyere returtemperatur(jf. Figur 19)

Selv om temperaturdifferansen reduseres på varmevekslerens utløp vil  $\Delta T_{in}$  være konstant grunnet en økning av temperaturdifferansen på varmevekslerens innløp(varmeside). Det er viktig å merke seg at avkjølingen

på fjernvarmen ikke vil være lineær gjennom varmeveksleren for alle temperaturnivå. Ved massestrømmer som er ulike vil den med lavest massestrøm ha en ulineær temperatur-senkning/økning.

#### 5.2.3.4 *Temperaturnivå sekundærside*

Nedenfor er en skisse over temperaturforløpet for varmeveksleren for oppvarmingssystemet ved redusert sekundært temperaturnivå. Legg merke til at temperaturdifferansen øker på kald – og varmside. Fjernvarmen kan da redusere temperaturnivået og allikevel opprettholde middeltemperaturdifferansen i varmeveksleren som angir varmeoverføringen.



Figur 20; Redusert temperaturnivå på sekundærsiden

Den viktigste faktoren som påvirker temperaturnivået i fjernvarme er temperaturnivået på radiatorsystemet.(Lauenburg 2009). Temperaturnivået kan skille mye fra land til land, og er et resultat av forskjellig praksis, som igjen avhenger av tradisjoner for fjernvarmesystemer. I Studien til Lauenburg pekes det på at temperaturnivået på radiatorsystemet generelt reduseres, pga. nye

systemer og en generell overdimensjonering av radiatorflatene grunnet dårlig anslag på romoppvarmingsbehov.

I norske fjernvarmesystemer finnes det ikke noen regler som reduserer temperaturnivået på fjernvarme, men mange har regler som sier noe om nedkjølingen på sekundærsiden. Hafslund fjernvarme har følgende krav som begrenser temperaturnivået på sekundærsiden(HafslundFjernvarme 2009);

Tabell 5; temperaturkrav sekundærside fra Hafslund fjernvarme

System:	Maksimal temperatur [°C]
Radiator tur	80
Radiator retur	50
Varmebatteri tur	80
Varmebatteri retur	40

Det er usikkert hvordan fjernvarmeselskapene følger opp disse temperaturkravene, men det er en forutsetning for å redusere temperaturnivået på primærsiden at det sekundære temperaturnivået også reduseres.

### 5.2.3.5 Varmeavgivelse radiatorer

Varmeavgivelsen fra radiatorene er avhengig av temperatur og massestrøm. Massestrømmen påvirker LMTD til radiatoren. Høy massestrøm vil begrense avkjølingen. Avkjølingens styrke vil være avhengig temperaturdifferansen mellom radiator og rom. Det er derimot et ikke lineært forhold mellom radiatortemperatur og avgitt effekt(R.ulseth 2009);

$$Q_{radiator} = U \cdot A_{rad} \cdot LMTD^{1,33} \quad \text{Radiatoreffekt} \quad [\text{W}]$$

1,33 er en konstant verdi som legges til for radiatorer med fri konveksjon. Formel 33 representerer varmegjennomgangen til radiatoren. Siden varmegjennomgangstallet (U-verdien) og arealet regnes som konstant vil LMTD være den eneste variabelen i formelen for overført varmeeffekt fra radiator.

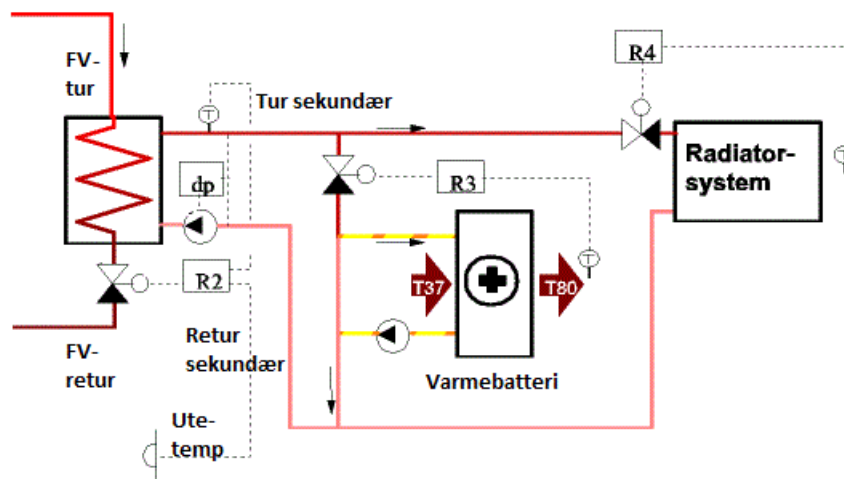
Lavere turtemperatur gir høyere returtemperatur på fjernvarmen, ved en gitt last på sekundærsiden.

## 6 Simuleringer i ChessWin

### 6.1.1 Simuleringsverktøyet

ChessWin(2004) er et simuleringsverktøy som er utarbeidet av NTNU(EPT) i samarbeid med SINTEF energiforskning for IEA. Programmet gir dynamiske data på hvordan en abonnentsentral fungerer i teorien. Den simulerer tappevannsforbruk, og oppvarming av rom og ventilasjonsluft. Det er mulig å forandre på temperaturer på både fjernvarmen og sekundærsiden slik at konsekvensene ved ulike temperaturvalg kan observeres.

Som en forenkling velges det å se bort ifra tappevansdelen av abonnentsentralen og bare fokusere på varmeveksleren for oppvarmingssystemet(Figur 21).



Figur 21; systemskisse av abonnentsentral i Chesswin

ChessWin er bygd opp som en vanlig abonnentsentral. Der en varmeveksler overfører varmen fra fjernvarmen til oppvarmingssystemet(sekundærsystemet). Sekundærsystemet består av et

radiatorsystem som står for romoppvarming og et varmebatteri for oppvarming av ventilasjonsluft. Varmebatteriet for ventilasjon og radiatorsystem er koblet i parallell, noe som gjør at de har den samme turtemperaturen. Avkjølingen over disse gir returtemperaturen på sekundærsiden.

I simuleringen for kapasitetsreduksjon ved turtemperaturreduksjon er reguleringsventilene kritisk dimensjonert, slik at effekten av temperaturreduksjonen skal bli tydelige. Ved kritisk dimensjonering er ventilene i fullt åpen posisjon for alle temperaturer, når temperaturen reduseres..

I simuleringene av optimale temperaturnivå er reguleringsventilene overdimensjonerte slik at de alltid har mulighet til å øke massestrømmen. Dette for å kunne få frem temperaturdynamikken ved varierende massestrøm.

#### ***6.1.1.1 Parametre som endres i programmet***

Programmet har en innebygd funksjon som gjør det mulig å lese av massestrømmer og temperaturer inn og ut av alle komponenter. Verdiene overføres manuelt til Excel hvor de benyttes til å danne diagrammer.

Det er også mulig å endre effektbehov for romoppvarming og ventilasjonsluft. På denne måten er det mulig å simulere hvordan ulike varmebehov vil påvirke temperaturdynamikken i abonnentsentralen. Energigjenvinningsgraden til varmegjenvinner kan også reguleres slik at det er mulig å finne ut hvordan ulik varmegjenvinning påvirker systemet. Varmevekslere og radiatorflater kan reguleres i programmet slik at systemet kan skaleres i forhold til det aktuelle effektbehovet. På den måten kan temperaturdynamikken sammenliknes for abonnentsentralen med ulik effekt.

## **6.2 Simulering av kapasitetsendring ved turtemperatursenkning:**

### **6.2.1 Kapasitet for varmeleveranse til romoppvarming**

Ved å redusere turtemperaturen til fjernvarmen vil kapasiteten til varmeveksleren for oppvarmingssystemet påvirkes. varmeveksleren overfører en lavere effekt ved en mindre middeltemperaturdifferanse( $T_m$ ). Dermed vil kapasiteten til sekundærsystemet reduseres også. Ved redusert kapasitet levert til sekundærsystemet vil varmeavgivelsen fra radiatorene og varmebatteriet reduseres. En turtemperaturreduksjon vil avdekke hvor mye turtemperaturen kan reduseres ved redusert effektbehov for romoppvarming.

#### ***6.2.1.1 Utførelse av simulering for kapasitetsendring ved turtemperaturreduksjon***

I ChessWin ble alle ventiler kritisk dimensjonert. Dvs. at ved en turtemperatur på fjernvarmen på 120 °C og en turtemperatur på sekundærsiden på 80 °C er vannmengden akkurat stor nok til å dekke varmebehovet ved full ventilåpning. Ved å senke turtemperaturen på fjernvarmen klarer ikke ventilen å kompensere for en lavere avkjøling ved å øke massestrømmen til varmeveksler for oppvarmingssystem. Da vil sekundærsystemets temperaturnivå påvirkes umiddelbart ved at turtemperaturen synker, og den leverte effekten avtar.

Målet er å vise til hvor raskt kapasiteten avtar på radiatorsystemet og hvordan dette påvirker ventilasjonssystemet.

Det benyttes relative verdier i fremstillingene, dvs. at verdier for avgitt effekt og LMTD hhv. er angitt i forhold til dimensjonerende effekt og LMTD til varmeveksler.

### 6.2.1.2 Kapasitet til fjernvarme

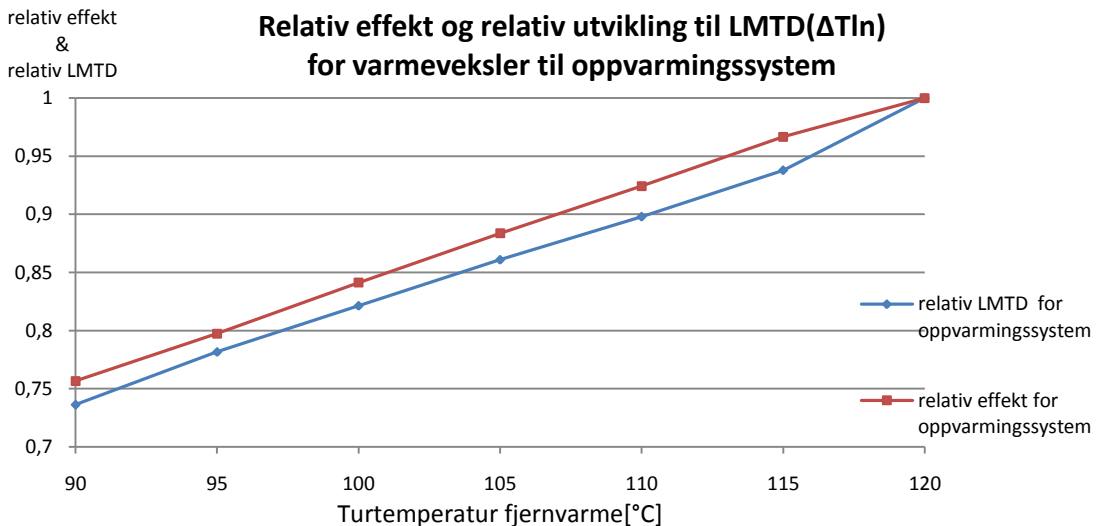
Kapasiteten til fjernvarmen er gitt av formelen under. Den viser sammenhengen mellom avgitt effekt fra fjernvarmen og avkjøling på fjernvarmen.

$$Q_{avgitt, fv} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{tur} - T_{retur})$$

Ved dimensjonerende varmebehov er reguleringsventilen for oppvarmingssystemet i full åpning i simuleringen, og  $\dot{m}_{FV}$  kan ikke økes. Returtemperaturen på fjernvarmen er gitt av systemutformingen slik at det bare er turtemperaturen som bestemmer kapasiteten.

En reduksjon av turtemperaturen på fjernvarmen reduserer da avgitt effekt fra varmeveksleren.

$$Q_{vwx} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ln} \quad \text{Formel 33; overført varmeeffekt uttrykt med LMTD}$$



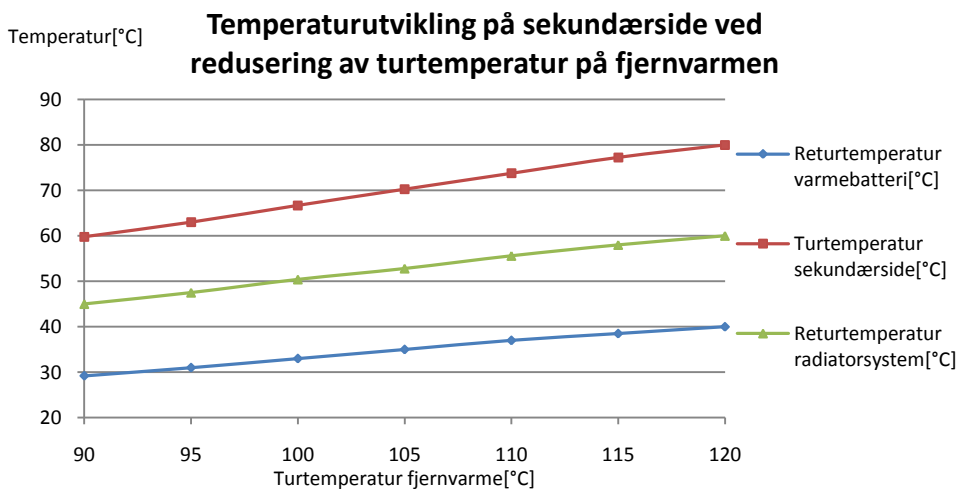
Figur 22; Relativ effekt og LMTD for oppvarmingssystem ved redusert turtemperatur på fjernvarmen



### 6.2.1.3 Påvirkning sekundærside

Når avgitt effekt fra varmeveksleren avtar reduseres også oppvarmingen av sekundærvannet noe som reduserer turtemperaturen på sekundærsiden. Med redusert turtemperatur reduseres den kapasiteten til sekundærsiden. Dette fordi massestrømmen også her er konstant og returtemperaturen bestemt av systemutformingen.

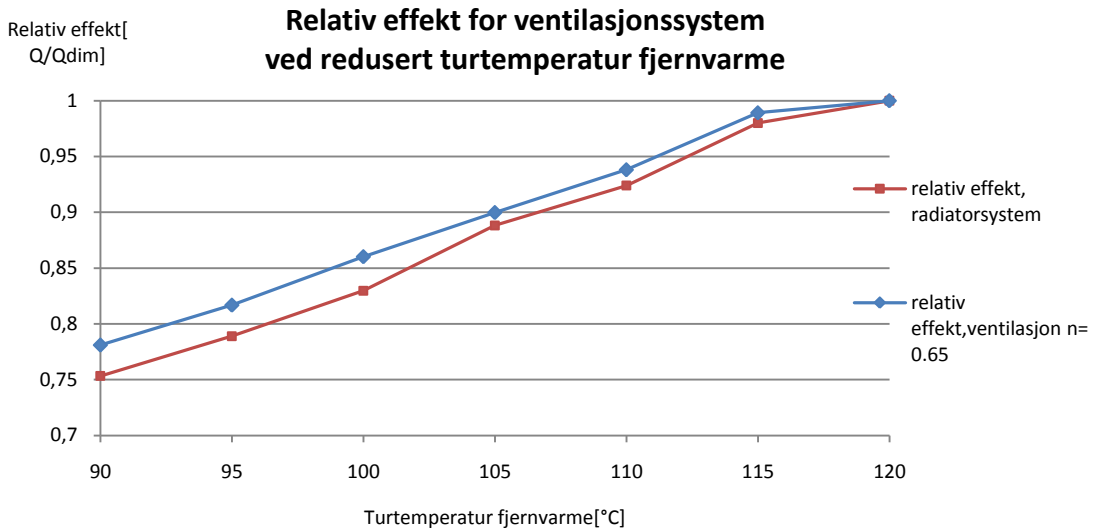
Når temperaturen reduseres på sekundærsiden påvirkes avkjølingen på radiator – og ventilasjonssystem. Dette skjer fordi temperaturdifferansen mellom varmeflatene og luften i rommet reduseres. Diagrammet under viser temperaturutviklingen på sekundærsiden ved redusert turtemperatur på fjernvarmen.



Figur 23; Temperaturutvikling på sekundærside(ChessWin)

Det er tydelig at temperaturdifferansen på sekundærsiden(avkjølingen) reduseres ved redusert turtemperatur på sekundærsiden og fjernvarmen. Den ulineære temperaturutviklingen skjer bl.a. fordi 1 °C reduksjon er relativt mer

ved lave temperaturer. For radiatorssystemet betyr det også at varmeavgivelsen fra stråling avtar mer ved høye temperaturer enn lave.



Figur 24; kapasitetsreduksjon radiator- og ventilasjonssystem ved redusert turtemperatur fjernvarme

Kapasiteten til radiator- og ventilasjonssystemet avtar nærmest lineært med redusert turtemperatur på primærsiden i forhold til en referansetemperatur på 120 °C.

For radiatorssystemet avtar kapasiteten med 0,83 % for hver grad temperaturen reduseres på fjernvarmen. For en reduksjon av turtemperaturen fra 120 °C til 110 °C vil kapasiteten da reduseres med ca. 8 %. Reduksjonen i radiator effekt henger sammen med at varmeavgivelsen fra radiatorene ikke vil opprettholdes med en lavere temperatur gitt en konstant massestrøm. Denne effekten vil avta mer i virkeligheten siden varmeavgivelsen fra radiatorer avtar eksponentielt mhp. temperaturdifferanse mellom rom og overflate til radiator (se usikkerhetsanalyse).

#### **6.2.1.4 Endringer med energikrav fra TEK 10**

Figur 24 fungerer for å kunne gi et bilde av hvor mye temperaturene kan reduseres for å levere en avtakende varmeeffekt. For energikravene i TEK 10 skjerpes kravene til varmegjenvinneren og varmetap fra bygningsdelene.(NorskStandard 2007). For yrkesbygg øker kravene til varmegjenvinneren fra 60 til 80 %, slik at effektbehovet for oppvarming av ventilasjonsluft reduseres mye. Sammenliknet med reduksjonen av varmetapene fra bygg er reduseringen i effektbehov større for ventilasjon sett i forhold til referansebygget i fra 1997(jf. Tabell 6)

Dette gjør at det er mulig å senke turtemperaturen på fjernvarmen mye og allikevel dekke en lavere effekt gitt at det sekundære systemet er uendret.

#### **6.2.1.5 TEK 10 krav til passivhusstandard**

Fra TEK 10 til passivhusstandarden skjerpes ikke kravene til ventilasjonssystemet, slik at effektbehovet til ventilasjon er omtrent uendret. Samtidig reduseres effektbehovet for romoppvarming mye, noe som gjør at en eventuell temperaturreduksjon kan være problematisk for ventilasjonssystemet. Med redusert turtemperatur kan sekundærsystemet levere en redusert effekt til radiatorsystemet men ikke til ventilasjonssystemet som har uendret effekt. Hvordan dette kan løses vil behandles i kapittel 6.2.1.6.

#### **6.2.1.6 Konsekvenser for varmebatteri til ventilasjon**

Problemet med å redusere turtemperaturen på fjernvarmen er åpenbart for en parallellkobling av varmebatteri for ventilasjon og radiatorsystem på sekundærsiden. Redusert turtemperatur fører til at varmebatteriet for ventilasjon ikke klarer å motta like mye varme som ved høyere. Temperaturen

inn på varmebatteriet reduseres og dette påvirker avkjølingen(jf. Figur 16). Derfor må det gjøres tiltak for å opprettholde en konstant ytelse. Det er 2 valg som er mulige.

1. Installere en bedre varmegjenvinner. På den måten trenger ikke varmebatteriet å gjøre en like stor del av temperaturløftet.
2. Installere et større varmebatteri for ventilasjon.

Den ideelle løsningen i et økonomisk og miljømessig perspektiv er å øke virkningsgraden til varmegjenvinneren. På den måten reduseres energiforbruket samtidig som ekstrakostnaden for et større varmebatteri unngås. Det er ikke behandlet kostnader for investering i større varmebatteri.

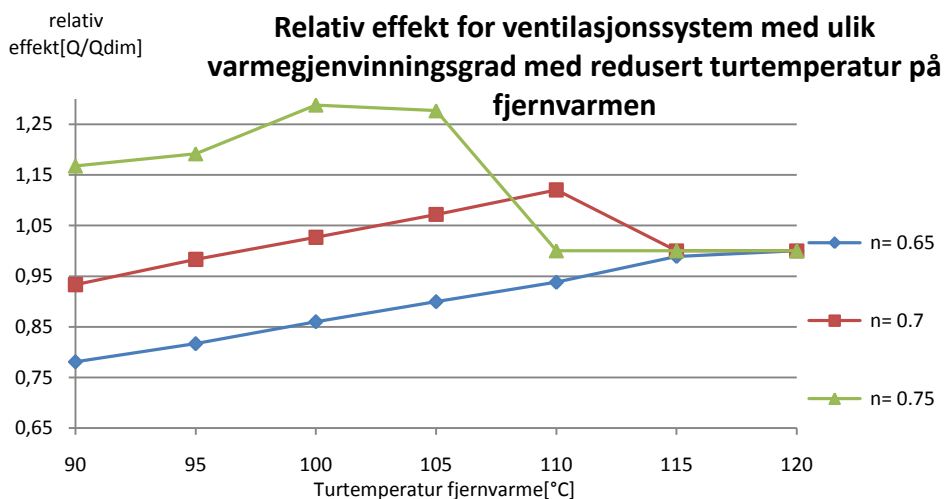
#### ***6.2.1.7 Endring av ytelsen til varmegjenvinner:***

Varmegjenvinnerens gjenvinningsgrad har mye å si for hvordan dynamikken i abonnentsentralen blir ved redusert turtemperatur. Med høy virkningsgrad på varmegjenvinneren til ventilasjonssystemet kan størrelsen på varmebatteriet reduseres. I denne simuleringen er det testet ut hvordan varmekapasiteten fra varmebatteriet for ventilasjon og varmegjenvinneren til sammen klarer å levere varme med redusert turtemperatur på fjernvarmen.

For investeringskostnader på varmegjenvinnere er det en liten differanse på investeringskostnadene for virkningsgrader mellom 60-80 % (BE(Statensbyggtekniskeetat) 2004). Den største økningen i investeringskostnad skjer fra 80 – 90 %. Da må arealet økes mye og kostnadene økes merkbart.

Størrelsen på varmebatteriet er konstant mens varmegjenvinneren forbedres. Til høyre i diagrammet presenteres varmegjenvinningsgraden(n) til varmegjen-

vinneren. Grunnen til at den relative effekten øker over 1 er at ventilasjonssystemet kompenserer for redusert kapasitet fra radiatorsystemet ved å øke effekten. Alle verdier over 1 er tilfredsstillende for å levere stor nok effekt.



Figur 25; relativ effekt varmebatteri for ventilasjonsluftoppvarming med ulike varmegjenvinningsgrad

I diagrammet er det vist opprinnelig varmegjenvinningsgrad på 65 % noe som resulterer i at varmebatteriet for ventilasjon ikke klarer å overføre nok varme ved redusert turtemperatur på fjernvarmen.

Fra diagrammet er det tydelig at konstant ytelse oppnås ved å øke varmegjenvinningsgraden til varmegjenvinneren. Dette skjer for alle verdier over 1. Verdiene øker også over 1, siden ventilasjonssystemet kompenserer for lavere ytelse fra radiatorsystemet i simuleringene. Ved å øke varmegjenvinningsgraden med 5 % til 70 % oppnås konstant ytelse for en reduksjon av turtemperaturen på fjernvarmen ned til 97 °C. Ved å øke varmegjenvinningsgraden med 10 % til 75 % oppnås konstant ytelse for turtemperaturer under 90 °C.

Dette viser at selv en liten forbedringen av varmegjenvinneren kan hele ventilasjonssystemet kan levere konstant ytelse på et lavere temperaturnivå. En økning av varmegjenvinningsgraden på 10 % er en betydelig økning men allikevel fullt mulig å utføre uten å øke kostnaden nevneverdig som er det viktigste.

## 6.3 Relativ effektkostnad

Definisjon på effektkostnad er investeringskostnad per avgitte effekt som vist nedenfor;

$$K_{effekt} = \frac{i}{Q} \quad [\text{kr/kW}]$$

Der:  $i$  - Investeringskostnader – Kostnad for varmeanlegg [kr]

$Q$  - Avgitt effekt – Dimensjonerende effekt på varmeoverføring [kW]

Investeringskostnaden er knyttet til det vannbårne varmesystemet i bygget; røropplegg, radiatorer og varmebatteri. I simuleringene er det vannbårne varmesystemet beholdt uendret ved reduksjon av temperaturnivået. Investeringene for et gitt bygg er derfor uavhengige av temperaturnivået.

Ved å redusere temperaturnivået er det mulig å se hvor store effektkostnadene blir ved forskjellig temperaturnivå og effekt. Det er i foregående kapittel bevist hvordan kapasiteten avtar for redusert temperaturnivå.

Den relative effektkostnaden vil endres i takt med at levert effekt fra oppvarmingssystemet i bygget avtar. Den relative leverte effekten for hele

bygget består av effekt levert fra radiatorsystemet og varmebatteriet for ventilasjon. Ved å redusere turtemperaturen på fjernvarmen vil ikke varmeavgivelsen fra disse opprettholde kapasiteten, og effekten avtar.

Effektkostnaden settes lik 1 ved dimensjonerende temperaturnivå, dvs. med en turtemperatur lik 120 °C på fjernvarmen og 80 °C på sekundærsiden. Med en lavere levert effekt vil relativ effekt øke fra 1 og oppover.

Sammenhengen mellom turtemperaturen til fjernvarme og relativ effektkostnad, er omvendt proporsjonal med utviklingen til levert effekt(figur 20).

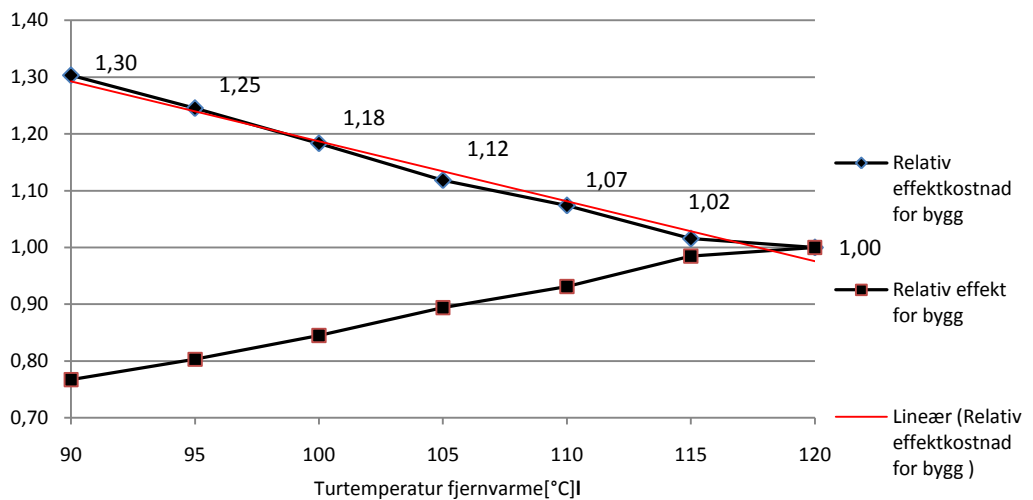
### **6.3.1 Relativ effektkostnad for bygg**

Den relative effektkostnaden endrer seg forskjellig for hele bygget og for romoppvarmingssystemet(radiatorsystem).

Dette er fordi effektleveranser avtar ulikt for varmebatteriet for ventilasjon og radiatorsystemet. Denne ulikheten er ikke stor slik at den relative effektkostnaden skiller lite for hele bygget og for radiatorsystemet. Nedenfor er den relative effektkostnaden presentert for et bygg, dvs. for hele oppvarmingssystemet. Verdiene som er benyttet i ChessWin er presentert i vedlegg 7.

Relativ effekt &  
Relativ effektkostnad

### Relativ effekt og effektkostnad for bygg



Figur 26; Relativ effekt og effektkostnad for oppvarmingssystemet i bygg(ChessWin)

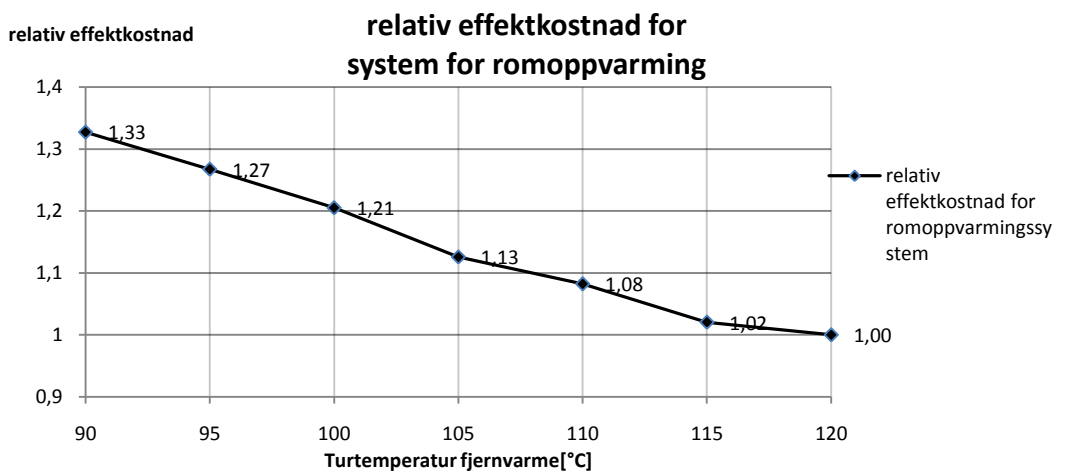
Relativ effektkostnad er den inverse av den relative effekten noe som kan sees i diagrammet over. Kostnadene blir høyere fordi mindre effekt skal leveres på et bestemt varmeanlegg og dermed en konstant investeringskostnad.

For bygget øker den relative effektkostnaden med 30 % med en turtemperaturreduksjon fra 120 - 90 °C. Dette er ikke overraskende siden mye av temperaturpotensialet reduseres. Endringen er omtrent lineær noe Figur 26 viser. For en reduksjon av turtemperaturen fra 120 – 105 °C øker verdien med ca. 12 %, og fra 105 – 90 °C med 18 %, noe som viser at temperaturreduksjonen fra 105 °C og ned til 90 °C endrer den relative effektkostnaden noe mer enn et lineært forhold tilsier.



### 6.3.2 Relativ effektkostnad for radiatorsystem

Relative effektkostnad for radiatorsystemet gjelder ikke for ventilasjon. Kostnaden knyttes da først og fremst til radiatorer og arealet av disse. Den relative effektkostnaden øker mer for romoppvarming enn for hele bygget, fordi kapasiteten til ventilasjonssystemet ikke påvirkes i like stor grad som radiatorsystem av en temperaturreduksjon.



Figur 27; relativ effektkostnad for romoppvarmingssystem(ChessWin)

Ovenfor vises utviklingen for effektkostnaden til romoppvarmingssystemet. Økningen i effektkostnad er omtrent lineær for turtemperaturer på fjernvarmen mellom 115 – 90 °C. Her øker effektkostnaden med 1,2 % / °C reduksjon i temperaturnivået på fjernvarmen.

Kostnaden for radiatorsystemet er først og fremst knyttet til arealet til radiatorflatene. Effektkostnaden kan omskrives fra forholdet til avgitt effekt fra radiator.

$$Q = U \cdot A \cdot LMTD^{1,33} \leftrightarrow \frac{A}{Q} = \frac{1}{U \cdot LMTD^{1,33}} = \textit{konstant} \quad [\text{kr/kW}]$$

Der: LMTD og U-verdi - Konstant for et gitt temperaturnivå

For å kunne sammenlikne med relevant litteratur brukes formelen over for konstant effektkostnad på et gitt temperaturnivå på radiatorsystemet. For et radiatorsystem er relativ effektkostnad konstant. Dette er en forenkling siden det er mer som knyttes til effektkostnaden. Det er små forskjeller i pris på ulike rørdiameter, slik at antakelsen holder.

Ved en effektøkning må arealet øke proporsjonalt for at forholdet skal være konstant.

Fra Figur 23 er temperaturnivået på radiatorsystemet 60/45 °C ved en turtemperatur på fjernvarmen på 90 °C. Ved å sammenlikne med priser for radiatorer på 60/45 °C system, (R.ulseth 2009) kan det vurderes om simuleringen er fornuftig. Der er investeringskostnadene bestemt i forhold til et 80/60 °C system, som i denne rapporten. Effekten er konstant mens arealet varieres, dvs. at investeringskostnaden varierer, mens avgitt effekt er konstant.

Det er interpolert mellom et temperaturnivå på radiatorene for 60/40 og 60/50. Da øker effektkostnaden et sted mellom 13 % og 28 %. Fra diagrammet over så øker effektkostnaden med 32 %. Dermed øker effektkostnadene relativt mye i simuleringene i forhold til prisutviklingen i virkeligheten.

### 6.3.3 Optimalt temperaturnivå på primær – og sekundærside

Det er nyttig med en forklaring på hva de neste simuleringene skal presentere. Simuleringene for endret lastfordeling mellom radiator- og ventilasjon behov og endret temperaturnivå på sekundærsiden skal undersøke hvordan endringer på sekundærsiden påvirker temperaturnivået på fjernvarmen. Dette for å undersøke problemstillingene;

- Nye energikrav for bygg vil redusere det optimale temperaturnivået i fjernvarme, grunnet relativt mindre behov for romoppvarming.
- Temperaturnivået på radiatorsystemet har stor innflytelse på temperaturnivået i fjernvarme.

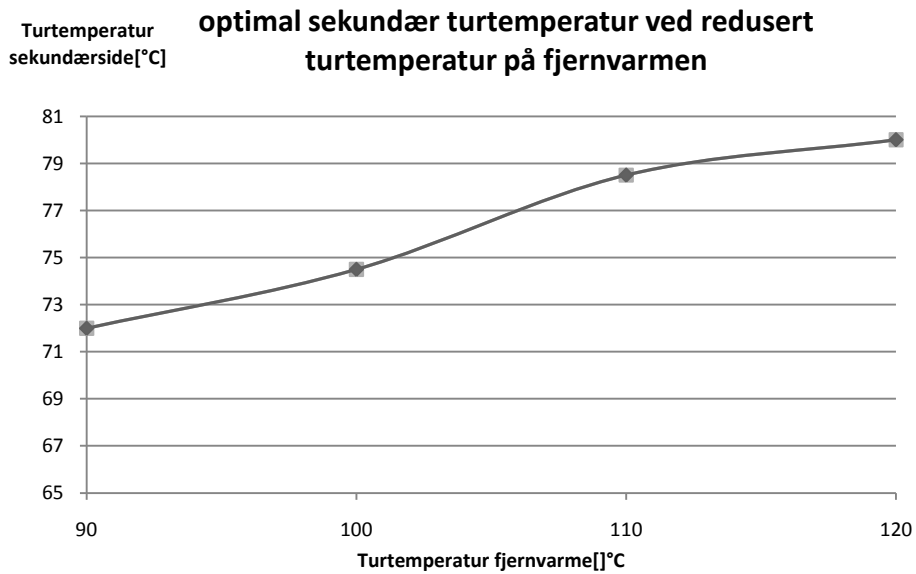
I tillegg er det generelle sammenhenger mellom temperaturnivå på primær- og sekundærside som presenteres her.

For abonnentsentralen finnes det optimale sammenhenger mellom temperaturnivået på primær- og sekundærsiden. Dette optimale forholdet avhenger av den avkjølingen primær- og sekundærsiden får med ulike sekundære temperaturnivå med en gitt turtemperatur på fjernvarmen. Disse optimale forholdene forandres mhp. sekundærsystemets dynamikk, som i stor grad avhenger av effekt på radiator- og ventilasjonssystemet samt temperaturnivået de opererer på. I denne delen er det utarbeidet ulike optimale sammenhenger for ulike parameterendringer, som endring av oppvarmingsbehov og endring av temperaturnivå på radiatorer.

Felles for disse er at det optimale temperaturnivået på sekundærside avtar med redusert turtemperatur på fjernvarmen. Det optimale temperaturnivå

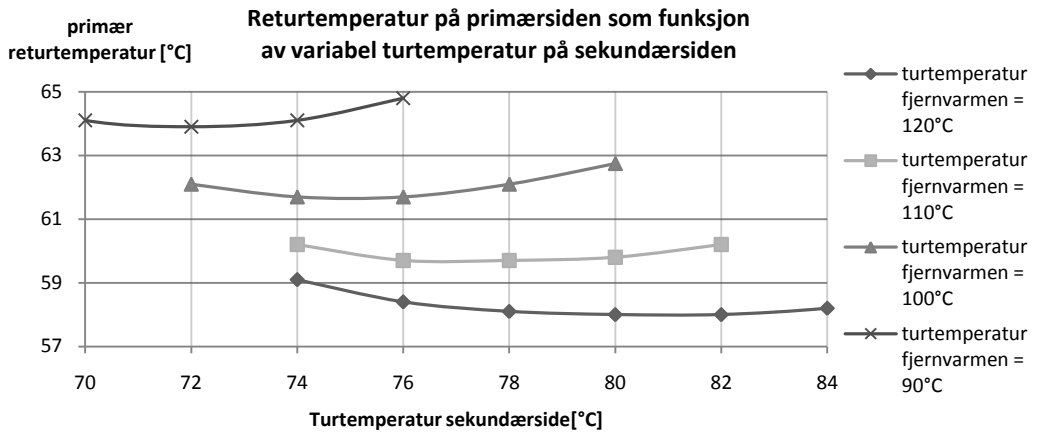
defineres som den turtemperaturen på sekundærsiden som gir lavest returtemperatur på fjernvarmen.

Diagrammet nedenfor viser den optimale sekundære turtemperaturen i forhold til turtemperatur på fjernvarmen. En sentral del av oppgaven blir å finne denne optimale sammenhengen for ulike simuleringsscenarioer.



Figur 28; optimal sekundær turtemperatur for redusert turtemperatur fjernvarme(ChessWin)

Målet er å identifisere bunnpunkt for returtemperaturen på primærsiden. Dette bunnpunktet markerer den optimale turtemperaturen på sekundærsiden. På denne måten kan det utarbeides optimale sammenhenger mellom returturtemperatur på primærsiden og turtemperatur på sekundærsiden.



Figur 29; sammenheng mellom temperaturnivå på primær og sekundærside. (ChessWin)

Diagrammet ovenfor viser sammenhengen mellom returtemperaturen til primærsiden og turtemperatur på sekundærside. Disse sammenhengene gjelder for alle varmebehov men de forskyves i forhold til relativt ventilasjonsbehov og temperaturnivået på radiatorsystemet. Disse diagrammene viser samme trend for de ulike simuleringene. Det er tydelig hvordan den optimale turtemperaturen på sekundærsiden reduseres ved lavere turtemperatur på fjernvarmen. Dette verifiserer at lavt sekundært temperaturnivå gir lavt primært temperaturnivå.

Minimumsverdien for returtemperaturen til fjernvarme for hvert temperaturnivå angir den temperaturen der fjernvarmen får størst avkjøling, og som også vil være den optimale. Alle diagrammene som følger er gjort mhp. det optimale forholdet mellom returtemperaturen på fjernvarmen og turtemperatur på sekundærsiden. Dette er gjort for 4 forskjellige turtemperaturer på fjernvarmen med intervall på 10 K. Dvs. 120, 110, 100 og 90 °C.

## **6.4 Simulering av endret effektbehov for rom – og ventilasjonsoppvarming**

### ***6.4.1.1 Målsetning for simulering***

Denne simuleringen undersøker betydningen av lastfordelingen (effekt) mellom romoppvarming og ventilasjon. Det interessante med denne simuleringen blir å finne ut hvordan nye forskrifter for bygningers energibruk påvirker temperaturdynamikken i abonnentsentralen.

For de nye kravene til bygningers energibruk vil effektbehovet endres både til romoppvarming og ventilasjon. Andelen av varmeeffekt som brukes til romoppvarming i forhold til oppvarming av ventilasjonsluft vil påvirke det optimale temperaturnivået. Dette er fordi temperaturnivået på varmebatteriet for ventilasjon og radiatorsystem er ulikt. Det er interessant i denne sammenheng å finne ut om endret forhold mellom disse oppvarmingspostene gir endret optimalt temperaturnivå på fjernvarmen.

Mye av dynamikken er vanskelig å forstå intuitivt uten teorigrunnlaget som støtte. Det er derfor viktig å sammenlikne simuleringsdataene med teoridelen (se avsnitt 5.2.3)

I denne rapporten er det valgt å sammenlikne kravene fra TEK 10 og passivhusstandarden med et referansebygg, som representerer et vanlig kontorbygg i dag med målte verdier på effektforbruk. Energistandardene for bygg gir følgende effektbehov for varme (Tabell 6). Hele tabellen finnes i vedlegg 6.

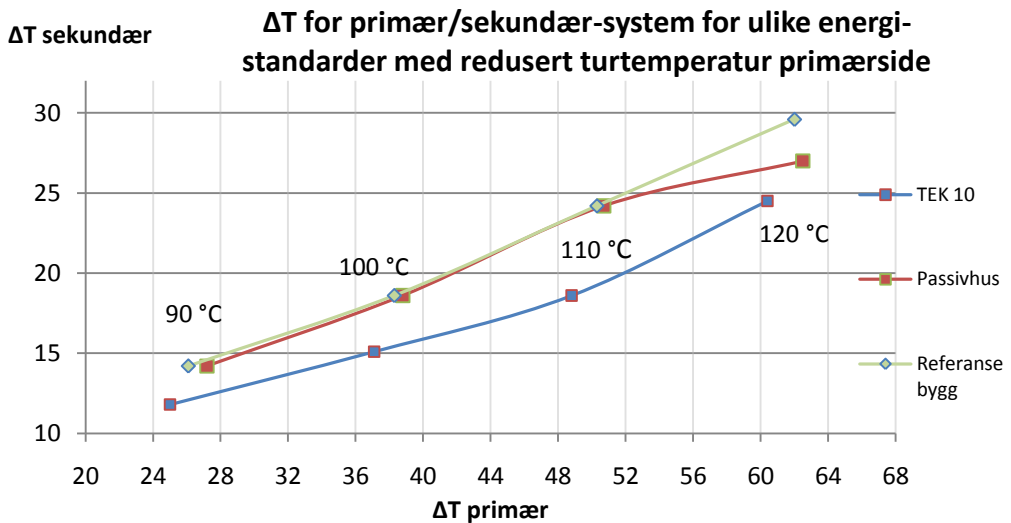
Tabell 6; effektbehov for rom - og ventilasjonsluftoppvarming.

Type energistandard:	Referansebygg	TEK 10	Passivhus
Oppvarmingsbehov uten Ventilasjon: [W/ m <sup>2</sup> ]	31,2	20,8	9,95
Ventilasjonsbehov: [W/ m <sup>2</sup> ]	30,55	11,725	10,05
Andel ventilasjon [Q <sub>vent</sub> /Q <sub>tot</sub> ]	0,495	0,36	0,5025

Ved simulering i ChessWin har det vært et mål å se på hvordan de ulike byggstandardene skiller når det gjelder avkjøling på primær- og sekundærside, returtemperatur på fjernvarmen. Og gi en forklaring ved hjelp av diagrammer på hvorfor resultatene blir som de blir.

### 6.4.1 Betydning for temperaturnivå på fjernvarmen

Nedenfor er det presentert forholdet mellom avkjølingen på primær- og sekundærsiden. Hvert datapunkt representerer en nedgang på turtemperaturen på fjernvarmen med 10 K, med startverdi på 120 °C øverst til høyre, og laveste verdi på 90 °C nederst til venstre.



Figur 30; delta T for primær- og sekundærside med redusert turtemperaturnivå på fjernvarmen

Ved reduksjon av temperaturnivået på fjernvarmen avtar avkjølingen mye både på primær- og sekundærside. Dette henger sammen med den økte massestrømmen som er nødvendig for å levere en stor nok effekt ved lavere temperatur.

På primærsiden avtar nedkjølingen hhv. fra 60 til 25 K for TEK 10 og 62 til 26-27 K for referansebygg og passivhusstandarden ved å senke turtemperaturen på fjernvarmen fra 120 – 90 °C. Dette er mer enn en halvering av nedkjølingen på primærsiden, noe som fører til at massestrømmen øker tilsvarende. Ved en turtemperatur på 90 °C er massestrømmen det dobbelte av det den er ved en turtemperatur på 120 °C.



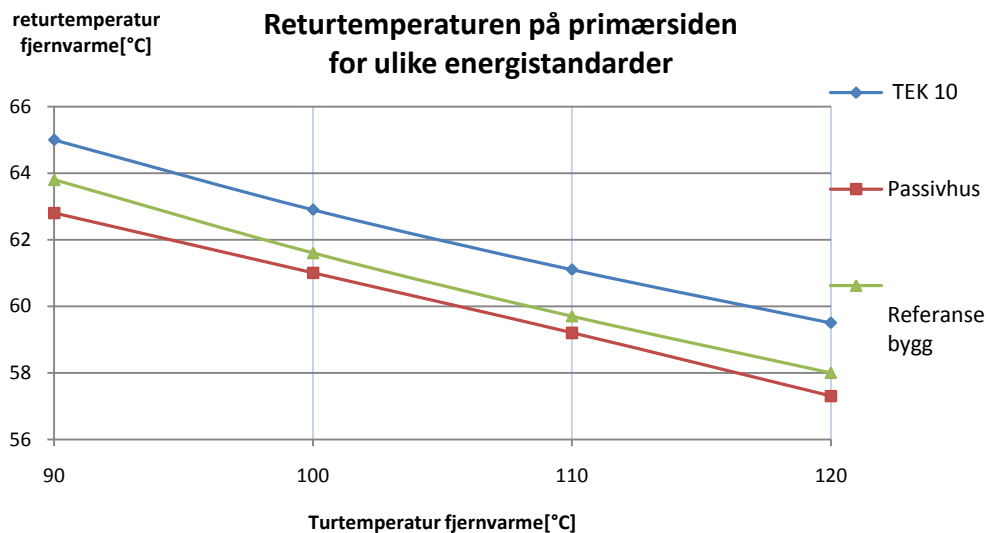
På sekundærsiden avtar nedkjølingen mye også. For TEK 10 vil avkjølingen reduseres fra 24,5 til 11,5 For Passivhusstandarden og referansebygget reduseres avkjølingen hhv. fra 29 til 13 K og fra 27 til 14 K i tilsvarende temperaturintervall. Den prosentvise nedgangen i nedkjøling på primær- og sekundærside er omtrent lik.

Ved 10 K redusert turtemperatur på fjernvarmen, avtar avkjølingen i snitt med 11,8 K. Dette tilsier at returtemperaturen også øker med redusert turtemperatur på fjernvarmen.

#### 6.4.1.1 Avkjølingen påvirker returtemperaturen på fjernvarmen

Ved å trekke fra 10 K på den gjennomsnittlige avkjølingen så vil returtemperaturen øke med 1,8 K for hver 10 K senkning av turtemperaturen.

Nedenfor er det fremstilt returtemperaturen på primærsiden for optimal  $\Delta T$  på primærsiden(Figur 29)



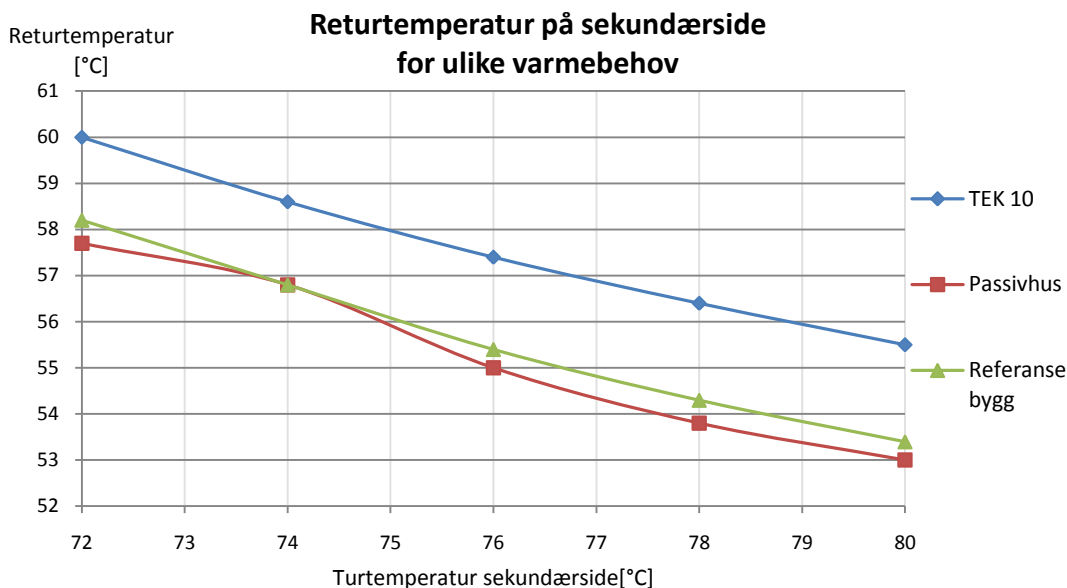
Figur 31; minste returtemperatur på fjernvarmen med ulike varmebehov(ChessWin)

Det er tydelig at returtemperaturen er økende for redusert turtemperatur på fjernvarmen. Dette tilsier at for å oppnå en lav returtemperatur på fjernvarmen så er det ideelt med en høy turtemperatur. Ut ifra diagrammet så øker returtemperaturen for fjernvarme med ca 2 °C for hver 10 °C redusert turtemperatur på fjernvarmen. Dette tilsvarer 0,2 økende returtemperatur/ °C redusert turtemperatur på fjernvarmen.

Diagrammet viser tydelig at passivhuskravene gir en noe lavere returtemperatur på fjernvarmen enn for eksempel kravene i TEK 10. Dette er ventet siden passivhus har en høy andel ventilasjonsluftoppvarming(ca. 50 %). Differansen mellom disse er på rundt 2 °C i hele temperaturspekteret til fjernvarmen. Returtemperaturene er omtrent like for referansebygget og passivhuset. Dette kan forklares med at de har omtrent samme andel ventilasjonsluftoppvarming.

#### ***6.4.1.2 Betydningen av returtemperatur sekundærside***

Nedenfor kan returtemperaturen på sekundærsiden sammenliknes for de ulike varmebehovene. Fra diagrammet er det tydelig at returtemperaturen fra oppvarmingssystemet er høyere for et sekundært system med en lavere andel ventilasjonsluftoppvarming(jf. Tabell 8), i dette tilfellet for TEK 10.



Figur 32; returtemperatur fra oppvarmingssystem for ulike varmebehov(ChessWin)

Dette er ikke overraskende gitt forskjellen i returtemperatur fra radiator – og ventilasjonssystem(jf. Figur 34)

Det er tydelig at differansen i returtemperatur er identiske for det sekundære og primære system(se Figur 31). Dette indikerer at temperaturnivået på fjernvarmen blir påvirket direkte av endringer i temperaturnivå på sekundærsiden. I tillegg er det en proporsjonalitet mellom differansen i returtemperatur for ulike energistandarder på sekundær – og primærsystem.

En lav retur på sekundærsiden vil ofte gjøre at returen fra fjernvarmen også blir lavere, dette fordi LMTD til varmevekslere ofte har en fast verdi på  $\theta_2$ (jf. 5.2.3)

## 6.4.2 Forklaring av optimale temperaturnivå for de nye energistandardene?

### 6.4.2.1 Effektfordeling mellom rom-og ventilasjonsoppvarming

For energikravene fra de ulike tekniske byggstandardene er forholdet mellom effektbehovet til ventilasjons - og romoppvarming slik;

$$\frac{Q_{\text{ventilasjon}}}{(Q_{\text{radiatorer}} + Q_{\text{ventilasjon}})} \quad \text{Formel34;} \quad \text{Andel ventilasjonsoppvarming}$$

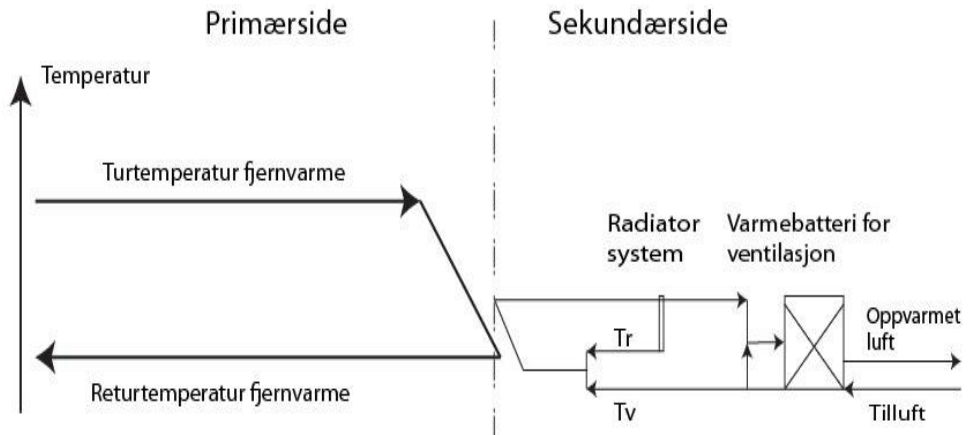
Dette forholdet er den nederste linjen i Tabell 6, og er viktig for å forstå virkningen av endret effektforhold mellom rom- og ventilasjonsoppvarming.

Typisk er returtemperaturen lavere fra ventilasjonssystemet enn radiatorsystemet. Returtemperaturen fra hele oppvarmingssystemet blir et sted i mellom disse avhengig av massestrømmen til de 2 grenstrømmene.

$$T_{\text{sek,retur}} = \frac{(\dot{m}_{\text{retur rad}} \cdot T_{\text{retur rad}} + \dot{m}_{\text{retur vent}} \cdot T_{\text{retur,vent}})}{2 \cdot \dot{m}_{\text{sek}}}$$

Formel35; Returtemperatur sekundærside

Massestrømmen er bestemt av varmeeffekten til radiator og ventilasjonssystem(formel 19 & 20). Hvordan temperaturforløpet utvikler seg i abonnentsentralen presiseres med en skisse. Her er vist temperaturforløpet gjennom en abonnentsentral. Merk at returtemperaturen til sekundærsiden er bestemt av oppvarmingseffekten som bidrar til oppvarming av ventilasjonsluft i forhold til romoppvarming.



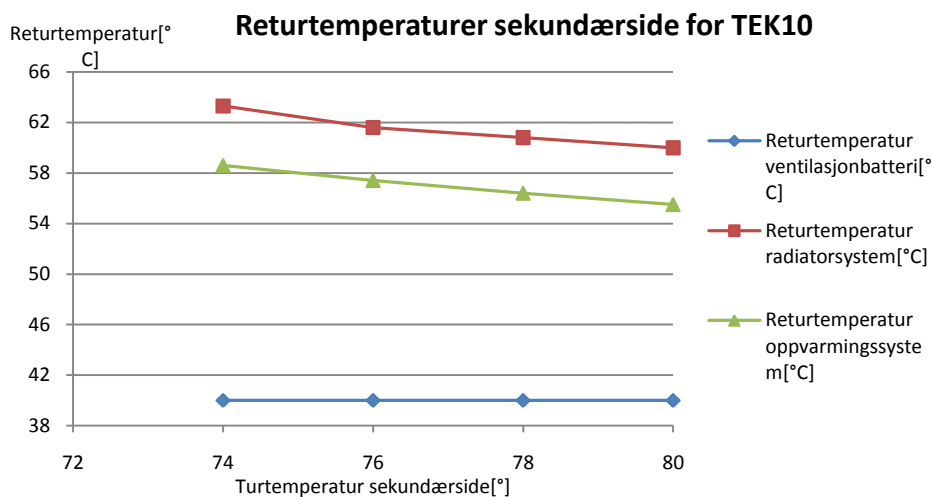
Figur 33; temperaturforløp i en abonnentsentral med temperaturer på primærside til venstre;

Fra skissen fremgår det at returtemperaturen er lavere fra ventilasjonssystemet enn radiatorsystemet. Avkjølingen er større for den grenstrømmen som leverer varme til varmebatteriet for ventilasjonsoppvarming enn grenstrømmen til radiatorsystemet. Varmebatteriet for ventilasjon har ofte en utnyttelse av returen fra varmebatteriet slik at massestrømmen inn til denne reduseres. Returtemperaturen til grenstrømmene vil blandes sammen til en felles returtemperatur som er bestemt av formel 28.

#### 6.4.2.2 Temperaturdynamikk sekundærside

Det er foretatt systematiske simuleringer for å danne diagrammer for optimale sammenhenger mellom temperaturnivå på sekundær - og fjernvarmeside.

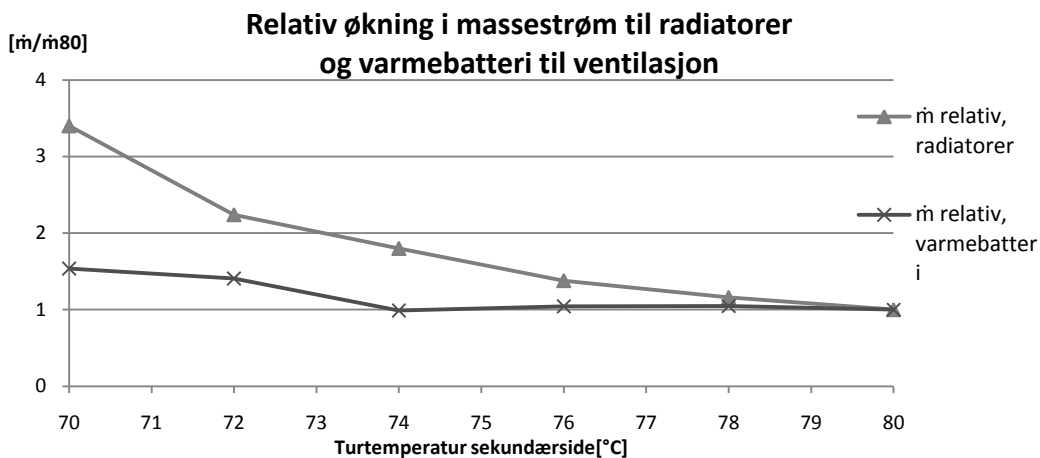
Returtemperaturen på sekundærsiden er lik for ulike varmebehov gitt av energistandardene, fordi flatene for varme- overføring og avgivelse er dimensjonert proporsjonalt med effektbehovet. Gjennom hele simuleringen er det en konstant effekt på både rom- og ventilasjonsluftoppvarming.



Figur 34; returtemperaturer på sekundærside for TEK 10(ChessWin)

I diagrammet over er det bare returen fra radiator systemet som øker ved redusert sekundær turtemperatur. Varmebatteriet for ventilasjon har en konstant returtemperatur. Det interessante er at returtemperaturen til oppvarmingssystemet øker mer enn returtemperaturen til radiator systemet.

Det er tydelig er at returtemperaturen på sekundærsiden ligger nærmere returtemperaturen fra radiator systemet for lave sekundære turtemperaturer. Dette skjer selv om levert effekt til disse er konstant for alle temperaturer. Grunnen til at returtemperaturen på sekundærsiden er tettere returen til radiator systemet for lavere temperaturer på sekundærsiden enn høye, er at massestrømmen øker mye til radiator systemet. Dette gjør at temperaturen blir mer og mer påvirket av radiator systemet(jf. Formel 28)



Figur 35; endring av massestrøm på sekundærside ved redusert temperaturnivå (ChessWin)

Massestrømmen som forsyner radiatorsystemet øker med 350 % mens massestrømmen som forsyner varmebatteriet øker med 50 %. Dette er for en turtemperatur på 70 °C i forhold til massestrømmene ( $\dot{m}_{80}$ ) ved en turtemperatur på fjernvarmen på 80 °C. Dette gjør at avkjølingen på radiatorsystemet blir mer dominerende for returtemperaturen fra oppvarmingssystemet ved reduksjon turtemperaturen på sekundærsiden.

Avkjølingen over varmebatteriet for ventilasjon er relativt mindre viktig enn avkjølingen over radiatorsystemet fordi massestrømmen alltid er mindre.

Grunnene til at massestrømmen til varmebatteriet ikke øker tilsvarende som for radiatorsystemet er at konfigurasjonen er annerledes. I varmebatteri for ventilasjon er det vanlig å blande vann fra returen med vann fra turledningen slik at vannet inn på varmebatteriet blir lavere enn turtemperaturen på sekundærsiden. Dette er for å utnytte den potensielle temperaturpotensialet bedre.

## 6.5 Simulering av lavere temperaturnivå på radiatorsystemet

Denne simuleringen behandler radiatorsystemets temperaturnivå, med fokus på hvilken effekt en reduksjon av temperaturnivået på fjernvarmen har på det optimale temperaturnivå. Her simuleres forskjellene mellom et tradisjonelt 80/60 °C sekundært temperaturnivå og et på 70/55 °C, begge med effektbehovene fra TEK 10(jf. Vedlegg 7).

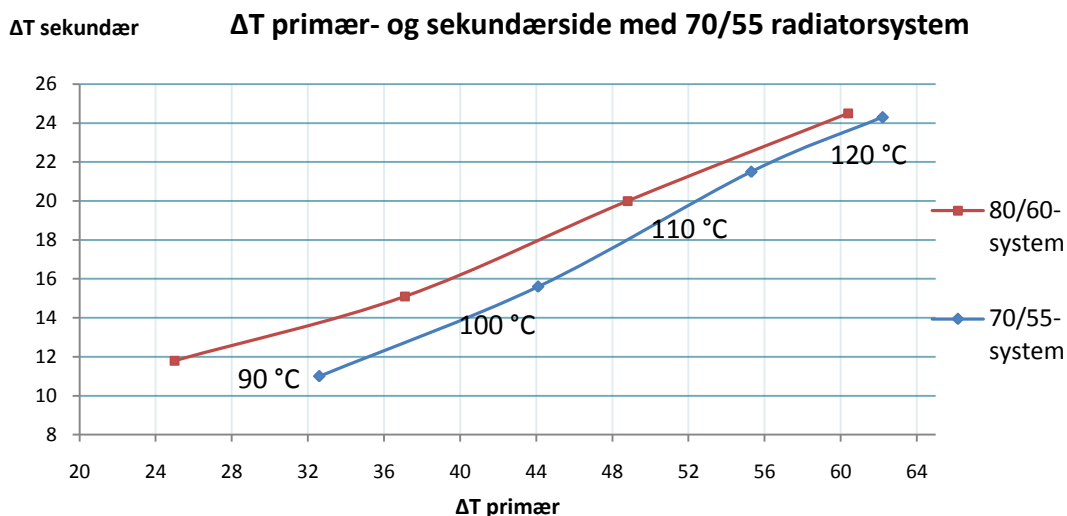
Det er fra et teoretisk standpunkt ideelt å operere med et lavt temperaturnivå på sekundærsiden for at returtemperaturen på fjernvarmen skal bli lav(jf.). Derfor er det i denne rapporten sammenliknet det tradisjonelle 80/60 temperaturnivået med et 70/55 temperaturnivå på sekundærsiden. Målet ved dette er å se hvordan temperaturnivået på sekundærsiden påvirker avkjølingen på fjernvarmen.

Særlig er det middeltemperaturdifferansen i varmeveksleren for oppvarmingssystemet som endres ved lavere sekundært temperaturnivå. Den øker pga. senket temperaturnivå sekundærsiden, og da det er mulig å redusere temperaturdifferansen på varmevekslerens utløp(jf.  $\theta_2$  i Figur 19). Det gjøres ved å redusere massestrømmen inn på fjernvarmen, noe som resulterer i en større avkjøling.

I teoridelen er det belyst hvor viktig det er med en stor temperaturdifferanse på varmevekslerens innløp for at fjernvarmens massestrøm kan holdes lav. Derfor vil differansen på primær - og sekundærsystemets turtemperatur være sentral. Ved å redusere turtemperaturen på sekundærsiden fra 80 °C til 70 °C vil denne differansen øke. Dette er hovedforklaringen på at simuleringene for



redusert temperaturnivå i radiatorsystemet gir en lavere returtemperatur på fjernvarmen.



Figur 36;  $\Delta T$  på primær- og sekundærside for redusert turtemperatur(markert)på fjernvarmen

Ovenfor er det sammenliknet et oppvarmingssystem med lav- og høytemperatur radiatorsystem. Sammenlikningen er gjort for en turtemperatur på fjernvarmen på 120, 110, 100 og 90 °C.

Ved å redusere temperaturnivået på sekundærsiden vil som nevnt temperaturdifferansen på varmevekslerens varmside øke, noe som gjør at temperaturdifferansen på kaldsiden av varmeveksleren kan reduseres for konstant middeltemperaturdifferanse i varmeveksleren for oppvarmingssystemet.

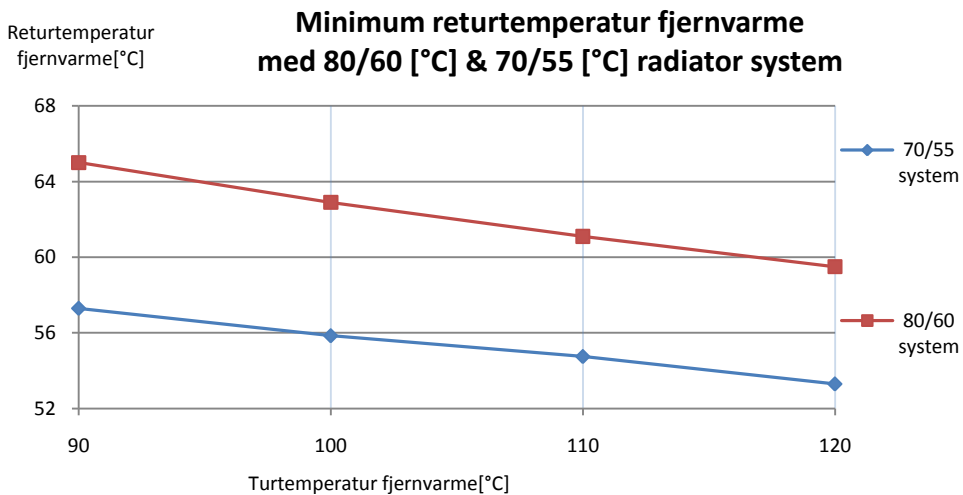
Ved redusert temperaturdifferanse på kaldsiden av varmeveksleren så økes avkjølingen av fjernvarmen, noe som er svært viktig. Dette kan observeres over. For 120 °C har 70/55- systemet en primær avkjøling på 62 K, mens 80/60- systemet har en avkjøling på 60,2 K. Differansen er på 1,8 K. For 90 °C har 70/55- systemet en primær avkjøling på 32,5 K, mens 80/60- systemet

har en avkjøling på 25 K. Differansen er da på 7,5 K. Ved lave turtemperaturer på fjernvarmen vil 70/55- systemet få mye høyere avkjøling, og dermed lavere returtemperatur på fjernvarmen. Dette er en fordel med tanke på muligheten for å redusere temperaturnivået i fjernvarme.

På sekundærsiden er forskjellen i avkjølingen mindre for lav- og høytemperatur radiatorsystem. Dette kan forklares ut ifra at temperaturdifferansen er mindre sekundærsiden med 70/55-radiatorsystemet i utgangspunktet.

### 6.5.1.1 Returtemperatur på fjernvarmen

Nedenfor er et diagram av utviklingen av fjernvarmens returtemperatur med redusert turtemperatur på fjernvarmen.



Figur 37; Returtemperatur på fjernvarme ved turtemperaturreduksjon(ChessWin)

For 80/60- systemet er differansen på returtemperaturen til fjernvarmen 6 K for en reduisering av fjernvarmetemperaturen fra 120-90 °C. Tilsvarende er denne differansen 4 K for 70/55- systemet. Dette vil si at et lavtemperaturnivå

på radiatorsystemet er mindre følsomt for et redusert temperaturnivå på fjernvarmen.

Det er også en begrensning på hvor lave massestrøm radiatorene tolererer slik at massestrømmen er lik for et 70/55-system og et 80/60 system. Det henger sammen med tilsmussing av innvendige flater fordi partikler i vannet avleires ved lave hastigheter, og tetter radiatorer og reguleringsventiler.(Wollarstrand 1997)

Ved en turtemperatur på fjernvarmen på 120 °C så er det en differanse i minimums returtemperatur fjernvarme på 6,2 K mens det ved en turtemperatur på fjernvarmen på 90 °C er en temperaturdifferanse på 7,7 K. Forskjellen er betydelig og viser at valg av sekundær turtemperatur er svært viktig for returtemperaturen til fjernvarmen. At returtemperaturen på fjernvarmen reduseres mer enn 5 K er verdt å merke seg, siden differansen på den sekundære returen til de 2 temperaturnivåene er bare 5 K(60-55 °C). Derfor kan det slås fast at temperaturdifferansen på kaldsiden til varmeveksleren( $\theta_2$ ) reduseres.(jf.Figur 19). Dette kommer av at massestrømmen til fjernvarmen kan reduseres når temperaturdifferansen på varmevekslerens varmside( $\theta_1$ ) økes. Dette samsvarer med varmevekslerteorien som er presentert.(jf. 5.2.2.1)

En hovedforklaring er at avkjølingen på sekundærsiden påvirkes i større grad av radiatorsystemet enn av ventilasjonssystemet, og at effektbehovet til radiatorsystemet er høyere enn for ventilasjonssystemet.

# 7 Oppsummering

---

## 7.1.1 Usikkerhetsanalyse

I følge teori knyttet til varmeavgivelse til radiatorer så gjelder følgende formel;

$$Q = U \cdot A \cdot LMTD^{1,33} \quad \text{Formel 36; avgitt varme radiator}$$

Derimot er verdiene som er hentet ut ifra ChessWin, og som er grunnlaget for diagrammene for varmekapasitet ikke kalibrert i forhold til denne formelen. Derfor vil kapasiteten for varmeleveranse fra radiatorsystemet være høyere ved lavere turtemperaturer for fjernvarme, enn den ville blitt med denne formelen. Kapasiteten for radiatorsystemet må derfor nedjusteres noe i forhold til de verdiene som er fremstilt.

Det er ikke mulig å dimensjonere systemet helt proporsjonalt i forhold til effekthovet i simuleringen av de ulike energistandardene for bygg. Dette er fordi antall plater i varmeveksler i ChessWin må være heltall.

Varmebatteriet for ventilasjonsluftpoppvarming benytter ikke identisk turtemperatur for ulike energikrav for bygg. Innstillingen er slik at returen blir 40 °C uansett, men siden det er små variasjoner på turtemperaturen påvirker dette massestrømmen noe.

Det er benyttet ulike reguleringsventiler som er korrigert i forhold til den massestrømmen som er nødvendig i simuleringene av det optimale temperaturnivået. Det kan derfor være at simuleringene gir data i områder som er utenfor en spesifikk reguleringsventils rekkevidde. Grunnen til at det er gjort på denne måten er for å finne temperaturdynamikken i et stort spenn av massestrømmer. Det er også mulig at massestrømmene på sekundærsiden er høyere enn det som er tillatt for rør.

## 7.1.2 Diskusjon

### *7.1.2.1 Et lavere temperaturnivå vil redusere kostnadene ved produksjon av fjernvarme*

I produksjon av varme til fjernvarme vil temperaturnivået påvirke ytelsen til de ulike varmeproduserende enhetene. Ulike varmeproduserende enheter har ulike karakteristikk som gjør at temperaturnivået påvirker ytelsen i ulik grad.

Det er vist at for varmepumper vil produksjonskostnadene reduseres betydelig for lavere turtemperatur (jf. Figur 15), slik at ved valg av varmepumpe som grunnlast må temperaturnivået vurderes nøye. I forbrenningsanlegg med bruk av fuktige brensel som enkelte typer avfall, fuktig flis og bark vil det være mulig å benytte røykgasskondensering for å øke effektiviteten til anlegget. Da vil en reduksjon av returtemperaturen øke effektiviteten mye. Disse anleggene har billige brenselkostnader slik at virkningsgraden har relativt mindre å si for lønnsomheten av temperaturreduksjon, samtidig leverer de ofte så store energimengder at det kan bli store summer ut av en noe redusert varmeproduksjonskostnad.

For spillvarme vil ytelsen påvirkes mye av en redusert returtemperatur, mens denne har en øvre temperaturbegrensning som varmepumpen har. For kombinert varme- og kraftproduksjon er det åpenbart en fordel å redusere returtemperaturen for å kunne øke elektrisitetsutnyttelsen i anlegget.

Det som er en hovedutfordring er å knytte bedre ytelse opp imot økt økonomisk gevinst. Økonomisk gevinst er avhengig av effektivitetsøkning og kostnad for varmeproduksjonen som effektivitetsøkningen erstatter. Ved lav produksjonskostnad vil bedret effektivitet være relativt mindre viktig enn for høy produksjonskostnad.

For varmeproducenter i fjernvarme vil dette innebære at gevinsten er størst ved turtemperatursenkning for varmepumper med høy elektrisitetskostnad, mens den er mindre for returtemperatursenkning til spillvarme og røykgasskondensering. Dette kommer av billig energi fra flis, bark og spillvarme. For avfall er kostnaden enda lavere.

At kapasitetskostnaden kan øke mye ved redusert temperaturnivå er vist av Volla(Volla 1994), men dette er ikke vurdert i dybden i denne rapporten.

### ***7.1.2.2 Kapasiteten og effektkostnadene vil endres ved lavere temperaturnivå på fjernvarmen***

Ved et redusert behov for romoppvarming er det mulig å senke turtemperaturen på primærsiden. Kapasiteten til radiatorsystemet reduseres ved redusert turtemperatur på sekundærsiden(jf. 6.2.1) som er et resultat av redusert temperaturnivå på primærsiden. Problemet med dette er at kapasiteten til varmebatteriet for luftoppvarming også reduseres. For å opprettholde kapasiteten må størrelsen på varmebatteriet øke, eller varmegjenvinneren må øke varmegjenvinningsgraden.

Fra simuleringer er det vist at ved å øke varmegjenvinningsgraden fra 65 – 75, % så vil et uendret varmebatteri sammen med forbedret varmegjenvinner oppnå konstant kapasitet(jf. 6.2.1.7), ved en senkning av turtemperaturen på primærsiden fra 120 – 90 °C. Dette er et inngrep som ikke koster mer i investering grunnet minimal forskjell i investeringskostnad på varmegjenvinnere med 65 og 75 % gjenvinningsgrad.

Ved å redusere turtemperaturen fra 120- 90 °C så vil den relative effektkostnaden for et bygg øke med 30 % (jf. 6.3.1). For radiatorsystemet alene er den tilsvarende økningen på 33 % (jf. 6.3.2), noe som er noe høyere enn forventet i forhold til litteratur på området.

At effektkostnadene øker for redusert temperaturnivå, gjør at utbyggere må vurdere en fordel av å installere dyrere vannbårent system. Det kan også være regelverk fra bla. fjernvarmeselskapet om en viss avkjøling på sekundærsiden.

### ***7.1.2.3 Nye energikrav for bygg vil redusere det optimale temperaturnivået i fjernvarme***

Fra simuleringene er det vist at temperaturnivået på sekundærsiden i liten grad påvirkes av de nye kravene til energibruk. Faktisk så skjerpes kravene til ventilasjon like mye eller mer enn varmetap fra bygg, noe som fører til at det relative forholdet mellom effektbehov til ventilasjon og radiatorsystem ikke endres mye.

Det som er tydelig er at kravene til passivhus og referansebygget gir en noe bedre avkjøling på primær- og sekundærsiden enn det kravene i TEK 10 gjør. Dette gjør at returtemperaturen også blir lavere. Med passivhusstandarden kan temperaturnivået på primærsiden reduseres noe i forhold til TEK 10. For hele temperaturintervallet på primærsiden er returtemperaturen på fjernvarmen 2 K lavere for passivhusstandarden enn for kravene fra TEK 10. Dette kan tyde på at strengere krav til varmetap enn det som er krav i TEK 10, gir muligheter for et noe lavere temperaturnivå på fjernvarmen.

Fra teorien (jf.  $Q_{\text{ventilasjon}} / (Q_{\text{radiatorer}} + Q_{\text{ventilasjon}})$  Formel34) er det vist at konfigurasjonene i abonnentsentralen gjør at avkjølingen over ventilasjonssystemet er mindre avgjørende enn radiatorsystemet for avkjølingen på sekundærsiden. Dette gjør at forholdet mellom ventilasjon- og romopvarmingseffekt i de ulike energistandardene, har mindre å si enn effektbehovet tilsier.

#### ***7.1.2.4 Temperaturnivået på radiatorsystemet har stor innflytelse på temperaturnivået i fjernvarme.***

Denne antakelsen var riktig. Ikke overraskende er temperaturnivået på radiatorsystemet svært viktig for avkjølingen på fjernvarmen. En hovedforklaring er at avkjølingen på sekundærsiden påvirkes i større grad av radiatorsystemet enn av ventilasjonssystemet(jf. 6.4.2.2), og at effektbehovet til radiatorsystemet er høyere enn for ventilasjonssystemet. Dette er vist gjennom teori og forklaring til simuleringer.

Ved høye turtemperaturer på primærsiden så påvirkes ikke returtemperaturen like mye av ulikt temperaturnivå på radiatorsystemet, som ved lavere turtemperaturer. Dette tilsier at ved redusert temperaturnivå på fjernvarmen, vil det være relativt viktigere med et lavere temperaturnivå på radiatorsystemet. Dette samsvarer godt med teorien for redusert temperaturnivå på sekundærsiden(jf. 5.2.3.4)

Lavere returtemperatur betyr god avkjøling på primærsiden, og gir en bedre utnyttelse av dyre ledningsnett til fjernvarme(jf. 6.5.1.1), samt bedre utnyttelse av de varmeproduserende enhetene. Men større varmeflater som er nødvendig for lavere temperaturnivå er dyrere å installere, noe som gjør at noen utbyggere vegrer seg for å installere i disse.



### 7.1.3 Konklusjon

Kapasiteten til fjernvarmen reduseres omtrent lineært ved redusert turtemperatur, med en endringsrate på 1 % redusert kapasitet per grad celsius redusert turtemperatur, for både bygget som helhet og radiatorsystemet alene.

Problemet med å opprettholde en konstant kapasitet til varmebatteriet for oppvarming av ventilasjonsluft, kan løses ved å øke virkningsgraden til varmegjenvinneren med 5 -10 % avhengig av om turtemperaturen på primærsiden reduseres med hhv. 15 eller 30 K.

De relative effektkostnadene øker like mye som kapasiteten reduseres, dvs. øker med 1 % per Celsius redusert turtemperatur på primærsiden.

Effektbehovet som er forventet med de nye byggstandardene vil ikke påvirke det optimale temperaturnivået i fjernvarme mye. Det som er tydelig er at en større andel effekt til ventilasjon kontra romoppvarming virker reduserende på returtemperaturen til primærsiden. Returtemperaturen på primærsiden reduseres med 2 K med kravene fra passivhusstandarden i forhold til TEK 10 på turtemperaturer på fjernvarmen mellom 90 – 120 °C.

Et lavere temperaturnivå på sekundærsiden gir lavere returtemperaturer på primærsiden, og er mindre følsomt for et redusert temperaturnivå på fjernvarmen. Avkjølingen på primærsiden er også mye høyere for lavere temperaturnivå

Fjernvarmesystemer har ulike varmekilder med ulike driftskarakteristikker. Noen er avhengig av lav retur og andre av lav turtemperatur. Ved fastsettelse av det optimale temperaturnivået er det naturlig å bestemme et

temperaturnivå som er gunstig for varmekilder av betydning i et gitt fjernvarmesystem.

Med varmepumper som grunnlastkilde vil det være en stor gevinst på å redusere turtemperaturen. For forbrenningsanlegg som benytter seg av røykgasskondensering vil også energiutbyttet øke med lavere returtemperatur, noe som reduserer brenselkostnadene, slik at varmeproduksjonskostnaden reduseres. Gevinsten er mindre enn for varmepumpe men allikevel betydelig og har et stort potensial gitt de store varmemengdene som produseres fra slike anlegg. Med spillvarme som varmekilde vil det også være lønnsomt å redusere returtemperaturen.

Massestrømmen øker noe ved reduksjon av turtemperaturen på fjernvarme noe som gjør at avkjølingen på fjernvarme blir dårligere. Dette påvirker pumpekostnader, kapasiteten og andelen varmetap fra nettet negativt.

Det er mye å tjene på å begrense temperaturnivået i fjernvarme gitt at det benyttes varmekildene som er nevnt over. Det tyder ikke på at skjerpede krav til bygg vil redusere det optimale temperaturnivået på sekundær – eller primærside før enda strengere krav til bygningers energibruk eventuelt innføres med passivhusstandarden. Det som er mulig og som burde være en mer prioritert oppgave er å sørge for lavere sekundære temperaturnivå. Der er potensialet størst når det gjelder å redusere temperaturnivået i fjernvarmesystem.

Det er mulig å redusere energibruken til varmeproduksjon ved å legge bedre til rette for at varmeprodusentene produserer varme mer effektivt enn i dag. Temperaturnivået må reduseres for å oppnå dette. Det er også vist at temperaturnivået kan reduseres uten at dette får store følger, verken for kostnader eller driftsmessige årsaker.



## 8 Kilder

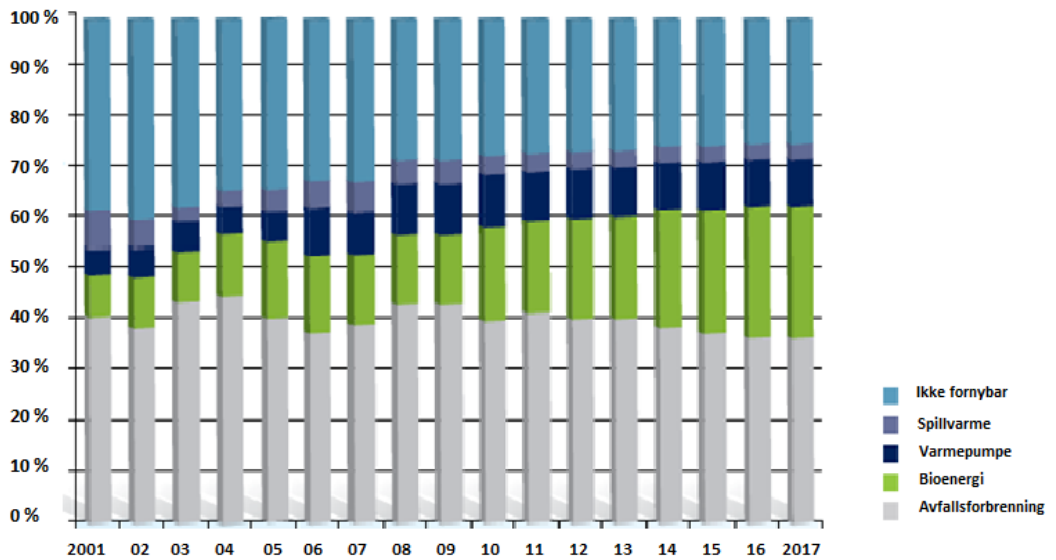
---

1. Axby F., G. J. O. (2000). Studie av rök-gaskondensering för bi-bränsleeldade kraftvärmeanläggningar, Värmeforsk.
- BE(Statensbyggtkniskeetat) (2004). "Nye krav til bygningers energibehov Supplerende konsekvensvurderinger og alternative prinsipper for fastsettelse av rammekrav til energibehov."
- Bioen, a. (2010) "Kostnader for fjernvarmeutbygging."
- Cengel, Y. A. (2007). Heat and mass transfer, a practical approach, Suzanne Jeans.
- Energimyndigheten. (2011). "Fjärrvärme." from <http://www.energimyndigheten.se/sv/Hushall/Din-uppvarmning/Fjarrvarme/>.
- ENOVA (2010). "Enovas varmerapport 2001-2009." 3.
- ENOVA SF, M. F., S. Klokk (2003) "varmestudien 2003."
- ENOVA SF, N., Norsk energi (2009) "Potensialstudie for utnyttelse av spillvarme fra norsk energi."
- fornybar.no. (2011). "Hva er passivhus." from [http://passiv.no/hva\\_er\\_passivhus](http://passiv.no/hva_er_passivhus).
- Frederiksen S., W. S. (1993). fjärrvärme, teori, teknik och funktion, Studentlitteratur.
- Grimi C., M. H. M., Sartori I., med fler (2009) "LECO- Energibruk i fem kontorbygg i Norge, prosjektrapport 48."
- HafslundFjernvarme. (2009). "Driftsinstruks for kundesentraler tilkoblet Hafslund Fjernvarmes nett." from [http://www.hafslund.no/files/file/om\\_hafslund/leverandor/fjernvarme/DRIFTSINSTRUKS\\_KUNDESENTRALER.pdf](http://www.hafslund.no/files/file/om_hafslund/leverandor/fjernvarme/DRIFTSINSTRUKS_KUNDESENTRALER.pdf).
- HafslundFjernvarme (2009) "Hafslund Fjernvarme Bestemmelser om tilknytning til fjernvarmeanlegget."
- Lauenburg, P. (2009) "Förbättrad teknik för fjärrvärme till byggnader med vattenburna värmesystem, rapport 2012:2."
- NordPool. (2011). "nord pool spot, daily." from <http://www.nordpoolspot.com/reports/areaprice/>.
- NorskStandard (2007) "NS 3031:2007 Beregning av bygningers energiytelse, Metode og data."
- Norskstandard (2010). "Endringsblad A1 Beregning av bygningers energiytelse, Metode og data."
- NOU, N. o. u. (1998: 11). "Energi- og kraftbalansen mot 2020." from <http://www.regjeringen.no/nb/dep/oed/dok/NOU-er/1998/NOU-1998-11.html?id=141308>.
- NVE (2007.1). "Kostnader ved produksjon av kraft og varme."

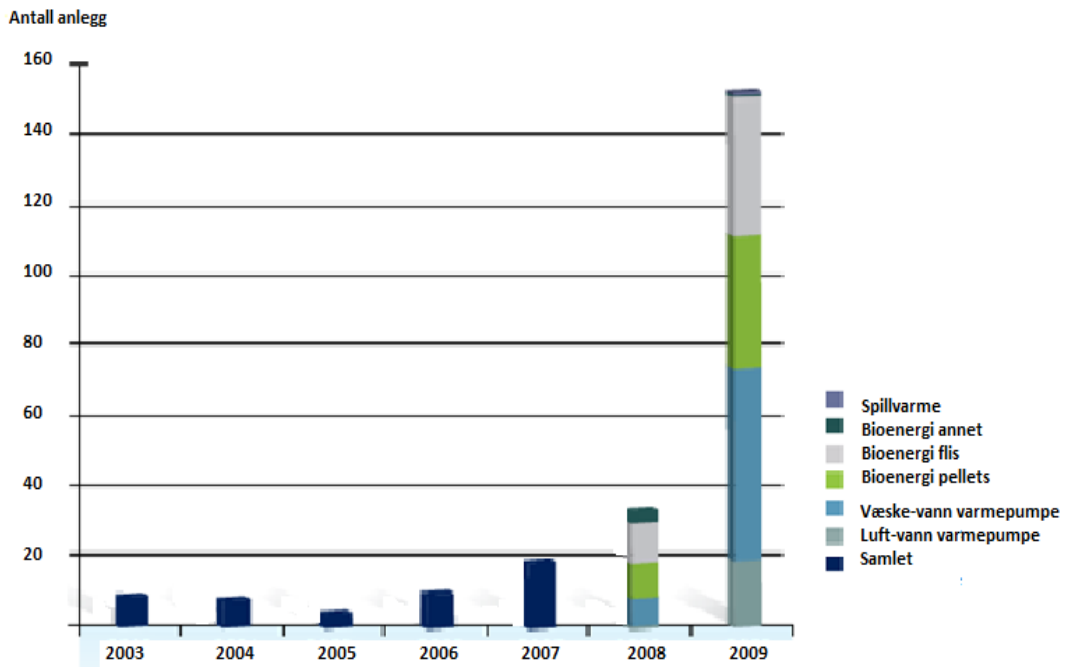
- NVE. (2009). "Energy in Norway." from <http://www.nve.no/global/energi/analyser/energi%20i%20norge%20older/energy%20in%20norway%202009%20edition.pdf>.
- NVE. (2011). "nettleie inkl. avgifter." from [http://www.nve.no/PageFiles/11674/Nettleie med avgifter 202011.pdf](http://www.nve.no/PageFiles/11674/Nettleie_med_avgifter_202011.pdf).
- P. Selinder, H. W. (2009) "modell för ändrade förutsättningar i fjärrvärmenät."
- R. ulseth (2009). "Bygningers energiforsyning." Institutt for energi- og prosessteknikk, NTNU: 113.
- Rindal, L. B. (2011). "Varmeproduksjon basert på faste brensler." Retrieved 2011.07.04, from <http://www.fornybar.no/sitepageview.aspx?sitePageID=1825>.
- S. Fredriksen, S. W. (1993). "Fjärrvärme, teori teknik och function."
- Shapiro H.N., M. J. M. (2006). Fundamentals of engineering thermodynamics, John Wiley & sons.
- Standard, N. (2011). "PRNS 3701:2011 Kriterier for lavenergi og passivhus, yrkesbygg."
- statensbygningstekniskeetat (2010). "Veiledning til Forskrift om tekniske krav til byggverk."
- Stene, J. (1991). Varmepumper, grunnleggende varmepumpeteknikk.
- Strømberg, B. (2005). "Bränslehandboken." värmeforsk, rapport 911.
- Thyholt M, D. T. H., med fler (2008) "Justering av energikrav i TEK, prosjektrapport 27."
- Utne, Å. (2011). SV: Masteroppgave ved NTNU. Trondheim.
- Volla, R. (1994). "Gevinster ved økt temperaturdifferanse i fjernvarmeanlegg."
- Wollarstrand, J. (1997). District heating substations performance, operation and design, Lund tekniska högskola.

## Vedlegg 1; Varmekilder i fjernvarme og lokale energisentraler

Statistikken under fra Enova viser utviklingen for varmekilder til fjernvarme i fortid og estimert fremtid, samt lokale energisentraler. (ENOVA 2010)



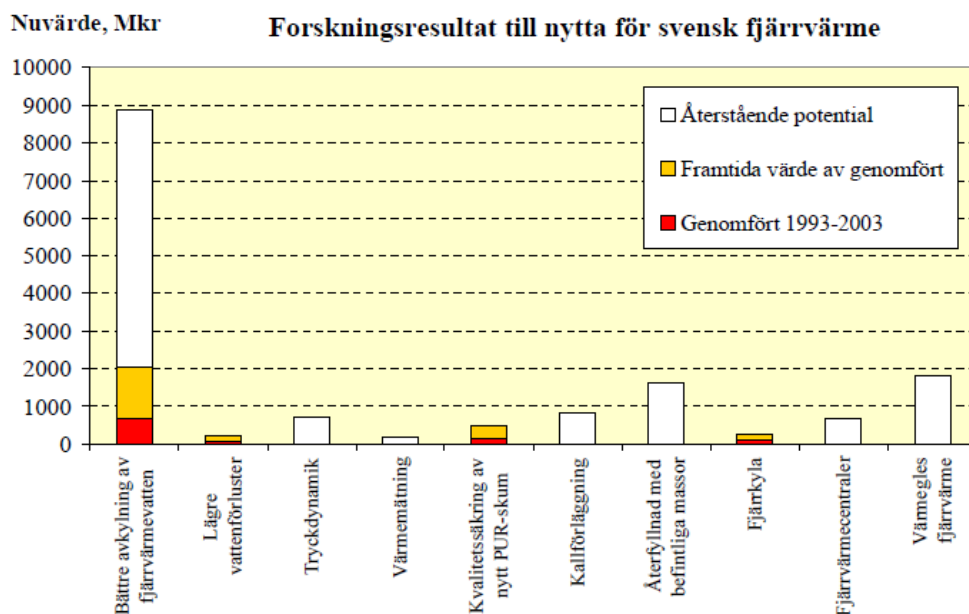
Figur 38; utvikling varmekilder til fjernvarme



Figur 39; Antall lokale varmesentraler med støtte fra Enova etter varmekilde

## Vedlegg 2; verdi av fjernvarmeforskning

Når det gjelder lønnsomheten av å utarbeide mer optimale sammenhenger for temperaturnivået i fjernvarme er en svensk rapport optimistisk sådan. Den slår fast at verdien av økt avkjøling er veldig stor (neste side).

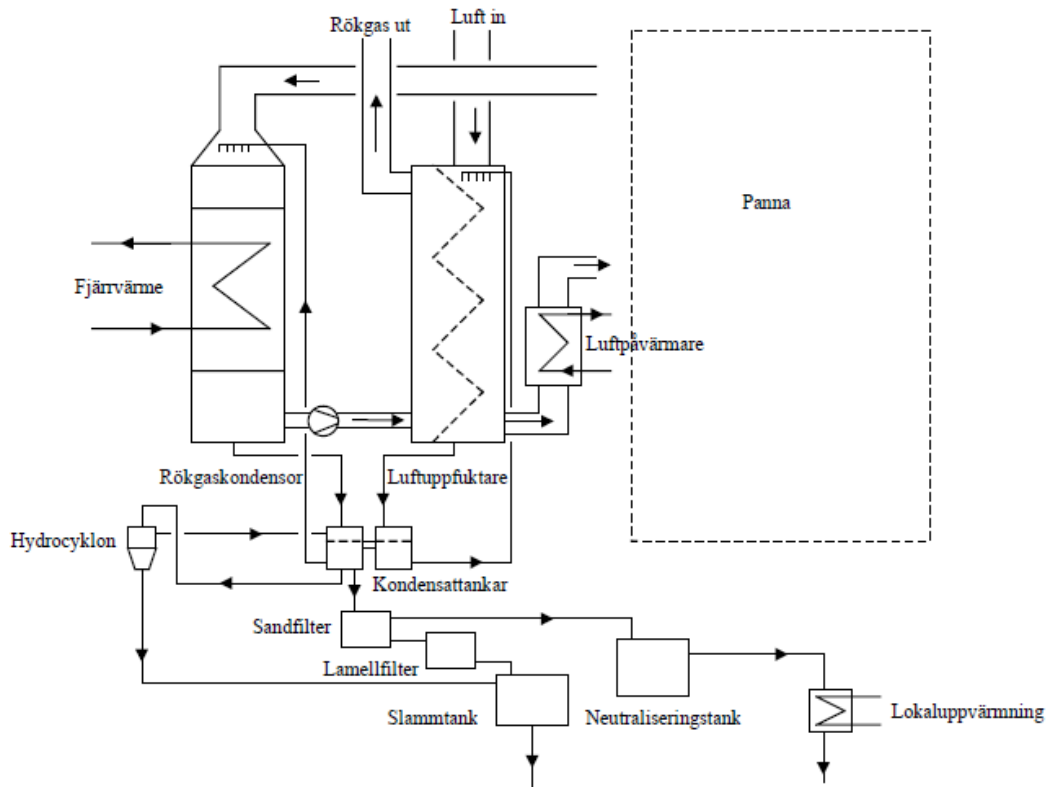


Figur 40; Nåverdi til ulike områder innen fjernvarmeforskning, utført og potensial (Werner)

Kolonne til venstre viser verdien av videre forskning på bedre avkjøling i fjernvarme. S. Werner legger vekt på at det å øke denne har stor verdi.



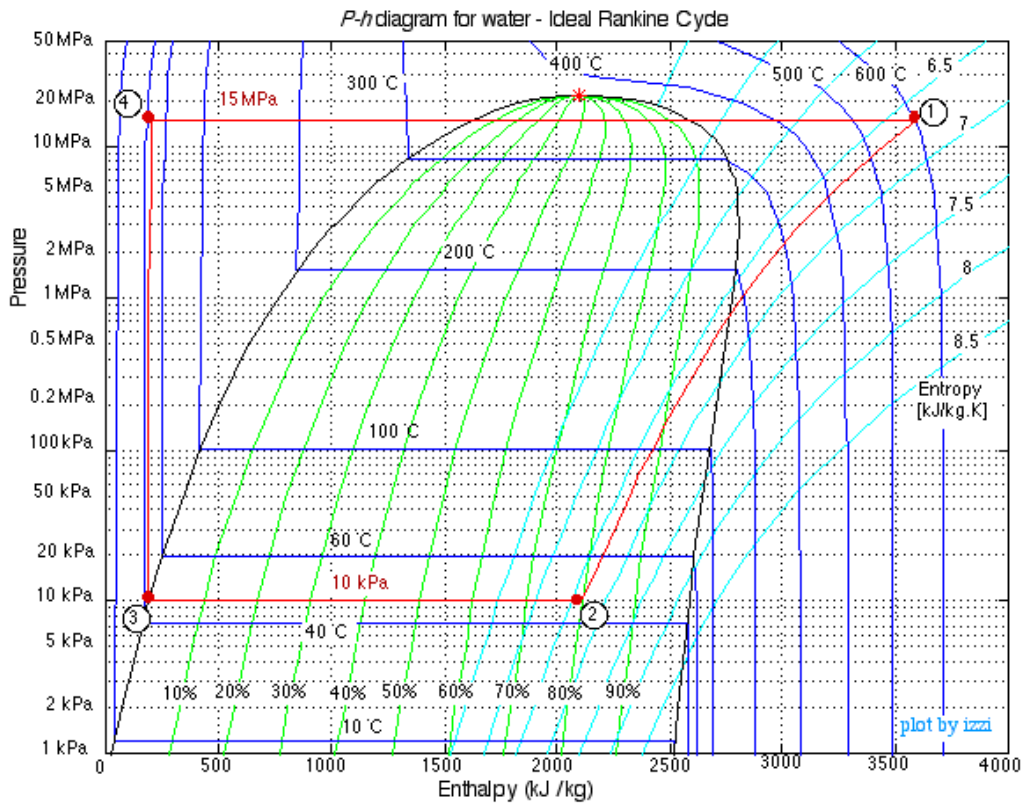
### Vedlegg 3: Flytskjema for kjel med røykgasskondensering og luftoppfuktning.



Figur 41; Forbrenningsanlegg med røykgasskondensering og oppfuktning

(Axby F. 2000)

## Vedlegg 4; Kombinert varme og kraft-produksjon.



Figur 42; Rankine-prosess markert rødt med forklaring

- 4-1 Varme mottatt fra røykgass
- 1-2 Ekspansjon i turbin ned til kondenseringstemperatur
- 2-3 Fjernvarmen kondenserer damp
- 3-4 Pumpe som driver kretsen

Arbeid turbin:

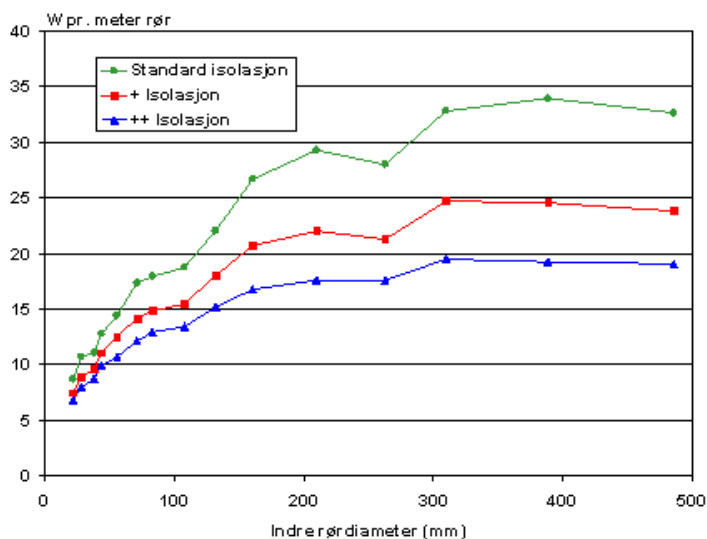
$$0 = -W_{turbin} + \dot{m} \cdot \left( \Delta H + g \cdot \Delta Z + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \right) = -W_{turbin} + \dot{m} \cdot \Delta H$$

$$= W_{turbin} = \dot{m} \cdot \Delta H = \dot{m} \cdot (H_1 - H_2)$$

## Vedlegg 5; Varmetap rør

### Varmetap rør:

Varmetap rør med 3 ulike typer isolasjon. I Norge har en stort sett kun benyttet standard isolasjon (grønn). Det er her forutsatt en midlere temperatur i fjernvarmenettet på 80 °C og en omgivelsestemperatur på 3 °C, altså en temperaturdifferanse på 77 °C;



Figur 43 Varmetap i fjernvarmenett (temperaturdifferanse 77°C) Soma miljø

### Andel varmetap i nettet av total varmemengde:

Tabell 7; varmemengde produsert og varmemengde tapt i fjernvarme

#### District heating 1995 - 2008

	Unit	1995	2000	2005	2007	2008
Establishments	Number	21	25	38	40	44
Net production of district heating	TJ	4668	5777	9224	11037	12177
Losses	"	399	531	765	1109	1241
Delivered consumer:						
Total	"	4269	5246	8460	9927	10936
Households	"	977	758	1422	1842	2526
Industry and mining	"	1122	810	1077	1155	1169
Services	"	2154	3643	5956	6921	7231
Other	"	17	34	4	10	10
Average price (excl. VAT)	øre/kWh	26.3	30.6	45.9	50.5	57.0
Investment	mill. NOK	75.6	236.0	750.0	820.2	940.7



## Vedlegg 7; Simuleringsverdier i ChessWin

Disse verdiene er benyttet ved simulering i ChessWin ved ulike simuleringer. 3 ulike simuleringer er utført. Dette gjelder;

1. Analyse av endret oppvarmingsbehov for bygg med 80/60 system.
2. Analyse av endret sekundært temperaturnivå, 80/60 og 70/55.
3. Analyse av redusert turtemperaturens innvirkning på radiatorsystemets kapasitet.

### Analyse av endret av varmebehov for bygg med følgende parameterverdier:

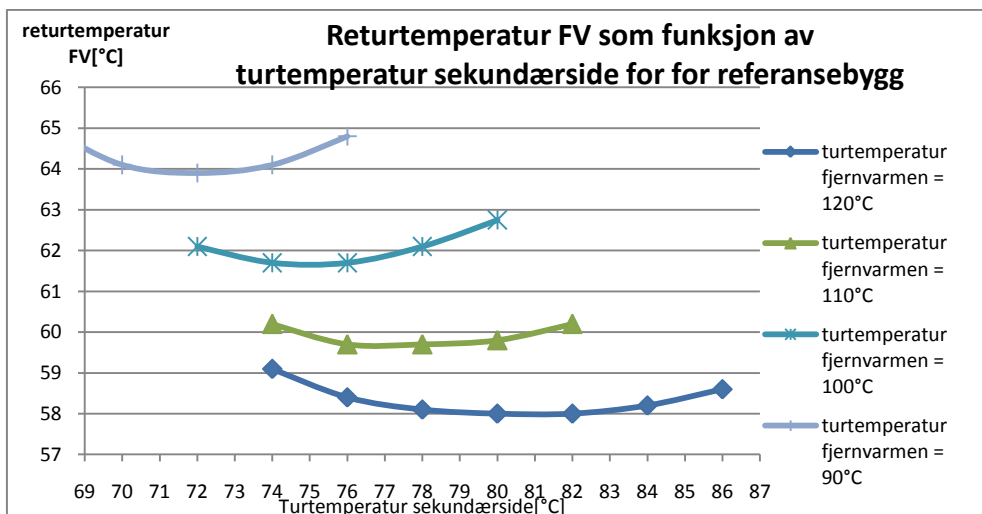
Type energistandard:	Referansebygg	TEK 10	Passivhus	
				Enhet
Oppvarmingsbehov / uten Ventilasjon:	31,2	20,8	9,95	W/ m <sup>2</sup>
Ventilasjonsbehov:	30,55	11,725	10,05	W/ m <sup>2</sup>
Varmebatteri/ Design innløpstemperatur	4	10,9	10,7	°C
Design luftstrøm	1,945	1,945	1,67	m <sup>3</sup> /s
Andel ventilasjon	0,495	0,36	0,5025	Q <sub>vent</sub> /Q <sub>tot</sub>
Areal radiatorer	151	64,3	30,7	m <sup>2</sup>
Plater varmeveksler	26	14	9	antall

## Referansebygg(TEK 97):

Som referansebygg i denne delen er Strandveien 18 i Bærum valgt. Kontorbygget befinner seg klimatisk i et område som representerer et vanlig norsk klima, og er bygget i 1997. Bygget har 7 etasjer og i alle etasjene er det vanlig kontorvirksomhet med 8-timers arbeidsdag. Bygget har balansert ventilasjon med batterigjenvinner.

Referansebygget er valgt fordi det er grundig undersøkt i forbindelse med en studie gjort av energibruk for kontorbygg(Grini C. 2009). Dette bygget ble brukt som referansebygg i denne undersøkelsen også, og har et behov for romoppvarming som tilsvarer kravene fra TEK 97(35-40 W/m<sup>2</sup>). For bygget er det målt ventilasjonsmengder ved normal drift og dette brukes også ved simulering i ChessWin. Varmetapet er basert på målte verdier uten ventilasjon og et varmetapstall på 0,78 W/m<sup>2</sup> K gir et varmetap på 31,2 W/m<sup>2</sup> ved dimensjonerende utetemperatur. Ventilasjonsbehovet er beregnet ut ifra en målt luftmengde på 7 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h og en varmegjenningsgrad på 60 % som gir et ventilasjonsbehov på 30,55 W/m<sup>2</sup> ved dimensjonerende utetemperatur.

Optimalt sekundært temperaturnivå mhp. redusert turtemperatur primærside:

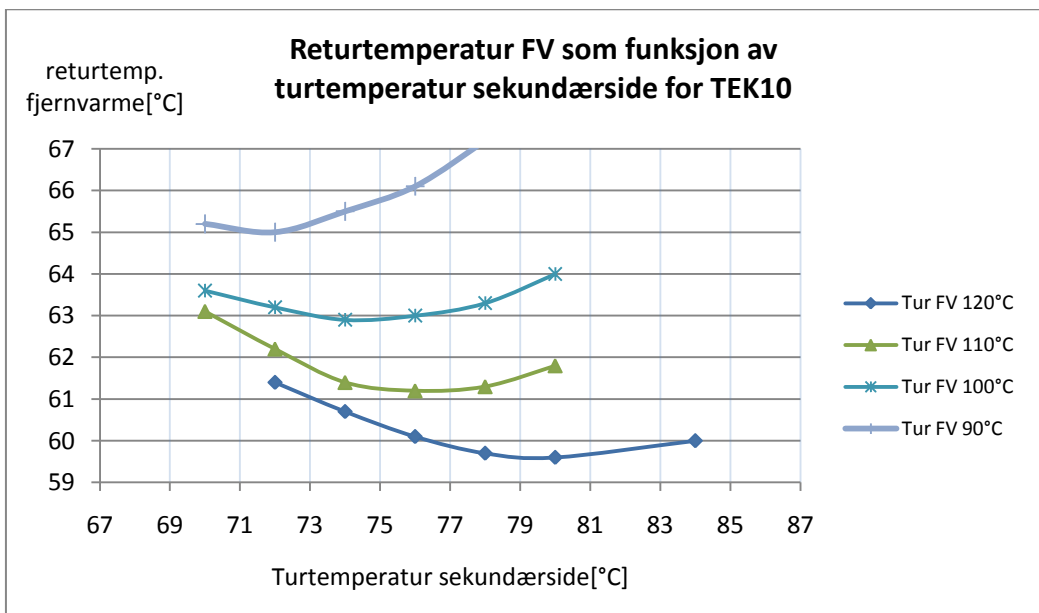


## TEK 10 - energikrav

For simuleringer med varmebehov fra krav i TEK 10 er det brukt NS 3031 for å beregne varmebehov for varme og ventilasjon. Kravene er spesifikke til U-verdier for hver bygningsdel så for å finne krav til dimensjonerende effekt må dette beregnes fra Simien(Thyholt M 2008). Dataene fra Simien er hentet fra;” Justeringer av energikrav i TEK”, og er benyttet til å fastslå en verdi for nødvendig effekt for romoppvarming( $0,52\text{W/m}^2\text{K}$ ) . For å estimere ventilasjonsbehov er det brukt tillegg til TEK 2007(Norskstandard 2010)

Kravene i TEK 10 gjelder for bygging av alle nye yrkesbygg og fungerer derfor godt til å kunne simulere hvordan varmebehovene i nye bygg påvirker fjernvarmen.

Optimalt sekundært temperaturnivå mhp. redusert turtemperatur primærside:

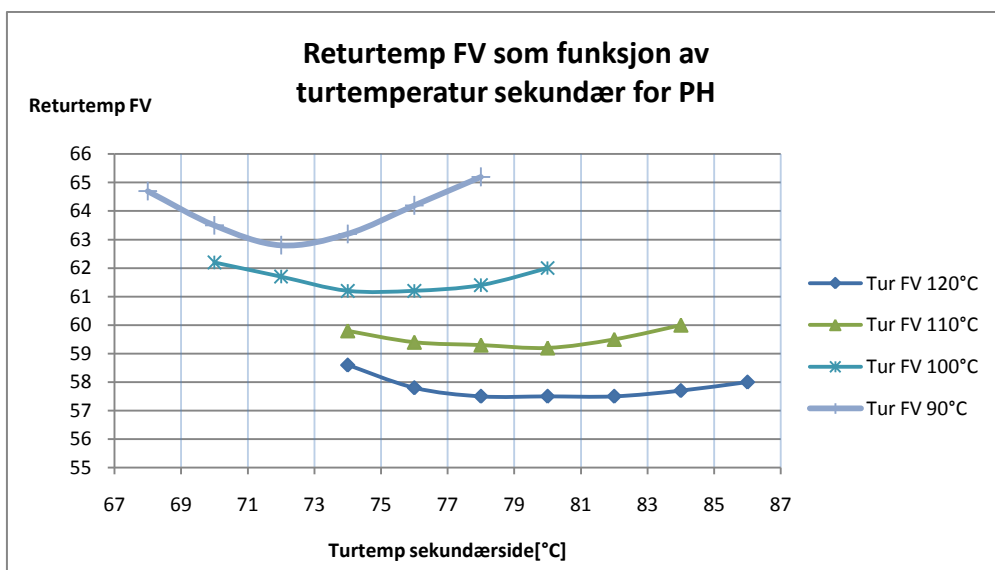


## Passivhusstandarden

Standard Norge og SINTEF byggforsk utarbeider i disse dager en ny standard for lavenergi- og passivhus. Disse kravene er spesielt strenge når det gjelder varmetap fra bygningsdeler og tetthet. Kravene er så strenge at de vil komme under minimumskravene som er definert av grunnleggeren til passivhusstandarden dr. Wolfgang Feist ved Passivhusinstituttet i Tyskland(fornybar.no 2011)

Kravene definert under passivhus for varmebehov er at maksimalt varmebehov ikke skal overstige  $10 \text{ W/m}^2$ . For ventilasjonssystemet gjelder minste luftmengde på  $6 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ (Standard 2011) noe som gir et varmebehov for oppvarming av ventilasjonsluft på  $10,05 \text{ W/m}^2$  ved en dimensjonerende utetemperatur( $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) og en varmegjennvinningsgrad på 80 %. Det er verdt å merke seg at kravene til varmegjenvinning ikke er skjerpet fra TEK 10 for kontorbygg, noe som gjør at varmebehovet for ventilasjonsluft er relativt høyere for passivhus enn for bygg bygget etter TEK 10.

Optimalt sekundært temperaturnivå mhp. redusert turtemperatur primærside:





## Analyse av variabelt sekundært temperaturnivå.

Grunnlaget for denne simuleringen er å se hvordan det optimale temperaturnivået i fjernvarmen påvirkes av temperaturnivået på sekundærsiden. I denne simuleringen ble varmebehovet som er beregnet fra TEK 10 lagt til grunn.

2 temperaturnivåer er valgt på sekundærsiden; 80/60 og 70/55 [°C]. Dette påvirker radiatorarealet.

### 80/60 [°C] sekundært system:

Oppvarmingsbehov/ u. Ventilasjon:	20,8 W/ m <sup>2</sup>
Ventilasjonsbehov	11,725 W/ m <sup>2</sup>
Varmebatteri/ Design innløpstemperatur	10.9
Design luftstrøm	1,945 m <sup>3</sup> /s
Andel ventilasjon	0,36
Areal radiatorer	64,3 m <sup>2</sup>
Plater varmeveksler	14

### 70/55 [°C] sekundært system:

Oppvarmingsbehov/ u. Ventilasjon:	20,8 W/ m <sup>2</sup>
Ventilasjonsbehov	11,725 W/ m <sup>2</sup>
Varmebatteri/ Design innløpstemperatur	10.9
Design luftstrøm	1,945 m <sup>3</sup> /s
Andel ventilasjon	0,36
Areal radiatorer	78 m <sup>2</sup>
Plater varmeveksler	14

## Analyse av kapasitetsendring ved turtemperaturreduksjon på fjernvarme:

Oppvarmingsbehov/ u. Ventilasjon:	31,335 W/ m <sup>2</sup>
Ventilasjonsbehov:	43,665 W/ m <sup>2</sup>
Varmebatteri/ Design innløpstemperatur	4
Design luftstrøm	2,78 m <sup>3</sup> /s
Andel ventilasjon	0,58
Areal radiatorer	100m <sup>2</sup>
Plater varmeveksler	30

Reguleringsventil eller varmeveksler dimensjoneres slik at den akkurat klarer å levere dimensjonerende effekt ved 120 °C. På den måten vil effekten av redusering av fjernvarme turtemperatur sees.

<b>Ventilplassering:</b>	<b>Kv-verdi for reguleringsventil:</b>
Varmevexler for oppvarmingssystem	1.45
Ventilasjonssystem	1.23
Radiatorssystem	2

Begrensning massestrøm sekundærside. Høy hastighet forårsaker problemer.

Reguleringsventil for ventilasjon og radiatorer er i full åpning. Dette gjør at det er mulig å se effekten av redusert turtemperatur på sekundærsiden.

## Vedlegg 9: Drifts- og investeringskostnader

Tabell 8; Effektkostnad for nye varmeproduserende enheter(fv kostnader)

Type anlegg	Effektkostnad[Kr / KW]	Effektkostnad[Kr / KW]
	For 1 MW	for 8 MW
Oljekjel	1000	250
Pellets	2700	
Bergvarmepumpe	10000 - 21000*	
Tørr flis	6800	
Fuktig flis	10000	8000 &

\*regnes i SEK,

& interpolert mellom 10 og 5 MW

Tabell 9; energikostnad for ulike energikilder i varmeproduksjon

Varmeproduserende enhet	Energikostnad [øre/kWh] (2007)
Lettolje	29,83
Naturgass	25,43
Kraftpris inkl. elavgift + nettleie	55
Skogflis, 50 % fukt	19
Pellets, 25 % fukt	18,02
Varmesalg fra sentral	50

(NVE 2007.1)

## Vedlegg 10: Begrensninger til ulike kuldemedier

Tabell 10; Aktuelle kombinasjoner av arbeidsmedier med type kompressor og maksimal vanntemperatur(kondenseringstemperatur) (Stene 2010)

Medium	Antall trinn	Trykkklasse [bar] (1/2 trinn)	Type kompressor (stempel,skrue turbo)	Maksimal vanntemp. [°C]
<b>R134a (HFK)</b>	1	25	Stempel, skrue, turbo	60-70
	2	25/25	Stempel, skrue, turbo	70
	2	25/40	Kun turbo	90
<b>R717 (NH<sub>3</sub>)</b>	2	25/40	Stempel, skrue	68-72
	2	25/50-60	Stempel, skrue(skrue i 2 trinn)	76-90
<b>R744 (CO<sub>2</sub>)</b>	1	60/150	Stempel, skrue	85
	2	60/150	Stempel, skrue	95

NH<sub>3</sub> er aktuelt kuldemedium siden den kan levere høye turtemperaturer. Dette er også et naturlig kuldemedium som er klimanøytralt, derfor er den aktuell og fremtidsrettet i fjernvarmesammenheng.

R134 kan også benyttes men er ikke klimanøytralt. Gir også gode virkningsgrader med totrinns turbokompressor. Dette kuldemediet er vanlig i fjernvarmesammenheng i dag, og vil også kunne være det en tid fremover. Problemet er at R134 ikke er klimanøytralt noe som gjør at på sikt vil dette kuldemediet utfases til bruk i varmepumper.

CO<sub>2</sub> kan brukes til høye turtemperaturer, men problemet er at virkningsgraden er sterkt avhengig av en lav returtemperatur. Er nokså uaktuell å bruke som kuldemedium i fjernvarmesammenheng siden returtemperaturen er alt for høy på fjernvarmen.