NTNU
Det skapende universitet

Modellbasert styring av klimaanlegg hos Prediktor

Marius Sebastian Ramnæs

Master i teknisk kybernetikk
Oppgaven levert: Juni 2011
Hovedveileder: Steinar Sælid, ITK

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Oppgavetekst

Prediktor AS ønsker å bedre sitt klimaanlegg i sitt hovedkontor i Fredrikstad. Studenten skal se på muligheter som finnes for å få en bedring i temperaturen i bygget.

For å løse dette må studenten:

- Studere sentralstyrt driftskontroll
- Sette seg inn i hvordan det eksisterende klimaanlegget ser ut, hvordan det virker og hvilke pådrag og målinger som er tilgjengelige. Ta utgangspunkt i tidligere utført masteroppgave for å gjøre følgende:
- Ta måleserier fra det eksisterende anlegget.
- Modellere oppvarming av luft og vegger, varmetap gjennom vinduer etc
- Implementere modellen og gjøre simuleringer
- Verifisere modellen

Basert på dette skal studenten utvikle modellbaserte reguleringsalgoritmer for styring av klimaanlegget.

Oppstartsdato: 30. jan 2011

Sammendrag og konklusjon

Prediktor AS har hatt et ønske om å forbedre kontrollen av innetemperaturen i sine lokaler i Fredrikstad. Denne oppgaven har blitt gitt som en avsluttende masteroppgave ved institutt for teknisk kybernetikk ved NTNU.

Det har blitt utviklet en lineær modell på formen $\dot{x} = Ax + Bu$ for energiflyten i Prediktors lokaler i Fredrikstad. Modellen er basert på fysiske betraktninger ved selve bygningsmassen, fysiske prinsipper for energibalanser og målinger gjort i bygget. Disse betraktningene er det gjort rede for i denne rapporten.

Målingene er gjort delvis med instrumenter allerede plassert i bygningen ved oppgavens start, og delvis med instrumenter satt opp i løpet av arbeidet med oppgaven. Måleresultatene er innhentet ved hjelp av Prediktors egen APIS-programvare, og i denne rapporten er betraktninger rundt instrumenteringen, det utførte instrumenteringsarbeidet samt detaljene rundt innhentingen av data gjort rede for.

Det har blitt utviklet en reguleringsstrategi for systemet. Regulatoren er basert på Kalmanfiltrering og LQ-regulering, og blitt utvidet og tilpasset reguleringsproblemet for å oppnå best mulig ytelse.

Modellen som er utviklet fanger opp den sentrale dynamikken i det virkelige systemet, men har noen svakheter, spesielt knyttet til radiatorene i bygget. Regulatoren som har blitt utviklet klarer å holde innetemperaturen tilfredsstillende nære referansen store deler av de tidsforløpene den er simulert over, men dette skjer på bekostning av svært omfattende pådragsbruk. Denne pådragsbruken kommer av svakheter i modellen, men også fordi ventilasjonsaggregatene skifter mellom to driftsnivåer morgen og kveld. Regulatoren vurderes som god nok til å kunne prøves ut på det virkelige systemet.

Med denne oppgaven er det lagt til rette for implementering av en regulator i Prediktors lokaler. Modellen kan forbedres, men er et godt utgangspunkt for videre arbeid. Reguleringsresultatene vil antakeligvis kunne forbedres ved bruk an en modellprediktiv kontroller. Det kan med fordel gjøres utvidelser av instrumenteringssystemet.

Innholdsfortegnelse

1 Innledning 1
2 Bakgrunn 3
2.1 Sentralstyrt driftsystem 3
2.2 Eksisterende løsninger for inneklimakontroll 4
2.2.1 Behovsstyring 5
2.3 Systemet som skal styres, komponenter og oversikt 5
2.3.1 Bygget 5
2.3.2 Fjernvarme 6
2.3.3 Gulvvarme 8
2.3.4 Ventilasjon 8
2.3.5 Radiatorer 9
2.3.6 Oppsummering og kommentarer 9
3 Modellering 13
3.1 Energibalanse 13
3.2 Energitilføring gjennom varmeovergang 15
3.2.1 Gulvvarme 16
3.2.2 Radiatorer 17
Vegger og tak 18
3.2.3 Vinduer 18
3.3 Andre energikilder 21
3.4 Oppsummering 21
4 Instrumentering 23
4.1 Måling 23
4.1.1 PLS 23
4.1.2 Værstasjon 28
4.2 Kontroll 29
4.2.1 Gulvvarme 29
4.2.2 Hovedkrets fyringsrom 31
4.3 Overordnet SD 32
4.3.1 APIS 32

4.3.2 ModFrame 34
4.3.3 Virtuell PC 35
4.4 Datainnsamling 35
5 Tilstandsrommodell 39
5.1 Tilstander 39
5.2 Pådrag 40
5.3 A- og B-matriser 42
5.4 Modellidentifisering 43
5.4.1 Initialverdier 44
5.4.2 Endelig modell 45
6 Regulering 49
6.1 Kalmanfilter 49
6.2 LQ-regulator 53
6.3 Foroverkobling 55
6.4 Integralvirkning 58
6.5 Regulator for varmtvann i gulv 62
7 Diskusjon 65
7.1 Modell 65
7.2 Kontroll 65
8 Videre arbeid 67
9 Kilder og referanser 69
Vedlegg A 71
Vedlegg B 73
Vedlegg C 75
Vedlegg D 77
Vedlegg E 79
Vedlegg F 81

Figurer

Figur 2-1 Eksempel på SD, hentet fra [1]. 3
Figur 2-2 Habornveien 48B sett fra syd. Bildet er hentet fra Google Street View 5
Figur 2-3 Luftmassesonene i Habornveien 48B 6
Figur 2-4 Siemens RVD235 7
Figur 2-5 Kamstrup-instrument 7
Figur 2-6 Ouman-regulator 8
Figur 2-7 Radiator i bygget. Bildet er hentet fra [1] 9
Figur 2-8 Oversikt komponenter 10
Figur 2-9 Bygget og energikilder 10
Figur 3-1 Vindusflate og strålingsvinkler 20
Figur 4-1 Målepunkter 25
Figur 4-2 To-lederkobling 26
Figur 4-3 Tre-lederkobling 27
Figur 4-4 Davis-konsollen. Bildet er hentet fra [1] 29
Figur 4-5 Kretsskjema for PWM-krets 30
Figur 4-6 M-bus-modem 32
Figur 4-7 Skjermdump fra Apis Ascii 33
Figur 4-8 Skjermdump fra Process Explorer 33
Figur 4-9 Skjermdump fra WeatherLinkBee, ”Properties”-vindu 34
Figur 4-10 Temperaturer i hver av etasjene og hallen for perioden i mars 36
Figur 4-11 Temperaturer i hver av etasjene og hallen for perioden i mai 36
Figur 5-1 Sammenligning mellom empirisk data fra mars zfilt, modell før identifisering m og modell etter identifisering me4. 46
Figur 5-2 Sammenligning mellom empirisk data fra mai z2filt, modell før identifisering m og modell etter identifisering me4 46
Figur 6-1 Diskret Kalmanfilter implementert i Simulink 51
Figur 6-2 Tilstandene fra modellen er plottet i blått, de estimerte tilstandene er plottet med grønt. Plottet for hele tidsperioden i mars. 52
Figur 6-3 Tretimers utsnitt fra Figur 6-2 53
Figur 6-4 Resultater med optimal pådragsmatrise 55
Figur 6-5 Forstyrrelsenes bidrag til endring i hver av tilstandene er plottet med blå grafer, mens foroverkoblingen er plottet med grønne. 57
Figur 6-6 Resultater med optimal pådragsmatrise og integralvirkning 59
Figur 6-7 Resultater med justering av gulvtemperaturreferansen 60
Figur 6-8 Steprespons 61
Figur 6-9 Pådrag 62
Figur 6-10 Reguleringssløyfe gulvvarme 63

1 Innledning

Denne rapporten er resultatet av et mastergradsarbeid som avslutter den femårige utdanningen teknisk kybernetikk ved NTNU i Trondheim. Oppgaven er utført i samarbeid med- og på oppdrag fra Prediktor AS.

Prediktor AS holder til i et forholdsvis nytt og moderne bygg i Habornveien 48B i Fredrikstad. På tross av dette oppleves ikke innetemperaturen i bygget som ideell av dem som jobber der. Prediktor AS ønsker derfor å få på plass en eller annen form for overordnet kontroll og styring av innemiljøet. Dette arbeidet ble påbegynt av Jon Øivind Vold i 2010, og resulterte i en masteroppgave[1] levert samme år. Det ble i den sammenheng installert utstyr som gjør det mulig å måle temperaturer byggets i fyringsrom, og en værstasjon som er montert på taket. Oppgaven resulterte også i en matematisk modell for energiflyten i bygningen, implementert i MATLAB/SIMULINK.

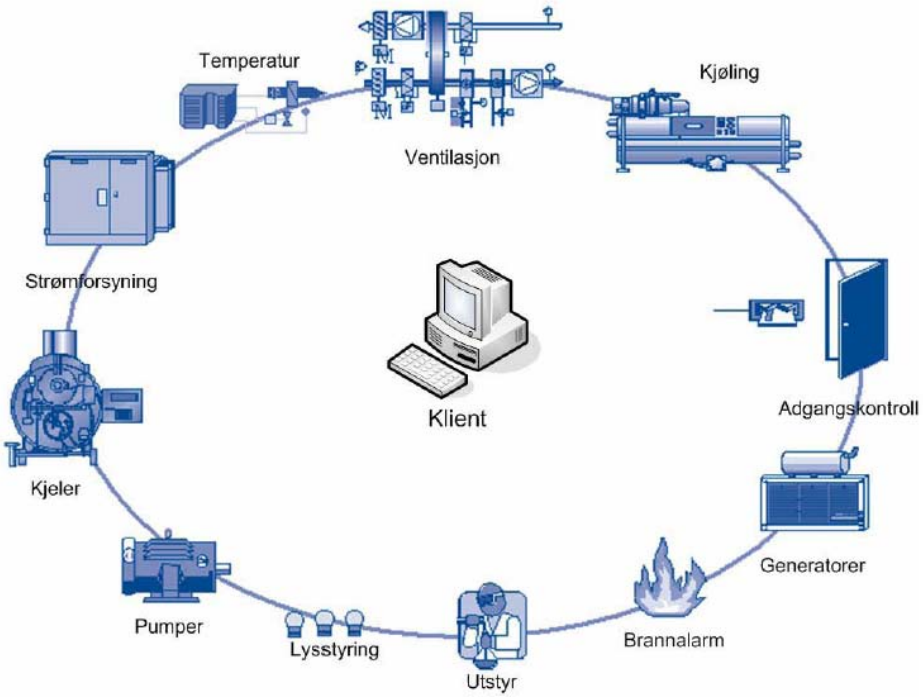
I denne masteroppgaven har det blitt tatt utgangspunkt i resultatene fra [1] og tatt sikte på å videreutvikle modellen som ble utformet, samt å utvikle en reguleringsstrategi for bygget. I kapittel 2 gjøres det greie for bakgrunnen for denne oppgaven, måter innetemperatur kan kontrolleres på, samt detaljer rundt selve bygget. I kapittel 3 legges fysiske betraktninger til grunn for å utlede en modell for energiflyten som er grunnet i virkeligheten. I kapittel 4 greies det ut om hvordan bygget har blitt instrumentert, og om hvordan sentralisert kontroll skal gjennomføres. I kapittel 5 og 6 overføres de fysiske betraktningene fra kapittel 3 til en modell på tilstandsromform, og det gjøres greie for detaljene rundt reguleringsstrategien som er utviklet.

2 Bakgrunn

I dette kapittelet gjøres det først kort greie for hva som menes med et sentralstyrt driftssystem, og for hvordan dette kan settes opp. Deretter gjøres det greie for detaljene rundt de tekniske komponentene som er installert i Habornveien 48B og hvordan disse var koblet opp før gjennomføringen av denne masteroppgaven.

2.1 Sentralstyrt driftsystem

Et sentralstyrt driftssystem(SD) er en samlebetegnelse på intelligente styringssystemer i bygg, som gjør det mulig å avlese informasjon fra- og styre de ulike tekniske installasjonene, fra ett punkt. Dette punktet kan være en PC eller en dedikert datamaskin i form av en brukerterminal. Et SD skal overvåke hele systemet, i tillegg til å styre og regulere de komponentene som krever dette. Systemet kan omfatte alt fra adgangskontroll og alarmsystemer til oppvarming og annet maskineri i bygget.



Figur 2-1 Eksempel på SD, hentet fra [1].

Siden de første enkle SDene kom for rundt 30 år siden, har utviklingen gått i retning av bruk av dedikerte kretser og mikrokontrollere i de ulike delene av systemene [1]. Dette har åpnet for stadig større muligheter for kommunikasjon mellom de ulike komponentene, og gjør at det nå er mulig å gjøre store mengder informasjon tilgjengelig på et sted. Den utbredte bruken av datakommunikasjon gjør også at stadig større deler av et SD kan styres fra den sentraliserte klienten, uten å fysisk trykke på knapper på komponentene.

Den utbredte bruken av datakommunikasjon i SD og prosessindustrien generelt, har også ført til en rekke standardiserte kommunikasjonsprotokoller, og standardiserte måter å dele opp datasystemene på. I grove trekk skilles det gjerne mellom tre abstraksjonsnivåer, feltnivå, prosessnivå og administrasjonsnivå, som beskrevet i ”Automation Network Selection”[2] av Dick Caro.

På feltnivået brukes gjerne lavnivå kommunikasjonsprotokoller, med enkel og robust tilkobling, begrenset mengde overført data og enkle mekanismer for å sikre dataflyt. Dette nivået dreier seg stort sett om enkel kommunikasjon med- og mellom sensorer og aktuatorer.

På prosessnivået utveksles informasjon som har med selve prosesstyringen å gjøre. Det kan dreie seg om kommunikasjon mellom ulike overordnete kontrollere eller Programmerbar Logiske Styringsenheter (PLS-enheter). På dette nivået er typisk dataraten høyere og kommunikasjonsstandardene mer kompliserte for å sikre kvaliteten på dataene som utveksles.

Administrasjonsnivået omfatter gjerne brukerterminaler og generell oversikt over nivåene under, og det er gjennom dette nivået resten av verden er koblet til datasystemet. Det har også blitt stadig mer vanlig å gjøre det administrasjonsnivået tilgjengelig over internett, slik at datasystemet kan overvåkes fra hvor som helst. På dette nivået blir også gjerne data fra nivåene under loggført og lagret i databaser.

Bygget i Habornveien 48B har flere tekniske installasjoner som godt kunne vært koblet til et SD, som for eksempel adgangskontroll, brannvarslingssystem og heis. Det er derimot ikke lagt opp for sammenkobling av alle disse systemene, men fokusert på komponentene som dreier seg om inneklima og temperatur. Videre i denne oppgaven vil derfor begrepet SD være begrenset til disse komponentene.

2.2 Eksisterende løsninger for inneklimakontroll

Den viktigste oppgaven til en SD med tanke på inneklimakontroll er å sørge for at rommene i bygget holder en temperatur som oppleves som behagelig for personene i bygget. I tillegg til dette kan det være ønskelig å oppfylle andre krav, som for eksempel lavt energiforbruk og lav fyringskostnad eller god kvalitet på innelufta ved å sørge for lavt CO2-nivå. Dette gjennomføres ved å bruke en mer eller mindre komplisert reguleringsstrategi, men svært ofte begrenser den overordnete kontrollen seg til å sette referanseverdier for de ulike komponentene og la det være opp til lavere nivå kontrollere å nå disse referansene. En typisk utfordring i et inneklimasystem er at de forskjellige energikildene ofte har svært forskjellig dynamikk. Et gulvvarmesystem vil for eksempel være preget av stor treghet på grunn av den store massen og varmekapasiteten i et betonggulv, mens temperaturen på ventilasjonslufta gjerne lar seg

endre i løpet av minutter. Det er derfor ikke uvanlig at gulvvarme brukes til grunnoppvarming, mens ventilasjonsanleggene sørger for finjusteringen. Dette kan i mange tilfeller føre til at energikilder med store treghetsforskjeller motarbeider hverandre, noe som er lite gunstig dersom man ønsker å holde energiforbruket lavt.

2.2.1 Behovsstyring

Behovsstyring er en løsning som har blitt stadig mer brukt de siste årene, ettersom sensor- og kontrollsystemer har blitt rimeligere og krav til energiforbruk har blitt strengere. Behovsstyring dreier seg om å varme opp, ventilere og belyse kun områder der folk oppholder seg. Dette krever at sensorsystemet gir mulighet til å registrere hvor folk oppholder seg i et bygg og at aktuatorsystemet gir mulighet til å detaljstyre hvert rom. Den største ulempen med behovsstyring er den høye kostnaden ved å installere omfattende sensor- og aktuatorsystemer. Dersom lavere kostnader er hovedmotivasjonen for å bruke behovsstyring må derfor det eventuelle reduserte energiforbruket veies opp mot prisen et slikt komplisert anlegg har[1].

2.3 Systemet som skal styres, komponenter og oversikt

Habornveien 48B ble bygd i 2009 og det ble installert flere komponenter som skulle sørge for riktig innemiljø. Det ble derimot ikke satt opp noe SD som samordner de forskjellige systemene, og det er i utgangspunktet ingen kommunikasjon mellom dem.

2.3.1 Bygget

Selve bygget er en treetasjes betongbygning. Planløsningen på de to nederste etasjene er omtrent like og rektangulære med sider på 15m og 29m, altså 435 kvm hver. Tredje etasje har et noe mindre areal. De tre etasjene består stort sett av kontorlokaler, med unntak av første etasje som også huser et serverrom. I dette rommet står det datautstyr som produserer mye varme. Det er derfor installert en egen luftkjøleenhet som holder temperaturen nede, og varmen fra rommet samt varmen produsert av luftkjøleren ventileres ut av bygget. På byggets østvendte kortside er det plassert en trappeoppgang og en toetasjes glasshall med delvis åpen himling.

Figur 2-2 Habornveien 48B sett fra syd. Bildet er hentet fra Google Street View

Dørene mellom de ulike delene av bygget gjør at luftmassen i de tre etasjene kan sees på som adskilte fra hverandre, og at hallen og trappeoppgangen deler en felles luftmasse. Figur 2-3 viser en skisse av bygget og hvordan de fire luftmassesonene er delt.

Figur 2-3 Luftmassesonene i Habornveien 48B

2.3.2 Fjernvarme

Byggets hovedenergikilde er fjernvarme i form av varmt vann. Varmt vann kommer fra et fjernvarmeanlegg, og energien hentes ut ved hjelp av to varmevekslere i fyringsrommet. Den ene av varmevekslerne forsyner dusjer og kraner i bygget med varmt vann, mens den andre er koblet til en kort rørsløyfe i fyringsrommet. Fra denne hovedkretsen hentes energi til komponentene som varmer opp bygget. Det er montert en trykkkompensert pumpe på hovedkretsen som i teorien sørger for en konstant vannstrøm. Temperaturen på vannet i hovedkretsen i det det forlater varmeveksleren, reguleres av en regulator av typen Siemens RVD235. Denne har et Meter-bus-grensesnitt (M-bus) som gjør kommunikasjon med et SD mulig. M-bus er et kommunikasjonsgrensesnitt på feltnivå som bruker kun to ledere, opprinnelig utviklet for fjernavlesning av energimålere.

Figur 2-4 Siemens RVD235

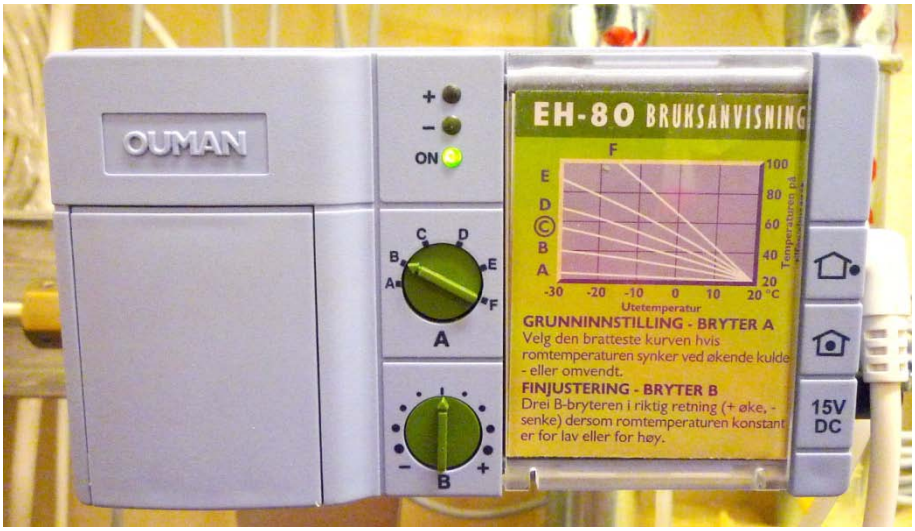
Det er også montert et Kampstrup måleinstrument som måler energiforbruket til enhver tid, og prisen Prediktor betaler for fjernvarme beregnes ut fra disse målingene. Målingene gjøres også tilgjengelig for kunden via en trådløs mottaker med USB-grensesnitt, og via elektroniske pulser på to utganger. Den ene utgangen gir én puls per kWh forbruk, og den andre gir én puls per 10 L volumstrøm i hovedkretsen. Den trådløse avlesningen er kun tilgjengelig gjennom et grafisk brukergrensesnitt og er vanskelig å få brukt i et SD (se [1]), men ved å koble til pulsutgangene er det mulig å holde oversikt over energiforbruket.

Figur 2-5 Kamstrup-instrument

2.3.3 Gulvvarme

Gulvet i byggets grunnplan varmes opp ved hjelp av et rørsystem som leder varmt vann fra fyringsrommet. Vannet varmer opp betonggulvet som igjen varmer opp luften i rommene i første etasje. Gulvvarmekretsen er koblet til hovedkretsen i fyringsrommet med shunt-ventil, og det er montert en trykkompensert pumpe som sørger for en teoretisk konstant vannstrøm.

Shunt-ventilens åpning er styrt av en regulator av typen Ouman EH-80. Regulatoren setter temperaturen på tur-vannet i gulvkretsen som en funksjon av utetemperaturen alene. Brukeren kan velge mellom seks ulike funksjoner av utetemperaturen og dermed oppnå høyere eller lavere vanntemperatur ved en gitt utetemperatur. Kurver for vanntemperatur som funksjon av utetemperatur er skissert på selve regulatoren for alle de seks innstillingene, se Figur 2-6. Regulatoren har ikke noe kommunikasjonsgrensesnitt og kan dermed ikke styres direkte fra et SD.



Figur 2-6 Ouman-regulator

2.3.4 Ventilasjon

Det er installert to ventilasjonsaggregater av typen Swegon Gold D i bygget plassert i henholdsvis andre- og tredje etasje. Aggregatet i andre etasje sørger for ventilasjon i kontorene i første og andre etasje, og aggregatet i tredje etasje forsyner kontorene i tredje etasje og glasshallen. Luft fra ventilasjonsaggregatene fordeles i kanalsystemer som ligger i taket i hver etasje, og fordeles i rommene via ventiler. Aggregatene suger også luft ut av rommene igjen via et tilsvarende kanalsystem. Dette skaper god sirkulasjon i luftmassen innendørs og sørger for at den kontinuerlig skiftes ut.

I selve aggregatene blir frisk luft hentet utenifra og varmet opp eller kjølt ned i to trinn. Først ledes luft utenifra gjennom en varmeveksler der den utveksler varme med innelufta som blir sugd ut av rommene. Etter dette ledes innelufta ut av bygget. Denne varmeveksleren er svært effektiv, og på kalde dager er gjenvinningsprosenten over

90%[1], noe som gjør at ventilasjonsaggregatene er svært energieffektive under de riktige forholdene. I neste trinn blir enten lufta varmet opp ytterligere i en ny varmeveksler der energien hentes fra hovedkretsen i fyringsrommet, eller kjølt ned ved hjelp av elektriske kjøleelementer. Varmevekslerene i dette trinnet i hvert av aggregatene er koblet til hovedkretsen med shunt-ventiler.

Ventilasjonsaggregatene er komplette inneklimasystemer med egne sensorer og regulatorer. Temperaturer, trykk og luftstrømmer måles og reguleres på flere steder i aggregatene, og de kan kjøre i flere forskjellige driftsmoduser. Kommunikasjon med aggregatene foregår via ModBus eller via TCP/IP og et eget web-grensesnitt. ModBus er et kommunikasjonsgrensesnitt på prosessnivå utviklet på 70-tallet for kommunikasjon mellom PLS-enheter. Ventilasjonsaggregatene er satt opp til å bruke sine egne regulatorer til å styre temperaturen på luften som suges ut av rommene i bygget, ved å variere temperaturen på luften som pumpes inn. Luftstrømmene fra de to aggregatene er satt opp slik at referansene bytter mellom to nivåer, ett for dagtid og ett for nattestid. Det er opptil aggregatenes egne regulatorer å følge disse referanseverdiene.

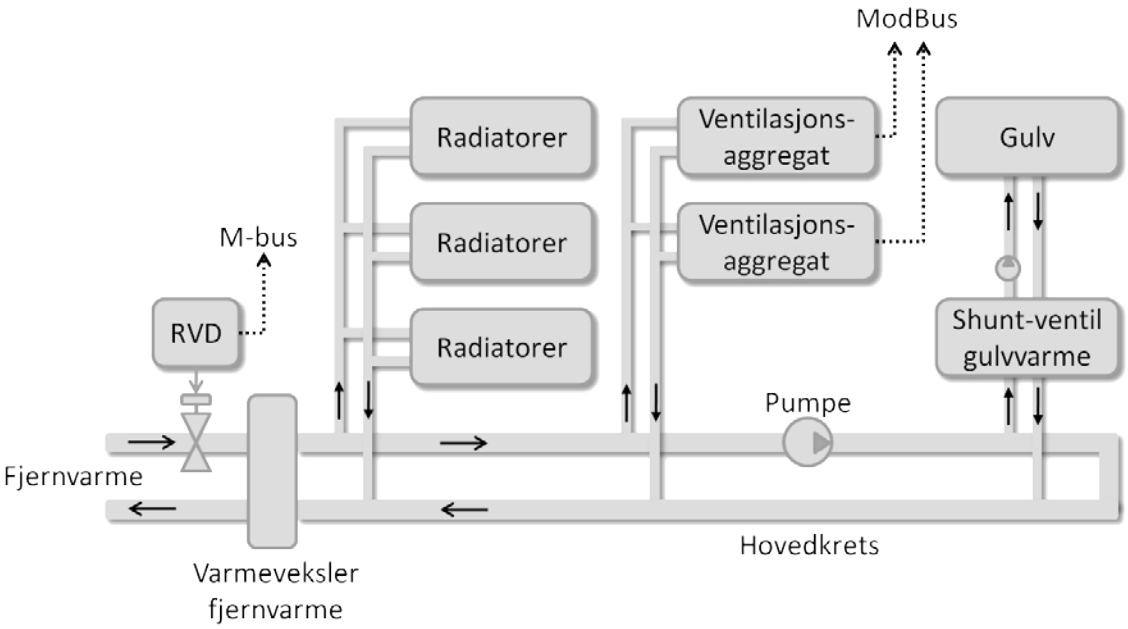
2.3.5 Radiatorer

I tillegg til de komponentene som styres av egne regulatorer, er det installert stålradiatorer i hele bygget. Disse radiatorene er koblet direkte i parallell med hovedkretsen, og vannstrømmen gjennom dem styres av ventiler montert på hver radiator. Ventilene betjenes manuelt, og kan ikke styres automatisk. Radiatorene er utformet slik at luft kan strømme gjennom dem, og slik at arealet mellom luft og stål er så stort som mulig. Dette gjør dem til effektive varmevekslere. Radiatorene gjør at personene i bygget får innflytelse på innetemperaturen, noe som betraktes som en forstyrrelse fra et SDs synspunkt.

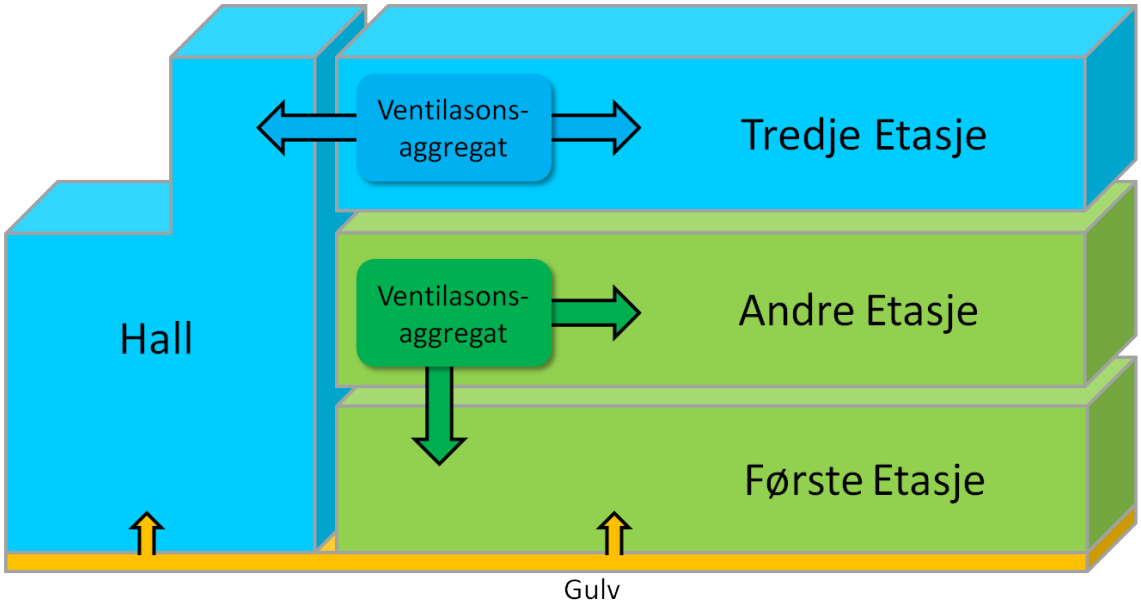
Figur 2-7 Radiator i bygget. Bildet er hentet fra [1]

2.3.6 Oppsummering og kommentarer

De forskjellige komponentene i inneklimasystemet, og hvordan de er koblet til fjernvarmeanlegget er skissert i Figur 2-8. Hvordan de ulike sonene påvirkes av de ulike energikildene er skissert i Figur 2-9.



Figur 2-8 Oversikt komponenter



Figur 2-9 Bygget og energikilder

Selv om bygget i Habornveien 48B er forholdsvis nytt, oppleves ikke innetemperaturen som ideell. Den største utfordringen med å regulere innetemperaturen ligger i oppdelingen av bygget, og i hvordan de ulike varme/kjøle-kildene påvirker de forskjellige sonene. Ventilasjonsaggregatene og gulvvarmen påvirker to av de fire sonene hver, og effekten av dem overlapper hverandre.

Første og andre etasje påvirkes av det samme ventilasjonsaggregatet, men gulvvarmen påvirker kun første etasje. Dersom gulvvarmen for eksempel gir for høy temperatur i første etasje vil ventilasjonsanlegget prøve å motvirke dette. Dette kan gi for lav

temperatur i andre etasje som ikke påvirkes av gulvvarmen. Reguleringssløyfa i ventilasjonsanlegget kan da nå et likevektspunkt der snittemperaturen er riktig, men temperaturen i de to etasjene er feil. Tilsvarende problematikk gjelder tredje etasje og hallen.

Gulvvarmen påvirker første etasje og glasshallen med samme gulvtemperatur, men disse sonene deler ikke ventilasjonsanlegg. Dersom gulvvarmen justeres slik at temperaturen oppleves som behagelig i én av sonene betyr ikke det at denne gulvvarmeinnstillingen gir behagelig temperatur i den andre. I tillegg skiller hallen seg fra de øvrige etasjene i både utforming, størrelse og byggemateriale. Dette gjør at den påvirkes annerledes av forstyrrelser utenifra, som utetemperatur og solinnstråling, i tillegg til at temperaturen svinger med en annen tidskonstant.

Disse faktorene gjør det vanskelig å oppnå tilfredsstillende temperatur i alle sonene til en hver tid, selv med et SD som tar hensyn til alle komponentene.

3 Modellering

For å få innsikt i temperaturdynamikken i bygget, er det hensiktsmessig å sette opp en matematisk modell. Modellen bør kunne vise hvordan de forskjellige pådragene påvirker de forskjellige temperaturene, hvordan temperaturene i de forskjellige sonene påvirker hverandre, og hvordan vær og vind spiller inn. En matematisk modell er også helt nødvendig dersom man vil simulere ytelsen til en regulator istedenfor å koble den til det fysiske systemet og se hva som skjer. Tilstandsobservere, samt flere av de mer avanserte reguleringsstrategiene, benytter seg også av en matematisk modell av systemet som observeres/reguleres under selve kjøringen.

Det er mulig å lage modeller som er nøyaktige helt ned på partikkelnivå, men det faller utenfor fokuset i denne oppgaven. Utgangspunktet for problemstillingen er at innetemperaturen i bygget ikke oppleves som ideell. Dette representerer subjektive oppfatninger av personene i bygget, ikke et avvik på for eksempel 1/100 °C ved en høypresisjonssensor. Det vil derfor være tilstrekkelig å regulere den temperaturen som oppfattes av personer i bygget, noe som kan representeres ved gjennomsnittstemperaturen i hver sone. Pådragene som er tilgjengelige påvirker også store områder, som for eksempel hele gulvarealet i første etasje eller luftstrømmen gjennom samtlige ventiler i en gitt sone. Det vil derfor antakeligvis være tilstrekkelig å lage en modell som fanger opp den sentrale energidynamikken. For å oppnå dette er det tatt utgangspunkt i fysikken som ligger bak denne prosessen.

3.1 Energibalanse

For å modellere energiflyten er det tatt utgangspunkt i å sette opp energibalansen for et gitt rom i bygget. I den sammenheng har det vært praktisk å betrakte rommet som et kontrollvolum, og betrakte energiflyten gjennom grensene til dette kontrollvolumet. For å oppnå dette er det tatt utgangspunkt i Reynolds transportteorem (3.1). Utledningene som følger og notasjonen som brukes er basert på "Modeling and Simulation for Automatic Control"[3] av Egeland og Gravdahl.

$$\frac{d}{dt}\iiint_{V_c(t)} \phi(\mathrm{x},\mathrm{t})\mathrm{dV} = \iiint_{\mathrm{V_c}} \frac{\delta\phi(\mathrm{x},\mathrm{t})}{\delta \mathrm{t}}\mathrm{dV} + \iint_{\delta \mathrm{V_c}} \phi\overrightarrow{\mathrm{v_c}} \cdot \vec{n} dA \tag{3.1}$$

(3.1) sier noe om forholdet mellom den tidsderiverte av volumintegralet over det tidsvarierende volumet $V_c(t)$ (venstre side av ligningen), og integralet av den tidsderiverte av integranden. Leddet lengst til høyre tar for seg volumelementene med hastighet $\vec{v}$ langs overflaten δV_c av kontrollvolumet, og sier noe om endringen (av integralet på venstre side) som følge av endringen i kontrollvolumet. $\vec{n}$ er overflatens enhetsnormalvektor, rettet ut av volumet.

Når en balanse skal uttrykkes, i dette tilfellet energibalansen, brukes Reynolds transportteorem for materialvolum. Siden grensene for kontrollvolumet representerer veggene i bygget, er det antatt at volumet har faste romkoordinater, altså at det ikke beveger seg. Reynolds transportteorem for et fast materialvolum V_f, er gitt ved

$$\frac{D}{Dt}\iiint_{Vf} \phi(x,t)dV = \iiint_{V_f} \frac{\delta\phi(x,t)}{\delta t} dV + \iint_{\delta V_f} \phi\vec{v}\cdot\vec{n}dA \tag{3.2}$$

For å bruke (3.2) til å uttrykke energibalansen settes funksjonen ϕ til å representere energi per volumenhet i kontrollvolumet. ϕ er da gitt ved $\phi = \rho e$, der ρ er tetthet og e er energi per masseenhet. (3.2) blir da

$$\frac{D}{Dt}\iiint_{Vf} \rho e dV = \frac{d}{dt}\iiint_{V_f} \rho e dV + \iint_{\delta V_f} \rho e\vec{v}\cdot\vec{n}dA \tag{3.3}$$

Endring i et generelt volum V kan uttrykkes som summen av energi tilført som følge av varmeflukstettheten $\vec{J}_Q$ langs volumets overflate, og energi tilført av en ytre trykkraft p som virker normalt på overflaten. Dette kan skrives som

$$\frac{D}{Dt}\iiint_{V} \rho e dV = -\iint_{\delta V} p\vec{v}\cdot\vec{n}dA - \iint_{\delta V} \vec{J}_Q\cdot\vec{n}dA \tag{3.4}$$

Fortegnet for summen blir negativt fordi normalvektoren $\vec{n}$ er rettet ut av volumet.

Siden ingen av masseelementene i kontrollvolumet antas å oppnå noen stor fart og, siden den potensielle energien antas å være tilnærmet konstant, neglisjeres både den kinetiske- og potensielle energien. Den totale energien per masseenhet er derfor satt lik den spesifikke indre energien $u = c_p T$, med spesifikk varmekapasitet c_p og ved temperatur T. Ved bruke $e = u$ og sette inn (3.3) i (3.4) oppnås

$$\frac{D}{Dt}\iiint_{V} \rho u dV = -\iint_{\delta V} (\rho u + p)\vec{v}\cdot\vec{n}dA - \iint_{\delta V} \vec{J}_Q\cdot\vec{n}dA \tag{3.5}$$

(3.5) uttrykker at endringsraten til energien i volumet V er lik summen entalpi gjennom konveksjon og energi gjennom varmeoverføring.

Videre er det antatt at trykkets arbeid og bidrag til energibalansen er neglisjerbart. Konveksjonen uttrykkes som massestrømmene som følge av ventilasjonsaggregatene, $\omega_i$og ω_u, inn og ut av volumet, med indre energi lik henholdsvis $u_i$og u_u. Den totale varmeoverføringen uttrykkes som J_Q. Ved i tillegg å bruke at volumintegralet av

massetettheten er lik den totale massen i volumet, oppnås energibalansen på følgende form

$$\frac{d}{dt}(mu) = u_{inn}\omega_{inn} - u_{ut}\omega_{ut} + J_Q \tag{3.6}$$

Denne energibalansen blir brukt til å modellere energiflyten inn og ut av ulike soner i bygningen, med én verdi for hver av m, c_p og T per sone. Denne forenklingen medfører antakelser om god blanding av luften i sonen slik at temperaturen er konstant i hele sonen ved et gitt tidspunkt. Den medfører også at hele sonen regnes å bestå av luft, og at møbler, vegger og lignende neglisjeres. Dette vil spille inn på tregheten i temperaturdynamikken, men vil til en viss grad kunne veies opp for ved å justere verdiene for m. Det greies ut om justering av parametre i kapittel 5.4. Ved å bruke $\dot{m} = \omega_i - \omega_u$ kan da (3.6) skrives videre ut til en differensialligning for temperatur i en gitt sone som

$$\begin{gathered} c_p m\dot{T} + c_p T\dot{m} = \omega_{inn}c_pT_{inn} - \omega_{ut}c_pT + J_Q \\ c_p m\dot{T} + c_p T\omega_{inn} - c_pT\omega_{ut} = \omega_{inn}c_pT_{inn} - \omega_{ut}c_pT + J_Q \\ \dot{T} = \frac{1}{c_p m}(\omega_{inn}c_p(T_{inn} - T) + J_Q) \end{gathered} \tag{3.7}$$

(3.7) viser at den modellerte temperaturendringen i en sone avhenger av massestrømmen fra ventilasjonsaggregatene inn i sonen og energi som følge av varmefluksen. Det sistnevnte leddet vil i denne sammenheng romme alle de andre energikildene tilknyttet en gitt sone, som ikke overfører energi gjennom konveksjon. Disse energikildene greies det ut om i kapittel 3.2 og 3.3.

3.2 Energitilføring gjennom varmeovergang

For å beskrive varmeovergang mellom legemer med ulik temperatur, har Fouriers lov blitt brukt

$$P_Q = UA\Delta\mathrm{T} \tag{3.8}$$

I (3.8) er U varmeoverføringskonstanten-, A er arealet- og ΔT er temperaturforskjellen mellom de to legemene. U har enheten W/m^2K, og P_Q har dermed enheten W og representerer energien som utveksles mellom de to legemene. Denne formelen har blitt brukt til å beregne energien som flyter mellom de ulike sonene og komponentene i bygget, og dette medfører noen forenklinger og antakelser. Blant annet betyr dette at temperaturen langs overflaten mellom de to legemene vil anses som konstant i begge

legemer. Dette harmonerer med antakelsen om konstant lufttemperatur gjennom hele luftvolumet i hver sone. En annen måte å se på dette på er at verdiene for temperatur representerer gjennomsnittstemperaturen i hvert av legemene. Andre forenklinger som er gjort vil det bli redegjort for i delkapitlene som følger. De forskjellige variablene som representerer de ulike varmeovergangskonstantene, arealene og temperaturene vil følge følgende konvensjon

$$P_{Qix} = U_{ix}A_{ix}(T_x - T_i) = K_{ix}(T_x - T_i) \tag{3.9}$$

Dette kan leses som overført effekt fra sone/komponent x til sone/komponent i. Der det er hensiktsmessig blir det brukt forbokstaver som verdi for x. K_{ix} kan tolkes som termisk koblingen mellom to soner/komponenter. Tallverdiene for de ulike variablene tas opp i kapittel 5.

3.2.1 Gulvvarme

Gulvvarmen overføres som nevnt fra gulvet til første etasje og hallen. Når Fouriers lov brukes til å modellere denne varmeovergangen, er det viktig å presisere at dette er gjelder overgang mellom lufta i sonene og gulvoverflaten, ikke vannet som flyter i rørsløyfa. Dersom denne forskjellen hadde blitt ignorert ville det medføre at man så bort fra tregheten i temperaturdynamikken i gulvet. Siden gulvet har en forholdsvis stor masse, og dermed også stor termisk treghet, blir en slik antakelse ansett som for grov for å oppnå en tilfredsstillende modell. U kan her settes som varmeovergangstallet mellom luft og betong, og A som det totale gulvarealet. Dette medfører at man ser bort fra en eventuell isolerende effekt fra gulvbelegget, samt møbler og utstyr som står på gulvet. Ved å bruke én verdi for gulvtemperaturen antas det at gulvtemperaturen er lik i første etasje og i glasshallen.

$$P_{Qig} = U_{ig}A_{ig}\left(T_g - T_i\right) \tag{3.10}$$

Selve gulvet utveksler energi med vannet i rørsløyfa i tillegg til første etasje og hallen. Rørsløyfa ligger støpt ned i betongen i gulvet, og er lagt ned i et sikksakkmønster som dekker hele gulvarealet for at hele gulvet skal varmes opp like mye. Denne energiutvekslingen kan modelleres på forskjellige måter. Én mulighet er å måle temperaturforskjellen mellom tur- og returvannet, og bruke dette til å beregne hvor mye energi som til enhver tid omsettes i gulvet. Effekten som funksjon av temperaturene regnes da ut som

$$P_{Qgv} = c_{pv}\omega_{gulv}(T_{v,tur} - T_{v,retur}) \tag{3.11}$$

med varmekapasiteten for vann c_{pv} og massestrømmen ω_{gulv}. Dette er en enkel måte å regne ut hvor mye effekt som omsettes, og gir et tall som enkelt kan settes inn i energibalansen for gulvet. Ulempen med denne metoden er at ved å ta utgangspunkt i

den relative temperaturdifferansen mister man koblingen til den faktiske temperaturen i vannrørene. Man risikerer da at modellen gir en gulvtemperatur som ligger mye høyere enn tur-vannet eller mye lavere enn returvannet, noe som ikke representerer den virkelige situasjonen.

En annen mulighet er å modellere energiflyten i gulvet som en varmeovergang mellom vannet i rørene og betongen i gulvet. I realiteten vil vanntemperaturen endre seg langs hele rørsløyfa (typisk vil vannet tilføre gulvet energi, og vanntemperaturen vil falle). På samme måte som det brukes en gjennomsnittsverdi for gulvtemperaturen, kan det brukes én verdi for å representere temperaturen i vannet.

$$P_{Qgv} = U_{gv}A_{gv}\left(T_v - T_g\right) \tag{3.12}$$ [1]

Endringen i gulvtemperatur per tid vil være 0 når summen av energistrømmene inn og ut av gulvet er like. Dersom det antas at gulvet er tilstrekkelig isolert fra bakken under bygget, vil det kun utveksle energi med vannet og med sonene over. Dersom man bruker konstantene $a > 0$ og $b > 0$ for varmeovergangskonstanter skalert med gulvets masse og varmekapasitet, T_v for vanntemperaturen og T_s for temperaturen i sonene, er gulvtemperaturen i likevekt T_g^* gitt ved:

$$\begin{gathered} \dot{T} = a\left(T_v - T_g^*\right) + b\left(T_s - T_g^*\right) = 0 \\ T_g^* = \frac{aT_v + bT_e}{a + b} \\ T_v \leq T_g^* \leq T_e \quad \vee \quad T_v \geq T_g^* \geq T_e \end{gathered} \tag{3.13}$$

Gulvtemperaturen i likevekt vil dermed ligge i mellom- eller være lik som temperaturene på vannet og sonene over. Med dette som bakgrunn har temperaturen på turvannet blitt valgt til å representere vanntemperaturen i gulvet.

3.2.2 Radiatorer

Radiatorene fungerer som nevnt som varmevekslere mellom vannet og lufta som strømmer gjennom dem. Verdien for U representerer her varmeovergang mellom luft og stål, og verdien for A representerer det totale utvendige arealet på radiatorene i en gitt sone. Det antas dermed at alle radiatorene i samme sone er like varme.

[1] (2.4) og (2.6)bryter konvensjonen angitt på side 13. Dette er fordi vannet i rørsløyfa og vannet i radiatorene kun påvirker én komponent hver, nemlig gulvet og radiatorene.

På samme måte som med gulvvarmen opereres det også her med varmeovergang i to steg, først fra vannet til radiatorene, deretter fra radiatorene til luft. Dette gjøres fordi den termiske massen til radiatorene anses som for stor til å ignorere, noe som også underbygges av modellidentifikasjonsarbeidet som er gjort, se kapittel 5.4. Det samme temperaturfallet langs vannrørene som i gulvvarmen gjelder i realiteten også her, men på samme måte som i gulvet representeres også vanntemperaturen i radiatorene med én verdi.

$$P_{Qir} = U_{ir}A_{ir}(T_r - T_i) \tag{3.14}$$
$$P_{Qrv} = U_{rv}A_{rv}(T_v - T_r) \tag{3.15}$$ [1]

Vegger og tak

Veggene i bygget skiller de ulike sonene fra hverandre, og skiller også utemiljøet fra innemiljøet. Særlig ytterveggene er konstruert for å skjerme bygget så godt som mulig fra utemiljøet, og er satt sammen av flere lag med forskjellige materialer for å isolere best mulig. Når det snakkes om varmeovergangstall gjennom en vegg benytter byggebransjen seg av begrepet U-verdi som beskrives som invers varmemotstand, som beskrevet i "Enøk i bygninger, Effektiv energibruk"[4] utgitt av Sintef. Når den totale U-verdien for en vegg skal beregnes summeres varmemotstanden i alle lagene veggen består av, og U-verdien er det inverse av denne summen[4]. Energiflyten fra sone til sone gjennom innervegger og tak/gulv modelleres på samme måte, med et varmeovergangstall som representerer flere lag og materialer.

Ytterveggene og taket påvirkes i tillegg til utetemperaturen av solstråling og vind. Hvordan vinden påvirker innetemperaturen henger sammen med vindstyrke og vindretning, hvor vindtett bygget er samt byggets aerodynamiske egenskaper. Vindtettheten er det mulig å måle ved hjelp av trykktester, og det er mulig å simulere aerodynamikken rundt bygget, men begge disse tiltakene faller utenfor fokuset for denne oppgaven. Det antas i stedet at vinden spiller en såpass liten rolle for innetemperaturen at den kan ignoreres. Dette ville vært en grov antakelse for et gammelt trehus, men for et forholdsvis moderne bygg i betong, glass og stål anses dette som rimelig. Effekten av solstråler på energiflyten gjennom yttervegger og tak ignoreres også av samme årsak. En eventuell feil den sistnevnte antakelsen medfører vil det uansett være mulig å veie opp for når solinnstrålingen gjennom vinduene modelleres. Det er heller ikke tatt hensyn til eventuelle kuldebroer i vegger og tak. I (3.16) representerer x enten utetemperatur eller temperatur i en av sonene.

$$P_{Qix} = U_{ix}A_{ix}(T_x - T_i) \tag{3.16}$$

3.2.3 Vinduer

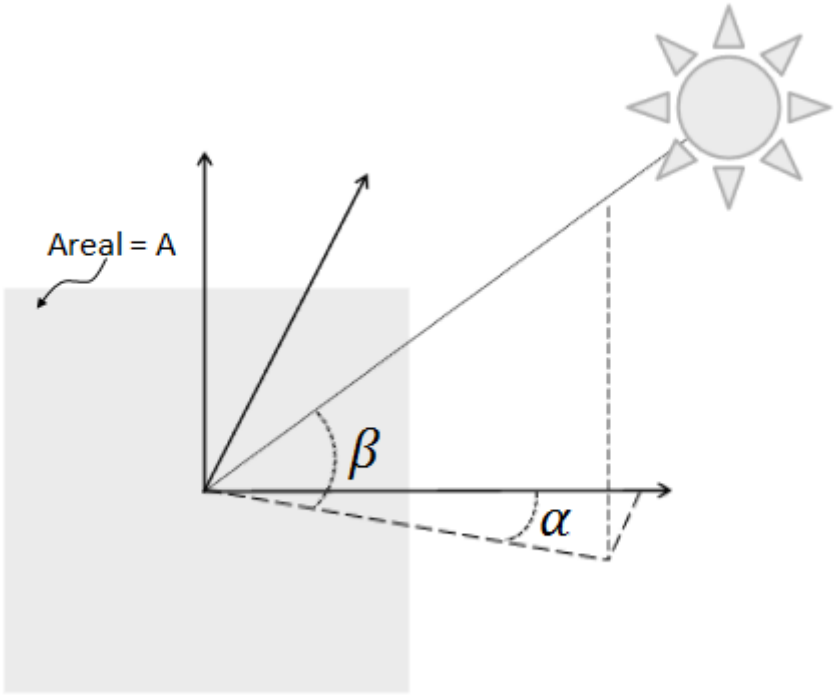
Varmeovergangen gjennom vinduene modelleres på samme måte som veggene. Moderne vinduer består også av flere lag, og U-verdien beregnes på tilsvarende måte. Selv om de isolerer langt bedre enn eldre typer vinduer, regnes denne U-verdien som langt høyere enn U-verdien for tykke betongvegger. Vinduene står derfor for en betydelig del av energiflyten mellom inne og ute. I tillegg til selve glassflaten transporteres det også varme gjennom karmen rundt vinduet og området der denne er festet i veggen. Varmeovergangstallet for et vindu må derfor også regnes som en gjennomsnittsverdi.

Hovedfunksjonen til et vindu er å slippe dagslys inn i bygget. Dette medfører også at strålingsvarme fra sola slipper gjennom, og dette bidrar til energiflyten inn gjennom vinduene. I utgangspunktet er strålingsenergien gjennom et gitt plan gitt ved

$$P_{str} = IA \tag{3.17}$$

I (3.17) representerer I strålingsintensiteten i W/m^2 og A representerer planets areal i m^2. Solinnstrålingen gjennom et vindu bestemmes først og fremst av vinklene som solstrålene treffer vindusglasset med, som er gitt av solens posisjon på himmelen og vinduets orientering. Jo spissere disse vinklene er, jo mindre er det effektive arealet strålene treffer. En overflate med areal A som blir truffet av solstråler med horisontal innfallsvinkel α og vertikal innfallsvinkel β som vist i Figur 3-1, har et effektivt areal A_e gitt ved:

$$A_e = Asin(\alpha)\cos(\beta) \tag{3.18}$$



Figur 3-1 Vindusflate og strålingsvinkler

Vinklene α og β bestemmes av vinduets orientering, tid på dagen og tid på året. Det effektive arealet begrenses også dersom vindusruta ikke er montert i samme plan som ytterveggen, noe som ofte er tilfelle siden det gjerne vil være en utvendig vinduskarm. Dersom det står noe i veien for sola vil dette naturligvis også spille inn, og i Habornveien 48B vil særlig løvtrær på byggets sørside spille inn om sommeren. Effekten av dette samt ytre vinduskarmer representeres ved en skjermingsfaktor a. En annen faktor som spiller inn er solfaktoren S som sier noe om hvor mye stråling som slipper gjennom selve glassruten. Ubehandlet glass filtrerer bort en del av strålingen, og dersom i tillegg overflaten behandles kan solfaktoren minkes ytterligere. Gitt at strålingsintensiteten er konstant langs hele bygget, og at alle vinduene er av samme type og dermed har lik solfaktor, er den totale effekten som følge av solstråling gjennom n vinduer i en sone dermed gitt ved

$$p_{istr} = IS \sum_{j=1}^{n} [A_{e\,j} a_j] \tag{3.19}$$

Denne utregningen har blitt vurdert som langt mer detaljert enn det som er nødvendig for å oppnå en tilfredsstillende modell. Mengden energi som stammer fra stråling antas ikke å være stor sett i forhold til de andre energikildene, og systemet antas å ha stor treghet. Dette kombinert med ønsket om en enkel modell, leder til følgende forenklingen der innstrålt effekt i en sone er en skalering av strålingsintensiteten.

$$P_{istr} = IK_{str} \tag{3.20}$$

Den totale energiflyten gjennom vinduene er da gitt ved

$$P_{iv} = P_{Qiv} + P_{i,str} \tag{3.21}$$

$$P_{iv} = U_{iv}A_{iv}(T_{ute} - T_i) + P_{istr} \tag{3.22}$$

3.3 Andre energikilder

I tillegg til de komponentene som er plassert i bygget for å påvirke temperaturen, blir det også tilført energi gjennom belysning og elektrisk utstyr i bygget. En mulig tilnærmingsmåte til å beregne tilført energi fra belysning og utstyr er å bruke en gjennomsnittsverdi for utstrålt energi per m^2. I Habornveien 48B har man derimot tilgjengelig tall for gjennomsnittlig elektrisk energiforbruk. Siden ingen av de elektriske installasjonene lagrer energi på noe måte (med mulig unntak av heisen, men over tid vil den potensielle energien være gjennomsnittlig konstant), betyr det at den tilførte elektriske energien omsettes som varme i bygget. Energibidraget fra elektriske installasjoner kan da beregnes som

$$P_{iel} = K_{iel}P_{eltot} \tag{3.23}$$

der summen av alle $K_{iel} = 1$ og P_{eltot} er det gjennomsnittlige elektriske energiforbruket.

Personene som jobber i bygget tilfører også energi i form av kroppsvarme. Den utstrålte energien er avhengig av aktivitetsnivå, kroppsmasse, forbrenning og påkledning, men dette forenkles til en gjennomsnittlig verdi per person[4]. Totalt utstrålt effekt fra personene i en sone er gitt ved

$$P_{ipers} = N_iP_{pers} \tag{3.24}$$

der N_i er antall personer i sone i og P_{pers} er gjennomsnittlig utstrålt energi per person.

Antall personer i bygget vil variere med tiden på døgnet. Mens man trygt kan anta at bygget er tomt midt på natta, vil det være vanskelig å angi noe eksakt tall for antall mennesker på dagtid, dersom ikke dette måles eller telles på noen måte. Dersom man antar at folk ankommer bygget og drar hjem på forskjellige tidspunkt, og at det er flest mennesker i bygget i en periode midt på dagen, kan antall personer i bygget uttrykkes som en sinusfunksjon som svinger om 0 og har periode på et døgn.

3.4 Oppsummering

Når bidragene fra alle disse energikildene settes inn i (3.7) for sone i blir den totale differensialligningen for endringen i T_i

$$\dot{T}_i = \frac{1}{c_p m}[c_p \omega_{i,inn}(T_{i,inn} - T_i) + U_{ix1}A_{ix1}(T_{x1} - T_i) + U_{ix2}A_{ix2}(T_{x2} - T_i) \ldots + P_{istr} + P_{iel} + P_{ipers}] \tag{3.25}$$

$$\dot{T}_i = \frac{1}{c_p m_i}\left[\sum\left(K_{in}(T_n - T_i)\right) + P_{istr} + P_{iel} + P_{ipers}\right] \tag{3.26}$$

Med den forenklede summasjonsnotasjonen menes her summen av alle bidrag fra soner/komponenter n på sone i. Verdiene som multipliseres med temperaturdifferansene er slått sammen til K_{in} verdier for å forkorte notasjonen. Dette viser også at ved konstante massestrømmer inn, modelleres bidraget fra ventilasjonsaggregatene på samme måte som de andre energikildene.

4 Instrumentering

For å kunne implementere en regulator i et teknisk system må nødvendige målinger gjøres tilgjengelige på et format regulatoren kan lese. I tillegg må regulatoren kunne kommunisere med pådragsorganene. De komponentene som er installert i Habornveien 48B har forskjellig grad av måle- og kommunikasjonsmuligheter. Ventilasjonsaggregatene gir mulighet for avlesing av mange forskjellige målinger, og mulighet til å manipulere flere kontrollsignaler over det godt definerte ModBus-formatet. Gulvvarmeregulatoren tilbyr derimot ingen form for kommunikasjon.

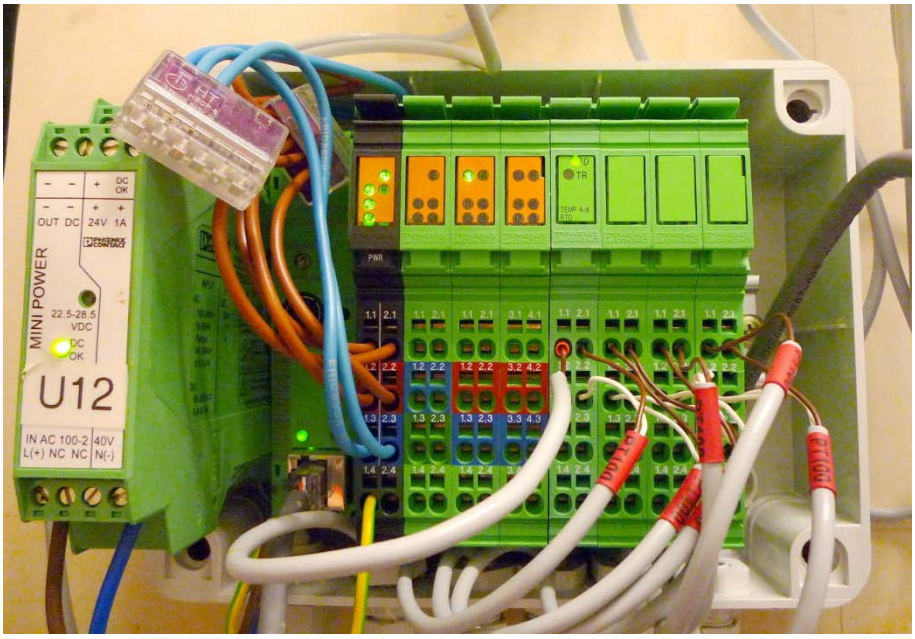
For å kunne implementere et SD har det derfor vært nødvendig å sette opp en del måleinstrumenter, samt å tilrettelegge for kommunikasjon mellom de forskjellige komponentene. Dette arbeidet ble påbegynt sammenheng med arbeidet med fjorårets masteroppgave[1], men det har vist seg nødvendig å utvide instrumenteringen noe.

4.1 Måling

Ventilasjonsaggregatene tilbyr som sagt en rekke målinger, og det har ikke blitt funnet nødvendig å instrumentere dem ytterligere. I fyringsrommet var det derimot ingen målinger tilgjengelige andre enn den USB-baserte trådløse avlesningen av fjernvarmeforbruk. Når et teknisk system skal utstyres med måleinstrumenter, ville det fra et reguleringsteknisk synspunkt vært ønskelig med så mange målinger som mulig. Man ville da fått et svært detaljert innblikk i prosessen, og i dette tilfellet energiflyten, og man ville da kunne hatt luksusen å velge bort sensorer som viser seg å være unødvendige. Når den praktiske gjennomføringen tas i betraktning samt de økonomiske sidene ved å instrumentere hver kvadratmeter i bygget, ender man derimot opp med et begrenset antall sensorer.

4.1.1 PLS

Det er ønskelig å kunne måle temperaturen på vannet på ulike punkter i de forskjellige rørsløyfene som er tilknyttet fjernvarmeanlegget. I sammenheng med Volds masteroppgave ble det montert en programmerbar logisk styringsenhet (PLS) av typen Phoenix ILC 150. Denne har eternettgrensesnitt, støtter OPC-kommunikasjonsstandarden og kan programmeres via PC WORX som er Phoenix' egen programvare. PC WORX er et programmeringsmiljø som støtter flere av de vanlige programmeringsspråkene for PLS, blant annet function block diagram (FBD) og structured text (ST) som har blitt brukt i denne oppgaven. PLS-enheten har både digitale og analoge inn- og utganger, og ekstra moduler kan enkelt kobles på for å utvide funksjonaliteten. For å måle temperaturer er det koblet på en analog temperaturmålingsmodul av typen Phoenix IB IL TEMP 4/8 RTD-PAC. Modulen har åtte kanaler, og det var tilkoblet åtte temperatursensorer plassert på ulike målepunkter inne i fyringsrommet.

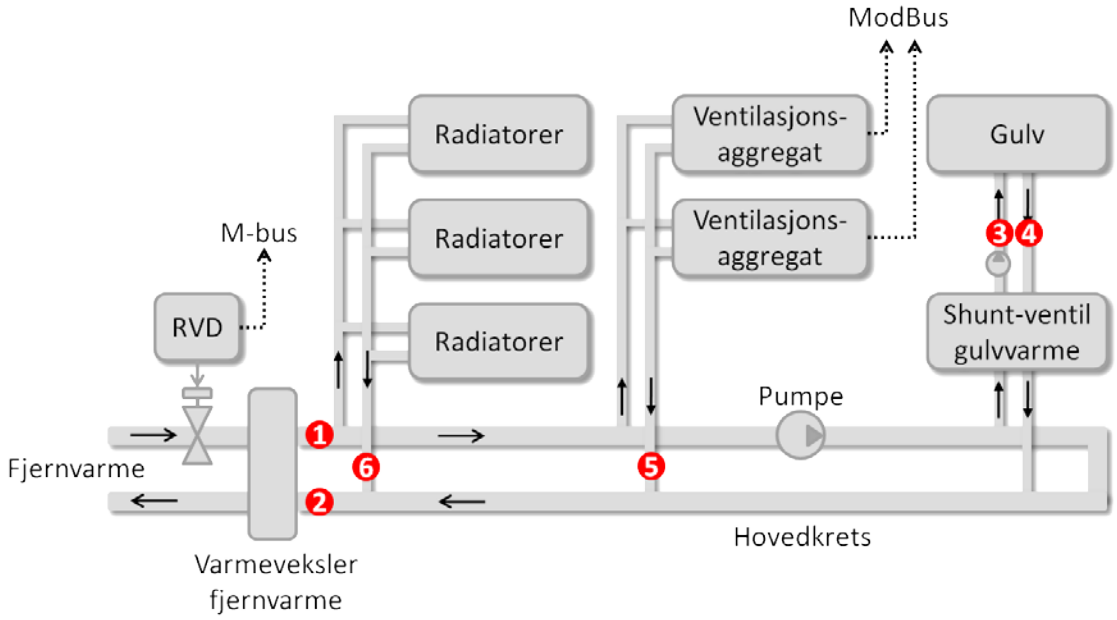


Tabell 4-1 Phoenix ILC 150 med TEMP 4/8 RTD-PAC

Ventilasjonsaggregatene måler til enhver tid temperaturen på returluften som suges ut av rommene i bygget. Siden ventilasjonsanlegget er lagt opp som tidligere beskrevet, representerer disse målingene temperaturen på luftblandingen som kommer fra de to sonene som det gitte ventilasjonsaggregatet påvirker. Det har derfor vært ønskelig å få tilgang til en måling av temperaturen i hver av sonene direkte. For å oppnå dette ble det lagt kabler i taket fra fyringsrommet ut til første etasje og hallen. To av sensorene ble flyttet fra fyringsrommet, og måler nå i stedet lufttemperaturen i disse sonene. Sensorene som ble flyttet ble vurdert som redundante fordi de sto montert på turvannrørene til henholdsvis radiatorene og ventilasjonsaggregatene, og temperaturen i disse rørene vurderes som lik som temperaturen i selve hovedkretsen. I tillegg ble sensoren som sto på returvannrøret til gulvvarmeshuntens hovedkretsside, flyttet til returvannrøret for gulvvarmekretsen. Dette ble gjort fordi temperaturfallet i gulvvarmekretsen regnes som en viktigere måling enn temperaturfallet i shuntventilen. Det sistnevnte temperaturfallet sier mer om energiflyten i selve hovedkretsen enn i bygget. I tillegg ble det i andre etasje montert opp ytterligere en PLS av samme type, med en temperaturmålingsmodul av typen Phoenix IB IL TEMP 2 RTD. Det ble kjøpt inn ytterligere en temperatursensor, og denne ble montert slik at den måler lufttemperaturen i andre etasje. Se Tabell 4-2 for en fullstendig oversikt over plasseringen av temperatursensorene, samt de tilhørende adressene i PLS-enheten. De ulike målepunktene i fyringsrommet er markert med røde punkter i Figur 4-1.

Målepunkt	Plassering	Adresse
1	Hovedkrets tur	U4.1_Ch.1
2	Hovedkrets retur	U4.1_Ch.2
3	Gulvvarmekrets tur	U4.2_Ch.1
4	Gulvvarmekrets retur	U4.2_Ch.2
5	Ventilasjonsaggregater retur	U4.3_Ch.1
6	Radiatorer retur	U4.3_Ch.2
7	Hall	U4.4_Ch.1
8	Første etasje	U4.4_Ch.2

Tabell 4-2 Temperatursensorer

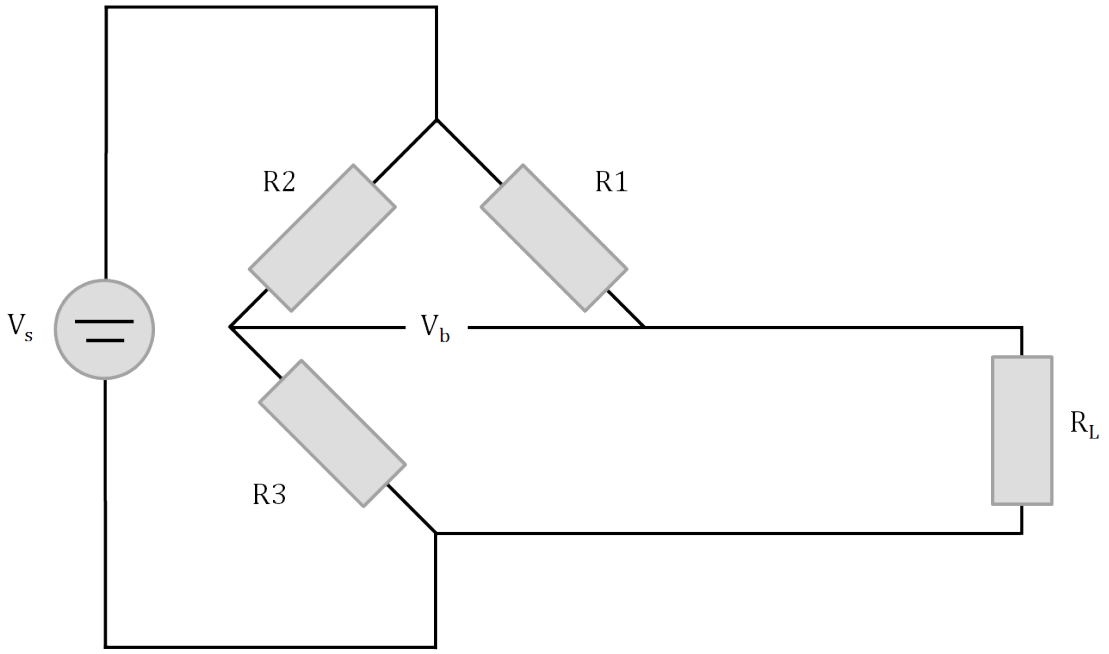


Figur 4-1 Målepunkter

Det var allerede skrevet en FBD-blokk i PC WORX som leser av sensorene og gjør målingene tilgjengelige som OPC-items over eternett. Kjernekoden har ikke blitt forandret nevneverdig, men noen justeringer i strukturen måtte gjøres for å bruke denne koden videre. Endringene som har blitt gjort gjør det mulig å kjøre den eksisterende koden som frittstående blokker i et program som løser flere oppgaver enn kun denne avlesingen. Det er også lagt til støtte for flere ulike avlesingsmetoder på forskjellige sensorer. Den eksisterende FBD-blokka har blitt redusert slik at den tar seg av avlesingen under normal kjøring, og det er skrevet en ny FBD-blokk som konfigurerer temperaturmålingsmodulen ved oppstart. Se vedlagt kode.

Motstandstermometer

For å måle temperatur utnyttes den kjente endringen i elektrisk motstand i platina ved svingninger i temperatur. Ved å måle spenningen over en platinamotstand med kjent elektrisk motstand ved en gitt temperatur, kan temperaturen i motstanden beregnes. Det brukes i hovedsak tre forskjellige tilkoblingsteknikker ved en slik temperaturmåling ved hjelp av henholdsvis to, tre og fire ledere. Ved en to-leder-måling brukes begge lederne til både strømforsyning og spenningsmåling. Spenning påtrykkes én spenningsdeler med kjente verdier R2 og R3, og én spenningsdeler bestående av en kjent motstand R1 og den temperaturavhengige lastmotstanden R_L. Se Figur 4-2.



Figur 4-2 To-lederkobling

Ved å sammenligne spenningen mellom de to spenningsdelerne kan lastmotstanden beregnes.

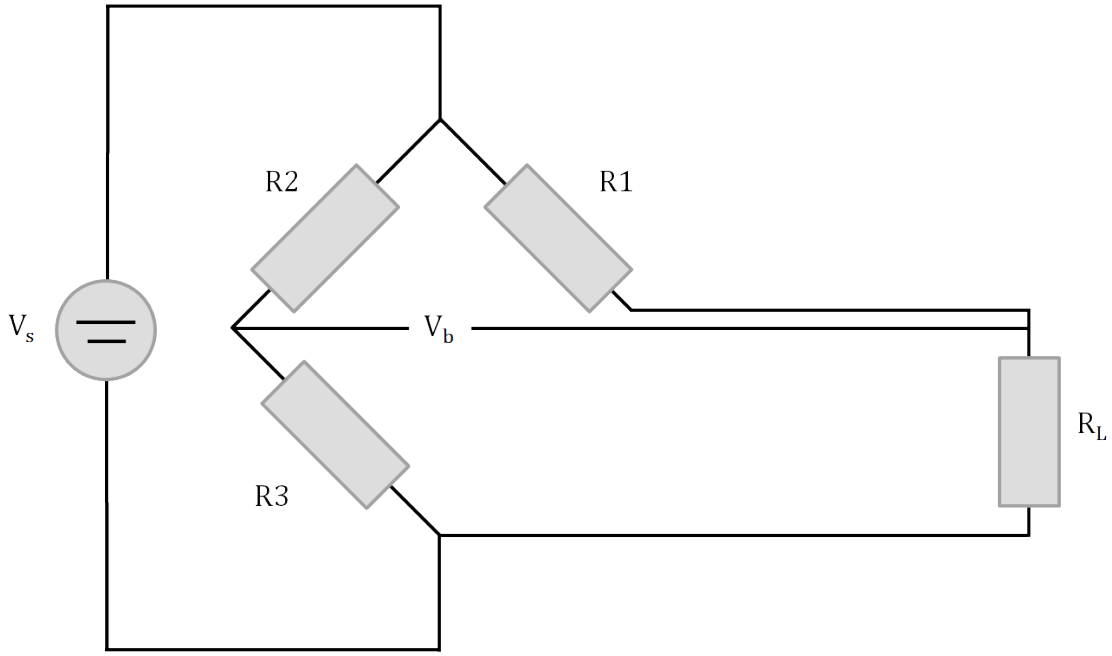
$$V_b = V_s\left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} - \frac{R_L}{R_1 + R_L}\right) \tag{4.1}$$

$$R_L = -\frac{R_1(V_b(R_2 + R_3) - V_s R_3)}{V_b(R_2 + R_3) + V_s R_2} \tag{4.2}$$

Ulempen ved denne minimalistiske løsningen er at motstanden i lederne også måles og gir avvik.

Ved en treledermåling kobles en tredje leder til målemostanden, og målingen gjøres via denne lederen i stedet. Dersom man antar at de tre lederne har lik elektrisk motstand,

og at det ikke går strøm i målelederen, kanselleres motstanden i lederne fordi de kobles inn på hver sin side av spenningsmåleren. Denne metoden er langt mer nøyaktig, men krever også at det brukes mer kobber til lederne, og er dermed mer kostbar.



Figur 4-3 Tre-lederkobling

Tilkoblingsteknikken som gir høyest nøyaktighet er firelederkobling. Ved å sende en kjent strøm I gjennom motstanden via to av lederne, og måle spenningsfallet over motstanden med de to andre, spiller motstanden i lederne i teorien ingen rolle.

Sensorer og Kalibrering

Temperatursensorene som var montert opp i fyringsrommet er ferdig terminerte kabler med to ledere og PT-100-elementer (platinaelement på 100 Ohm ved °0) tilpasset spesielt til å monteres på rør. De av sensorene som fortsatt brukes til å måle temperaturen på rørene i fyringsrommet, er festet med strips og pakket inn i bygningsisolasjon for å gi en pålitelig måling av vanntemperaturen inne i rørene. Siden kabelstrekkene er forholdsvis korte, og siden tilkoblingene allerede var gjort er seks av temperatursensorene koblet til med tolederkobling.

Sensorene som måler lufttemperatur i første etasje og hallen er plassert betydelig lenger unna. Det var derfor ønsket å benytte firelederkoblinger, men siden temperaturmålingsmodulen ikke støtter denne koblingen ble det satt opp en trelederkobling. For ikke å ødelegge de ferdige sensorkablene, er det strukket tre ledere fram til sensoren der de skjøtes med det eksisterende lederparet. Dersom man antar at motstanden i de ferdige sensorkablene er konstant ved alle aktuelle temperaturer, kan

avviket måles og deretter fjernes i programvaren. Referansemålinger i isvann ble gjort, og avviket viste seg å være to grader.

Temperaturmålingsmodulen som er montert i andre etasje støtter firelederkobling, og det har blitt kjøpt et nytt PT-100-element som har blitt koblet opp på den måten. Også her ble det gjort referansemålinger i isvann, men det ble ikke funnet noe målbart avvik. Dette var forventet, og er også et tegn på at denne manuelle kalibreringen med isvann gir gode nok resultater.

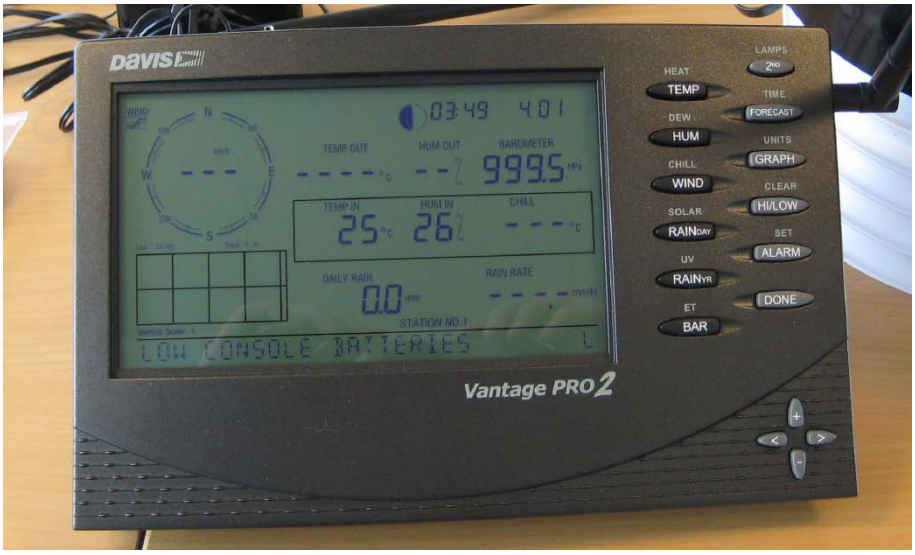
Fjernvarme

Det er ønsket fra Prediktors side å kunne optimalisere reguleringen med hensyn på fyringskostnad. Det var derfor nødvendig å gjøre verdier fra Kamstrupmåleren tilgjengelig. Kamstrupmåleren har som sagt to utgangssignaler der elektriske pulser representerer henholdsvis én kilowatt-time og ti liter volumstrøm, og disse signalene ble koblet til de digitale inngangene på PLS-enheten i fyringsrommet. Ved å telle antall pulser, og ta et rullende gjennomsnitt av antall pulser per sekund de siste 15 minuttene, får man verdier for forbruket i kW og volumstrømmen i L/s. Denne funksjonaliteten ble implementert som programvaremoduler i PLS-enheten.

4.1.2 Værstasjon

Det er nødvendig å kunne måle miljøet utenfor bygget siden det selvfølgelig spiller en stor rolle for innetemperaturen. I sammenheng med Volds masteroppgave ble det kjøpt inn en værstasjon av typen Davis Vantage Pro 2 Plus. Værstasjonen står montert på taket av bygningen, og måler en lang rekke verdier, blant annet temperatur, solstråling, vindretning og vindhastighet. Værstasjonen har trådløs kontakt med en konsoll som står innendørs. I tillegg til å ha en egen skjerm og brukergrensesnitt der verdier kan leses av brukeren, har konsollen også et eternettgrensesnitt. Gjennom eternett kan man få tilgang til værdata via et eget program levert av produsenten, og noe av dataene er også tilgjengelig over internett. Se [1] for nærmere beskrivelse av dette. Konsollen har også et definert programmeringsgrensesnitt (API) som gjør at man kan hente ut værdata med egenskreven programvare.

I tillegg til alle sensorene som er montert i selve værstasjonen, måles også innetemperaturen ved konsollen. Denne står montert i tredje etasje i bygget slik at det også i denne sonen finnes en egen temperaturmåling.



Figur 4-4 Davis-konsollen. Bildet er hentet fra [1]

4.2 Kontroll

I tillegg til måleinstrumentene har det vært nødvendig å utvide mulighetene for kontroll. Alle pådragsorganene i bygget ble styrt av egne kontrollere, men for å oppnå en sentralisert løsning måtte det installeres noe mer elektronikk.

4.2.1 Gulvvarme

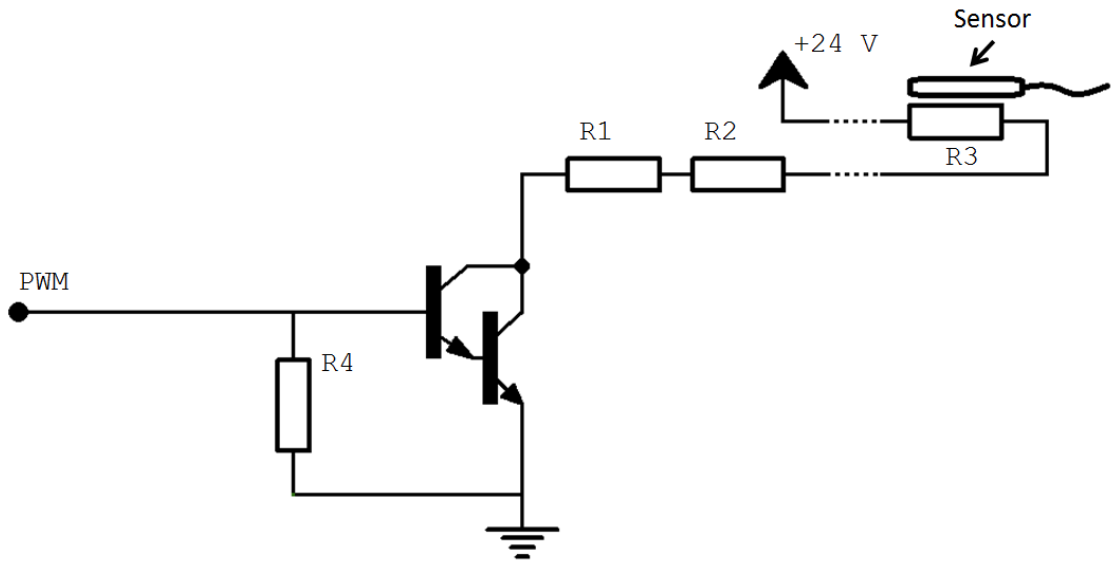
Temperaturen på tur-vannet i gulvvarmesløyfa blir som tidligere nevnt regulert av en Ouman-regulator. Det finnes ingen muligheter for å kommunisere med regulatoren, og den egner seg derfor dårlig i et SD. Det var ikke ønskelig å bruke tid og penger på å skifte ut regulatoren, og det ble i stedet foreslått å se på andre muligheter for å styre gulvvarmen.

Regulatoren baserer sitt pådrag på temperaturmålinger fra en sensor plassert på ytterveggen utenfor fyringsrommet, og det ble tidlig bestemt at denne skulle manipuleres slik at en annen enn den sanne utetemperaturen ble målt. Det har vist seg vanskelig å finne teknisk informasjon om regulatoren, men temperaturmålingen foregår antakeligvis med en av metodene beskrevet i kapittel 4.1.1. Én mulighet er derfor å koble ut temperatursensoren og manipulere inngangssignalet på regulatoren direkte. Siden det er uvisst hva slags elektronikk som er koblet til inngangen og i frykt for å ødelegge regulatoren, ble det valgt å gå bort fra denne strategien. Den andre muligheten er å påvirke temperaturen ved sensoren, og den enkleste måten å gjøre dette på er å varme den opp. Regulatoren har som nevnt seks forskjellige vanntemperatur/utetemperatur-kurver brukeren kan velge mellom. Ved å velge den bratteste av disse vil vanntemperaturen i utgangspunktet reguleres for varm i forhold til den ønskede gulvtemperaturen. Ved å varme opp temperatursensoren oppnår man at vanntemperaturen senkes, og på denne måten kan man påvirke regulatoren.

Oppvarming av temperatursensor

Oppvarmingen av sensoren foregår ved å sende strøm gjennom en effektmotstand som er festet til selve sensoren på utsiden av bygget. Strømmen gjennom motstanden kan enten varieres ved å variere spenningen over den trinnløst, eller ved pulsviddemodulering (PWM). PWM fungerer ved at man skrur spenningen av og på istedenfor å variere den trinnløst, og den tilførte gjennomsnittlige effekten bestemmes av hvor lenge spenningen påtrykkes i forhold til hvor lenge den kobles ut. Fordelen med PWM i denne sammenheng er at den kan implementeres enkelt ved å bruke en av de digitale utgangene på PLS-enheten til å styre en transistor, framfor å lage en mer komplisert analog krets.

Det ble bygget en krets for å sørge for oppvarming av sensoren. Den ble bygget delvis av komponenter som allerede fantes hos Prediktor, og designet er til en viss grad påvirket av det. Det ble brukt tre effektmotstander på 22 Ohm hver, som tåler opptil 50 W, hvorav den ene av dem ble plassert utendørs festet til sensoren. Det ble brukt en Darlingtontransistor til å skru strømmen gjennom effektmotstandene av og på, samt en egen spenningskilde til å forsyne effektmotstandene. Komponentene ble loddet på et laboratoriekort, og tilkoblet PLS-enheten og effektmotstanden utendørs, se Figur 4-5.



Figur 4-5 Kretsskjema for PWM-krets

Det ble skrevet en ST-blokk til PLS-enheten som realiserer et PWM-signal på den ene av de digitale utgangene. Se Vedlegg A for PC WORX-kode.

En viktig begrensning med denne løsningen er at man kun har mulighet til å varme sensoren opp, ikke kjøle den ned. Dette medfører at man kan øke temperaturen

forholdsvis raskt, mens den egentlige utetemperaturen bestemmer hvor raskt den målte temperaturen faller. Den målte temperaturen kan aldri bli lavere enn den faktiske utetemperaturen, og man kan derfor heller aldri oppnå en høyere vanntemperatur enn regulatoren ville gitt dersom sensoren var upåvirket. Når utetemperaturen er så høy at regulatoren går i metning (dette skjer ved en utetemperatur på rundt 12 °C og gir en vanntemperatur på 20 °C), har man ingen mulighet til å påvirke regulatoren.

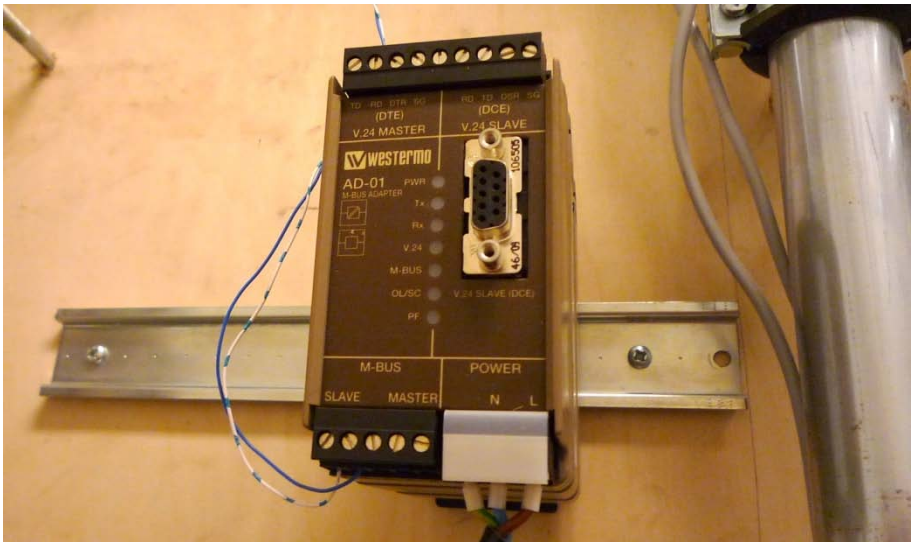
En annen begrensing er at temperaturen tur-vannet i gulvet ikke kan settes lavere enn returvannet. Dette kommer av at gulvvarmekretsen henter sin energi fra hovedkretsen som under normale forhold alltid holder en høyere temperatur (rundt 60 °C). Vannet i gulvkretsen kan med andre ord kun varmes opp, ikke kjøles ned, og man er avhengig av at energien avgis til gulvet for at temperaturen skal synke.

Disse begrensingene spiller store roller for reguleringen av gulvvarmen, og medfører at man har mye dårligere kontroll på gulvvarmen når utetemperaturen nærmer seg 12 °C.

4.2.2 Hovedkrets fyringsrom

Temperaturen i hovedkretsen i fyringsrommet blir som tidligere nevnt regulert av en RVD235-regulator. Denne sørger for at temperaturen på vannet som de forskjellige komponentene henter sin energi fra er høy nok, og det er strengt tatt ikke nødvendig for et SD å ha kontroll på dette for å oppnå tilfredsstillende resultater med tanke på innetemperatur. Dersom man vil minimere fyringsutgiftene spiller dette derimot en rolle. Tariffen som prisen for fjernvarme beregnes ut ifra, baserer seg på det høyeste målte forbruket per dag, og det er derfor ønskelig å unngå høye topper i energiforbruket.

Det er som tidligere nevnt mulig å kommunisere med regulatoren via M-bus. Det ble montert et M-bus-modem som fungerer som et bindeledd mellom RS-232-standarden (seriell kommunikasjon) og M-bus. PLS-enheten i fyringsrommet har også mulighet for seriekommunikasjon, og modemet ble koblet inn mellom denne og regulatoren.



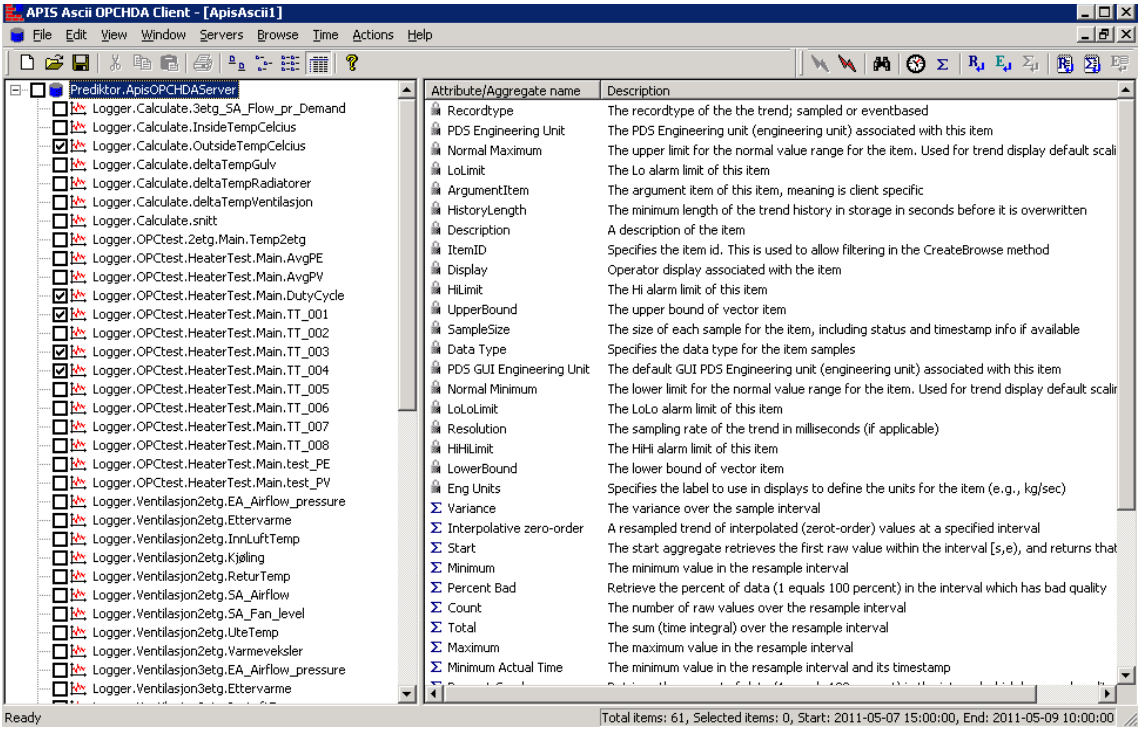
Figur 4-6 M-bus-modem

4.3 Overordnet SD

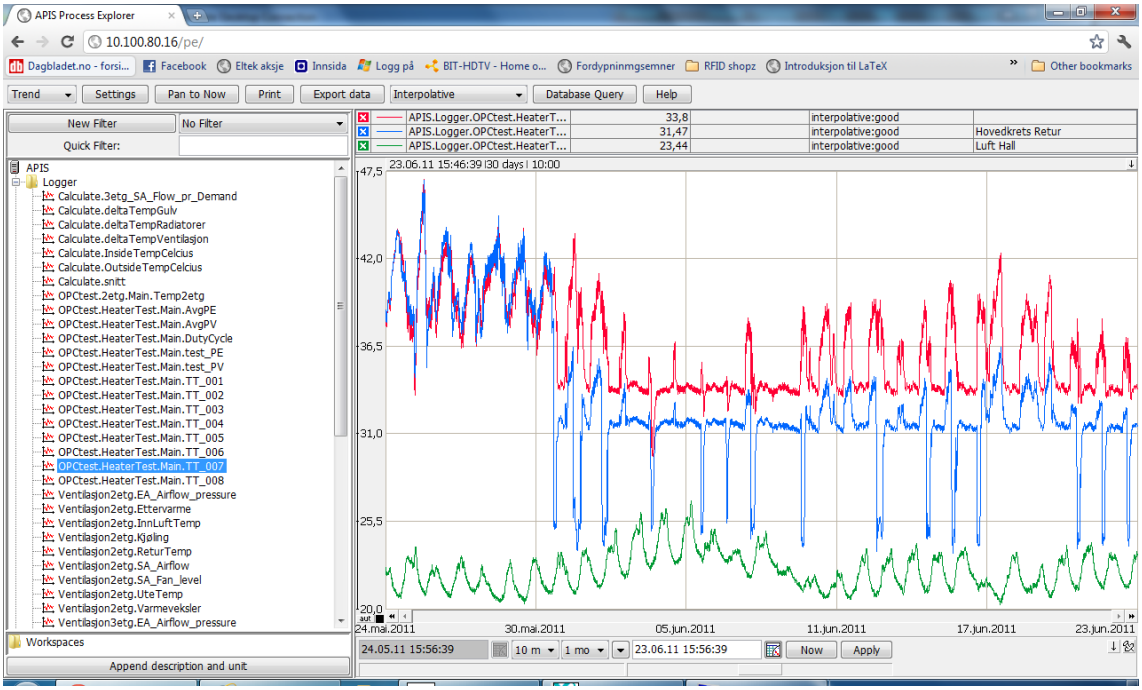
Et SD må kunne kommunisere med de forskjellige komponentene i bygget. Ventilasjonsaggregatene kommuniserer via ModBus, PLS-enhetene bruker OPC og værstasjonen krever spesiallaget programvare som oppfyller dens API. Felles for alle disse er at de bruker eternett som kommunikasjonsmedium, noe som gjør det enkelt å sette opp SD på en vanlig PC. Dette kapittelet gir en kort orientering om programvaren som benyttes.

4.3.1 APIS

APIS er en programvarepakke som Prediktor har utviklet til bruk i industrielle IT-løsninger. Et kjernekonsept i APIS er ApisHive. En instans av ApisHive kan inneholde flere moduler kalt Bees (bier). Disse modulene har forskjellig funksjonalitet, som for eksempel kommunikasjon via definerte protokoller som OPC eller ModBus eller matematisk manipulering av variabler. I tillegg er det lagt opp til at variabler som blir avlest av de ulike modulene kan logges i Apis' egen database kalt HoneyStore. Data som ligger lagret i databasen kan hentes ut som tallverdier ved hjelp av programmet Apis Ascii eller presenteres som grafer i Apis Process Explorer.



Figur 4-7 Skjermdump fra Apis Ascii



Figur 4-8 Skjermdump fra Process Explorer

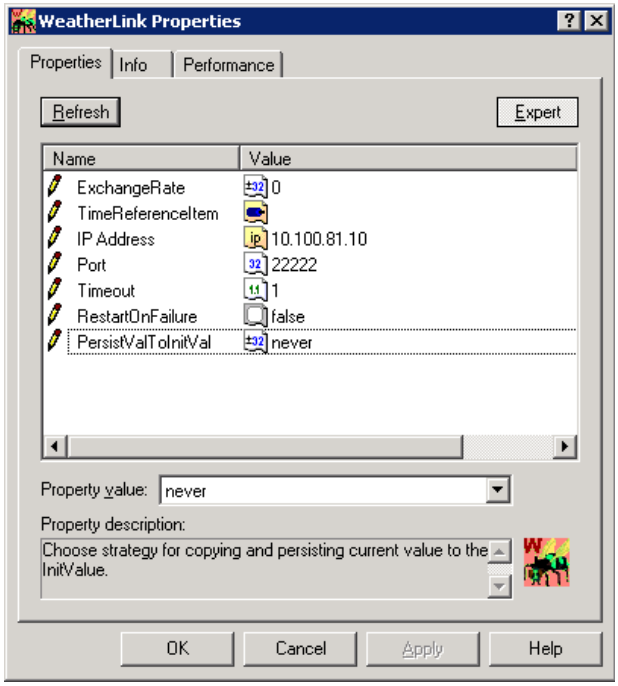
I ApisHive-instansen kalt “test” som er satt opp for å samle inn data, brukes modulene ApisOPC og ApisModbus til å kommunisere med henholdsvis PLS-enhetene og

ventilasjonsaggregatene. Noen av variablene som brukes er kun funksjoner av variabler som sendes fra de forskjellige enhetene (for eksempel temperaturdifferanser), og til dette brukes modulen ApisCalculate. Kommunikasjon med værstasjonen gjøres med modulen ApisWeatherLink som er spesiallaget til formålet.

I tillegg til instansen ”test” er det også satt opp en egen instans kalt ”ApisHive” som kommuniserer med ModFrame (se kapittel 4.3.2) og ventilasjonsanlegget.

Spesialutviklede Apis-bier

I sammenheng med denne oppgaven har det blitt skrevet to spesialutviklede Apis-bier. ”ApisWeatherLinkBee” er skrevet for å kommunisere med værstasjonen, og er designet i henhold til dens API. Denne bia setter opp værstasjonen til å gi målinger med metriske måleenheter, og henter ut måleverdiene med jevne mellomrom. Blant innstillingene som må gjøres for å få bia til å fungere er IP-adressen og porten til værstasjonkonsollen.



Figur 4-9 Skjermdump fra WeatherLinkBee, ”Properties”-vindu

”ApisYrBee” er skrevet for å laste ned værmeldinger i xml-format fra Meteorologisk Institutts hjemmesider. Adressen informasjonen hentes fra er http://api.met-no/weatherapi/locationforecast/1.8/?lat=59.19;lon=10.95 der den siste delen av adressen angir lengde- og breddegrad for Habornveien 48B på nærmeste to desimaler. Bia gir mulighet til å hente inn spådde verdier for blant annet temperatur og skydekke for en viss periode framover i tid.

4.3.2 ModFrame

ApisHive-instansene tar seg av kommunikasjon over nettverket og logging av variablene. Til selve styringen brukes et annet Prediktorutviklet program kalt ModFrame. ModFrame

gjør det mulig å sette opp styringsalgoritmer og reguleringssløyfer, og det er i dette programmet en eventuell regulator skal implementeres.

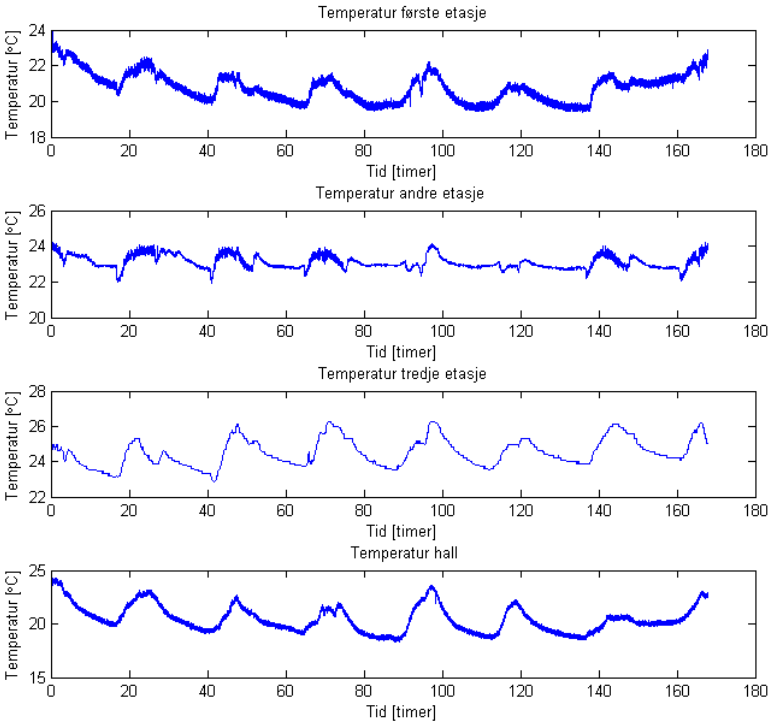
4.3.3 Virtuell PC

Et SD er avhengig av å være online til enhver tid. På grunn av dette, og for å gjøre det enkelt for flere forskjellige brukere å betjene programvaren, blir det brukt en virtuell PC som kjører på Prediktors servere framfor en fysisk PC. Windows Server 2003 R2 blir brukt som operativsystem, APIS Hive versjon 4.4.0.6 er installert. For å bruke den virtuelle maskinen oppretter man en Remote Desktop-tilkobling til dens IP-adresse i Habornveien 48B 10.100.80.16.

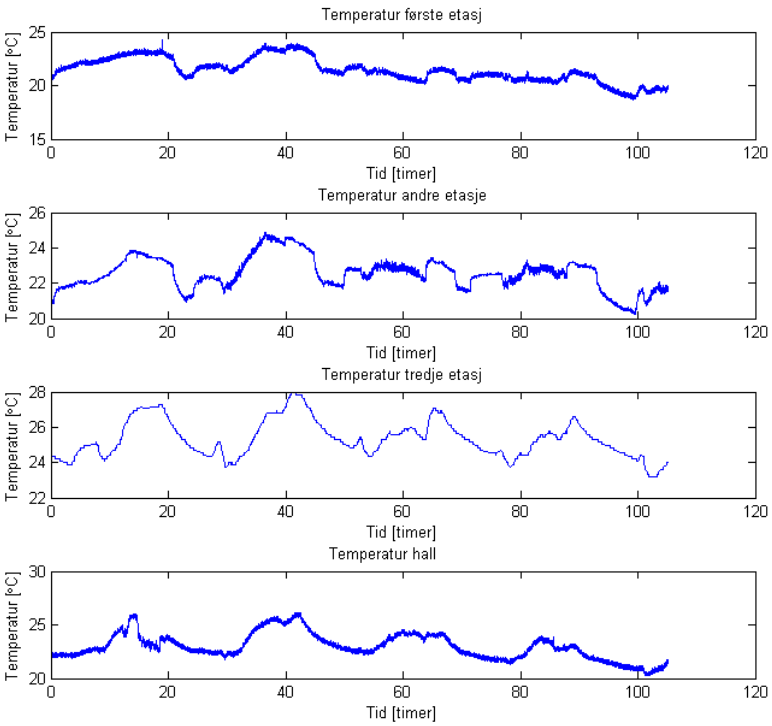
4.4 Datainnsamling

For å kunne validere en modell av systemet har det vært nødvendig å samle inn dataserier over tid, slik at modellens oppførsel kan sammenlignes med oppførselen til det fysiske systemet. All data som måles av de ulike sensorene i systemet, samt verdier for settpunkter og pådrag, logges i databasen Honeystore.

De relevante dataene har blitt hentet ut ved hjelp av Apis Ascii som leverer dataene som et tekstdokument. Deretter har dette tekstdokumentet blitt importert til et xls-dokument (Microsoft Ecxel) som igjen har blitt importert til MATLAB og lagret som *.mat-filer. Det har i hovedsak blitt brukt to datasett, ett som spenner over en uke i mars (fra og med 15. mars klokka 13:11:12 til og med 22. mars klokka 13:10:42), og ett som spenner over en firedagersperiode i mai (fra og med 08.mai klokka 00:00:12 til og med 12.mai klokka 09:06:42). Datasettene har samplingsperiode på 30 sekunder.



Figur 4-10 Temperaturer i hver av etasjene og hallen for perioden i mars



Figur 4-11 Temperaturer i hver av etasjene og hallen for perioden i mai

5 Tilstandsrommodell

I kapittel 3 ble det funnet en matematisk modell for temperaturendringen i en gitt sone i bygget. Det er ønskelig å sette opp denne modellen på tilstandsromform både fordi den da blir langt mer kompakt og oversiktlig, men også fordi dette gjør det langt enklere å behandle modellen i simuleringsprogramvare, som for eksempel MATLAB. Det er også ønskelig at denne modellen skal være lineær. Dette forenkler kontrollproblemet og analysen av selve modellen. Den ønskede formen blir da som følger

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{5.1}$$

Med n tilstander og m pådrag vil da A være en matrise med dimensjoner $n \times n$, x er en n lang stående vektor (tilstandsvektoren), B er en matrise med dimensjoner $n \times m$ og u er en m lang stående vektor (pådragsvektoren). Hver linje i (5.1) representerer en førsteordens differensialligning, og ved å omorganisere (3.26) oppnås den ønskede strukturen med temperaturene T_i som tilstand

$$\dot{T}_i = \frac{1}{c_p m_i}\left[-\sum(K_{in} + K_{iu})\,T_i + \sum(K_{in}T_n) + \sum(K_{iu}T_u) + \sum(K_{im}P_m)\right] \tag{5.2}$$

Her representerer K_{in} koblingen mellom tilstanden T_i og tilstand T_n, og de to første summene utgjør dermed elementer i matrisa A. Elementene K_{iu} representerer koblingen mellom pådraget T_u og tilstanden T_i for de pådragene som modelleres som varmeoverganger. Elementene $K_{im}P_m$ utgjør koblingen mellom tilstanden $T_i$og de pådragene P_m som modelleres som rene effekttilførsler. K_{iu} og K_{im} utgjør elementer i B-matrisa. Faktoren $\frac{1}{c_p m_i}$ skalerer systemet, er et uttrykk for tregheten og multipliseres med hvert element i tilsvarende rad i A- og B-matrisene.

5.1 Tilstander

Når tilstandene skal velges er det naturlig å velge temperaturen i hver av sonene første etasje, andre etasje, tredje etasje og hallen som egne tilstander. Disse blir som nevnt målt av PLS-enhetene i første og andre etasje samt værstasjonskonsollen. I tillegg har det blitt valgt å inkludere temperaturen i gulvet på bakkeplan og temperaturen i radiatorene som egne tilstander og det er flere årsaker til dette. Det er ingen måling av temperaturen i selve gulvet eller radiatorene tilgjengelig, i stedet måles temperaturen på turvannet i de tilhørende rørsløyfene. Siden modellen (3.26) er basert på temperaturdifferansene mellom de ulike komponentene og sonene, blir det vanskelig å bruke temperaturen i selve radiatorene og temperaturen i gulvet som egne pådrag. Dersom dette skulle gjøres måtte uansett disse temperaturene modelleres som

funksjoner av sine respektive vanntemperaturer, og da kan dette like gjerne gjøres i hovedmodellen. Et annet poeng er at energiutvekslinga påvirker både lufttemperaturen i sonene, og temperaturen i radiatorene og gulvet. Det vurderes da som bedre å modellere dette direkte framfor å utlede dette fra returvanntemperaturene utenfor modellen. Tregheten i temperaturdynamikken i radiatorer og gulv lar seg også enkelt inkludere dersom disse temperaturene inkluderes som tilstander.

Når temperaturen i radiatorene settes opp, ville det vært ønskelig å kunne la radiatorene i hver sone utgjøre hver sin tilstand, men dette blir problematisk med tanke på målingene som er tilgjengelige. Det eksisterer som sagt ikke noen direkte måling av radiatortemperaturen, og vanntemperaturen måles kun på et sted, nemlig i fyringsrommet. I tillegg ønskes en enkel, men tilstrekkelig modell som mulig. Derfor modelleres radiatortemperaturen som én tilstand, og denne vil representere en middelverdi for temperaturen i alle radiatorene i bygget. Det antas da at temperaturene vil være sterkt knyttet til temperaturen på turvannet, og at de ikke varierer for mye. Temperaturforskjellene vil til en viss grad kunne veies opp for ved å justere verdiene for $k_{r,i}$ for de forskjellige sonene.

Tilstandsvektoren x utgjør dermed følgende tilstander

$$x = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_g \\ T_r \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} Lufttemperatur\ første\ etasje \\ Lufttemperatur\ andre\ etasje \\ Lufttemperatur\ tredje\ etasje \\ Lufttemperatur\ glasshall \\ Temperatur\ gulv \\ Temperatur\ radiatorer \end{matrix} \tag{5.3}$$

Når (5.2) settes opp for hver av tilstandene vil den første av summene i uttrykket (den som multipliseres med T_i) utgjøre diagonalen i A. Dersom denne summen uttrykkes som K_{ii} er diagonalelementene i A gitt som

$$K_{11} = K_{12} + K_{1h} + K_{1g} + K_{1r} + K_{1u} + K_{1l} \tag{5.4}$$
$$K_{22} = K_{12} + K_{23} + K_{2h} + K_{2r} + K_{2u} + K_{2l} \tag{5.5}$$
$$K_{33} = K_{23} + K_{3h} + K_{3r} + K_{3u} + K_{3l} \tag{5.6}$$
$$K_{hh} = K_{1h} + K_{2h} + K_{3h} + K_{hg} + K_{hr} + K_{hu} + K_{hl} \tag{5.7}$$
$$K_{gg} = K_{hg} + K_{1g} + K_{gv} \tag{5.8}$$
$$K_{rr} = K_{1r} + K_{2r} + K_{3r} + K_{hr} + K_{rv} \tag{5.9}$$

Differensialligningene for systemet i sin helhet er gjengitt i Vedlegg B.

5.2 Pådrag

De tilgjengelige pådragsorganene i Habornveien 48B er ventilasjonsaggregatene og gulvvarmen. I tillegg kommer de energikildene man ikke har kontroll over; radiatorene, utetemperaturen, elektrisk utstyr og personene i bygget.

Som det allerede framgår av (5.2) er det temperaturen på ventilasjonslufta som har blitt valgt som pådrag. Målinger av disse temperaturene gjøres av ventilasjonsaggregatene selv. Som vist i (3.25) er energiflyten som følge av ventilasjonsluften lik produktet av varmekapasiteten til luft, massestrømmen og temperaturdifferansen. Når ventilasjonslufttemperaturen brukes som pådrag betyr det at massestrømmen ω_{inn} inngår i både A- og B-matrisa. Dette er problematisk siden massestrømmen ikke er konstant, noe som gjør modellen tidsvariant. Dette kan løses ved å utnytte at massestrømmen er konstant store deler av døgnet, siden den endres mellom to faste verdier kun to ganger i døgnet, og skifte mellom to modeller på disse tidspunktene.

Massestrømmen kan beregnes ut fra volumstrøm-målinger som er tilgjengelige fra ventilasjonsaggregatene. Denne volumstrømmen blir fordelt mellom sonene, og fordelingen er ikke uten videre gitt. Første- og andre etasje er som sagt svært like i utforming, og dette kan lede til antakelsen om at massestrømmen fra ventilasjonsaggregatet fordeles likt mellom disse sonene. Hallen og tredje etasje er derimot ikke like, og det er vanskeligere å gjøre en god antakelse om fordeling her. Den totale luftmassestrømmen fra aggregatene i andre- og tredje etasje betegnes som henholdsvis ω_2 og ω_3.

Pådragene som hører til gulvvarmen og radiatorene er satt som temperaturene på turvannet i de to rørsløyfene, og målingene av disse kommer fra PLS-enheten i fyringsrommet. Videre blir utetemperaturen og solstrålingsintensiteten brukt som egne pådrag, og målingene kommer fra værstasjonen. Den totale elektriske energien omsatt i bygget er også et eget pådrag, i tillegg til en sinuskurve som representerer antall personer i bygget.

Merk at det her er antatt at temperaturen på turvannet i gulvet kan reguleres raskt nok til å brukes som et pådrag direkte. Dette avhenger av at kontrollen med oppvarming av utetemperatursensoren til gulvvarmeregulatoren er god nok. Det er den åpenbart ikke når utetemperaturen stiger til et nivå der regulatoren går i metning. Dette vurderes ikke som et stort problem siden gulvvarmen uansett ikke vil være nødvendig ved høyere utetemperatur, men dette må tas høyde for når regulatoren designes.

Pådragsvektoren u består dermed av følgende pådrag

$$u = \begin{bmatrix} T_{v1} \\ T_{v2} \\ T_{g,tur} \\ T_{r,tur} \\ T_u \\ I \\ P_{eltot} \\ N_{pers} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} Temperatur\ ventilasjonsluft\ 1.og\ 2.etg \\ Temperatur\ ventilasjonsluft\ 3.etg\ og\ hall \\ Temperatur\ turvann\ gulv \\ Temperatur\ turvann\ radiatorer \\ Temperatur\ ute \\ Strålingsintensitet\ fra\ sol \\ Totalt\ omsatt\ elektrisk\ effekt \\ Kvalitativt\ uttrykk\ for\ personer\ i\ bygg \end{matrix} \tag{5.10}$$

5.3 A- og B-matriser

Med notasjonen beskrevet i første del av kapittel 5 blir A- og B-matrisene som følger

$$A = M_s * \begin{bmatrix} -K_{11} & K_{12} & 0 & K_{1h} & K_{1g} & K_{1r} \\ K_{12} & -K_{22} & K_{23} & K_{2h} & 0 & K_{2r} \\ 0 & K_{23} & -K_{33} & K_{3h} & 0 & K_{3r} \\ K_{1h} & K_{2h} & K_{3h} & -K_{hh} & K_{hg} & K_{hr} \\ K_{1g} & 0 & 0 & K_{hg} & -K_{gg} & 0 \\ K_{1r} & K_{2r} & K_{3r} & K_{hr} & 0 & -K_{rr} \end{bmatrix} \tag{5.11}$$

$$B = M_s * \begin{bmatrix} K_{1l} & 0 & 0 & 0 & K_{1u} & K_{1s} & K_{1el} & K_{1p} \\ K_{2l} & 0 & 0 & 0 & K_{2u} & K_{2s} & K_{2el} & K_{2p} \\ 0 & K_{3l} & 0 & 0 & K_{3u} & K_{3s} & K_{3el} & K_{3p} \\ 0 & K_{hl} & 0 & 0 & K_{hu} & K_{hs} & K_{hel} & 0 \\ 0 & 0 & K_{gv} & 0 & 0 & 0 & K_{gk} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{rv} & 0 & 0 & K_{rk} & 0 \end{bmatrix} \tag{5.12}$$

$$M_s = \begin{bmatrix} (m_1 c_{pl})^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (m_2 c_{pl})^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (m_3 c_{pl})^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (m_h c_{pl})^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (m_g c_{pb})^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (m_r c_{ps})^{-1} \end{bmatrix} \tag{5.13}$$

Matrisa M_s står for skaleringen med den termiske massen i hver av differensialligningene. 0-verdiene i A og B kommer av at ikke alle tilstandene regnes å

påvirke hverandre direkte (for eksempel temperaturene i første- og tredje etasje), og at ikke alle pådragene regnes å virke inn på alle tilstandene.

5.4 Modellidentifisering

Tilstandsrommodellen består av 46 konstanter som er ulike 0, som igjen er basert på over dobbelt så mange fysiske verdier. Dette gjør jobben med å justere modellen etter den målte oppførselen svært vanskelig å gjøre manuelt. For å sette denne justeringsjobben i system har MATLAB-komponenter fra ”System Identification Toolbox” og ”Optimization Toolbox” blitt brukt. Denne programvaren gir flere muligheter til å identifisere modellparametre, både for lineære og ulineære modeller, og flere metoder har blitt testet for å komme så nærme som de målte dataene som mulig. Ved å bruke de målte dataene til å beregne alle pådragene som effekt snarere enn temperaturer, kan man oppnå en lineær tidsinvariant modell. Ved å utnytte dette har flere av de lineære metodene for modellidentifikasjon blitt utprøvd, men med dårlig resultat. Det ble prøvd både med såkalt ”black box”-modellering, der algoritmen kun bruker de målte dataene til å utforme en modell, og såkalt ”grey box”-modellering, der man kan bruke kunnskap om det fysiske systemet til å sette opp modellstrukturen før algoritmen starter.

Metoden som har gitt resultater er modellidentifikasjon basert på ulineær grey box, brukt på den lineære modellen utledet i forrige delkapittel. I MATLAB gir denne framgangsmåten både mulighet til å sette opp modellstrukturen og til å sette beskrankinger på parameterne, noe de lineære metodene ikke gir mulighet til. Framgangsmåten er i grove trekk som følger: Først har det blitt laget et iddata-objekt basert på målingene fra bygget, som deretter har blitt filtrert for å eliminere målestøyen. Deretter har modellstrukturen blitt satt opp som differensialligninger, og basert på disse har det blitt opprettet et idnlgrey-objekt. Når dette objektet er opprettet kan verdier og beskrankinger settes for de ulike parametrene, og initialverdier settes for tilstandene. Da idnlgrey-objektet hadde blitt satt opp ble funksjonen pem() kjørt. pem() justerer modellparametrene slik at utgangene fra idnlgrey-objektet nærmer seg dataene i iddata-objektet. Dette blir gjort ved å løse et ulineært optimaliseringsproblem basert på differensialligningene i modellen ved hjelp av MATLAB-algoritmen lsqnonlin.

Et av problemene med metoden som bruker lineær grey box, har vært at modellparametrene har blitt justert slik at de får feil fortegn. Parametrene er basert på fysiske størrelser, og feil fortegn vil tilsvare negative verdier for masse eller areal, eller at energiflyten går fra områder med lav temperatur til områder med høy temperatur. Viktige beskrankinger på parametrene har derfor vært riktig fortegn, og dette har blitt satt for alle parametrene. I tillegg er det antatt at noen av parametrene må være av samme størrelsesorden, som for eksempel effekten fra solinnstråling i de tre etasjene.

Mens selve størrelsen på disse parametrene begrenses av at de må være større enn null, begrenses også forskjellen mellom dem. Dette har blitt implementert ved at den ene av de aktuelle verdiene estimeres, mens de andre begrenses til å være for eksempel minst halvparten så stor, og maks dobbelt så stor som den førstnevnte. Parametrene denne type begrensing er satt for er K_{12} og K_{23} (termisk kobling mellom etasjene), K_{1h}, K_{2h} og K_{3h} (termisk kobling mellom etasjene og hallen), K_{1r}, K_{2r}og K_{3r} (termiske koblinger til radiatorene), K_{1g} og K_{hg} (termisk kobling mellom første etasje og hallen og gulvet) og K_{1s}, K_{2s} og K_{3s} (effekt fra solinnstråling i hver av etasjene). I tillegg er det lagt til to parametre K_{gk} og K_{rk}, som vil multipliseres med det konstante pådraget P_{eltot}, og bidra til temperaturendring i gulv og radiatorer. På denne måten sikres det at alle tilstandene modelleres med en bias.

De varierende massestrømmene ω_2 og ω_3 fra ventilasjonsaggregatene har blitt lagt til som egne pådrag i iddata-objektet som rene sprang mellom dag- og nattverdiene. Som vist i Vedlegg C er verdiene for K_{1l}, K_{2l}, K_{3l} og K_{hl} avhengige av disse massestrømmene.

5.4.1 Initialverdier

For å sette tallverdier på de ulike modellparameterne, har det blitt tatt utgangspunkt i kunnskap og antakelser om det virkelige systemet. Verdiene for gulvarealene er basert på plantegninger over bygget, og arealene mellom de tre etasjene er satt lik disse. De resterende arealene og mål for takhøyden og gulvtykkelsen er hentet fra [1]. Verdiene for varmeovergangskonstantene for vegger, tak og vinduer samt solfaktoren på vinduene er basert på retningslinjene i NS-3031[4].

Varmeovergangskonstantene for gulv og radiatorer er satt lik varmeovergangskonstantene mellom henholdsvis luft og betong, og luft og stål. Verdien for den gjennomsnittlige totale omsatte elektriske effekten i bygget er basert på opplysninger fra Helge Mordt i Prediktor AS, og verdiene for de ulike vannstrømmene er hentet fra et måleskjema også levert av Helge Mordt, se Vedlegg D.

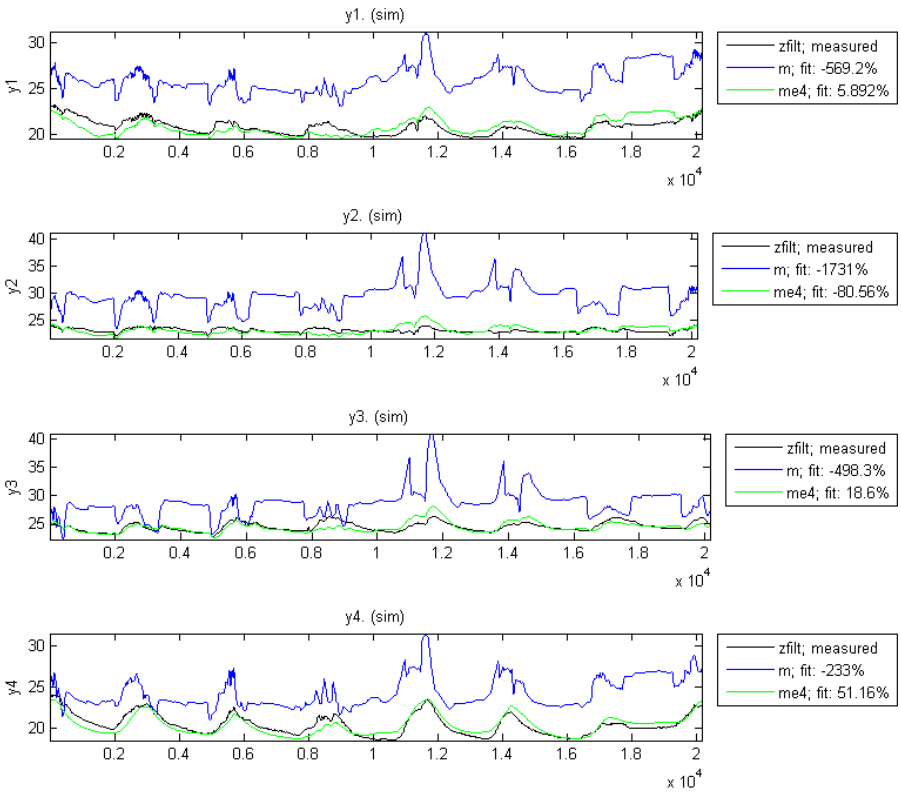
Amplituden på sinuskurven som representerer antall personer i bygget er satt til én. Verdien for de tilhørende elementene i B-matrisa representerer derfor produktet av antall personer i den gitte etasjen, og utstrålt effekt per person. Denne effekten varierer fra person til person, og er i tillegg avhengig av blant annet fysisk aktivitetsnivå, kroppsstørrelse, romtemperatur og bekledning. Det finnes detaljerte formler for å regne ut denne effekten for hvert individ ut ifra blant annet totalt hudareal, men det er ikke ansett som hensiktsmessig med en så detaljert utregning. I stedet har det blitt brukt en verdi for gjennomsnittlig utstrålt effekt for et voksent menneske med aktivitetsnivå tilsvarende stillesittende arbeid i romtemperatur[4]. Verdien for antall personer i hver etasje representerer i denne sammenheng maksantallet i løpet av dagen, og er hentet fra [1].

Som nevnt er hvert av elementene i A- og B-matrisene skalert med varmekapasiteten og massen assosiert med den differensialligningen de representerer. Dette medfører at alle elementene i de fire øverste radene er dividert med varmekapasiteten for luft og massen til lufta i den tilsvarende sonen. Rad fem og seks utgjør ligningene for temperaturen i henholdsvis gulvet og radiatorene. Hvert av elementene er her dividert med varmekapasiteten for henholdsvis betong og stål, og massen til henholdsvis gulvet og radiatorene. Verdiene for massene i hver av sonene er beregnet ut ifra sonens totale volum og tettheten for luft, og gulvets masse er beregnet ut ifra gulvarealet, gulvtykkelsen og tettheten for betong. Massen til radiatorene er beregnet ut ifra antall radiatorer i bygget, hentet fra[1], og et anslag for masse per radiator hentet fra den tekniske spesifikasjonen for radiatortypen ”Therm X2” innhentet fra Variant VVS AS, se Vedlegg E. Se Vedlegg F for initialverdier av A og B.

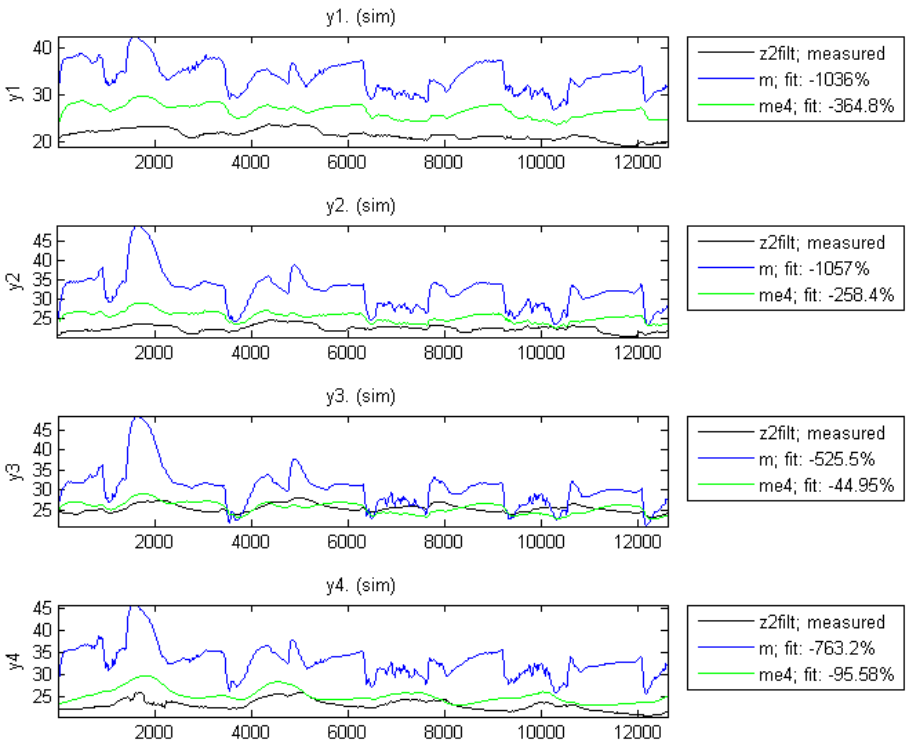
5.4.2 Endelig modell

Etter 60 iterasjoner av lsqnonlin har kostfunksjonen blitt redusert fra 28,86 til 0,45, og reduksjonen i hver iterasjon har flatet ut.

MATLAB-funksjonen compare() har blitt brukt til å sammenligne simuleringsresultat fra modellen med målinger fra datasett. Figur 5-1 viser resultatene for idnlgrey-modellen før og etter justeringen av parametrene, når de simuleres- og sammenlignes med datasettet modellidentifiseringen er basert på. Datasettet et hentet fra perioden i mars. Figur 5-2 viser de samme simuleringene gjort på det andre datasettet hentet fra mai.



Figur 5-1 Sammenligning mellom empirisk data fra mars zfilt, modell før identifisering m og modell etter identifisering me4.



Figur 5-2 Sammenligning mellom empirisk data fra mai z2filt, modell før identifisering m og modell etter identifisering me4

Etter modellidentifiseringen oppfører modellen seg betydelig likere det fysiske systemet, og modellen oppfører seg også tilfredsstillende når den simuleres med det andre datasettet. Dette tyder på at modellen er en god representant for det fysiske systemet, ikke bare for det datasettet den er basert på.

For å sette opp en lineær tilstandsrommodell har parametrene fra idnlgrey-modellen blitt hentet ut, og satt sammen til to sett av matrisene A og B, ett som representerer systemet med dagverdier- og ett med nattverdier for ω_2 og ω_3. I tillegg har modellen blitt diskretisert slik at det endelige systemet er gitt ved

$$x[n+1] = Ax[n] + Bu[n] \tag{5.14}$$

For enkelt å kunne bytte mellom de to versjonene av systemet underveis i simuleringen, er simuleringen satt opp i Simulink.

Denne modellen har blitt vurdert som god nok til å bruke i det videre arbeidet med å utvikle en regulator.

Se Vedlegg F for de initielle- og endelige verdiene for A og B (i kontinuerlig tid), dag- og nattverdier.

6 Regulering

Systemet som skal reguleres består av seks tilstander, målinger er kun tilgjengelig for fire av tilstandene, og det er kun tre frie pådrag. Dette gjør som sagt regulering med for eksempel en enkel PID-regulator vanskelig, og det er heller ønskelig å utnytte kunnskap om dynamikken i systemet til å oppnå stabil innetemperatur. For å oppnå dette er det brukt en tilnærming for optimal kontroll hentet fra "Predictive Control with Constraints"[5] av Maciejowski. Kontrollproblemet deles der i to deler; først brukes et Kalmanfilter til å oppnå et optimalt estimat $\hat{x}$ for tilstandene i systemet, og deretter kobles en optimal pådragsmatrise K_{LQ}, utformet for å kobles direkte til en tilstandstilbakekobling fra systemet, til de estimerte tilstandene. Med en referansetilstandsvektor x_r blir den resulterende kontrolloven

$$u = K(x_r - \hat{x}) \tag{6.1}$$

For å tilpasse denne velprøvde metoden for robust regulatordesign til systemet i Habornveien 48B, har det også blitt forsøkt å legge til foroverkobling basert på de pådragene som ikke kan styres, samt integralvirkning for å fjerne stasjonæravvik. Mer om dette i kapittel 6.3.

6.1 Kalmanfilter

Et Kalmanfilter estimerer både målte og ikke målte tilstander i systemet det er koblet til, basert på støyforurensede målinger av systemet, og verdiene for pådragene som brukes. Kalmanfilteret tjener dermed som både støyfilter og tilstandsobserver. Kalmanfilteret er basert på at målestøyen er hvit, noe som anses som en rimelig antakelse for sensorsystemet satt opp i bygget.

Ved å sette opp observerbarhetsmatrisa $O = [C\ CA \dots CA^5]'$ for systemet (5.14) og, fastslå at den har full rang, har det blitt konkludert med at (5.14) er observerbart. Dette er ikke en forutsetning for at filteret skal være stabilt, men det eliminerer ett av flere mulige divergensproblemer. Detaljer rundt Kalmanfilterteori og -implementering, kan finnes i "Introduction to random Signals and applied Kalman filtering"[6] av Brown og Young.

Det har blitt brukt en diskret implementering av Kalmanfilteret, og det optimale estimatet for tilstanden x ved neste tidssteg, utregnet i tidssteg [n], er gitt ved observerligningen

$$\hat{x}[n+1] = A\hat{x}[n] + Bu[n] + L(y[n] - C\hat{x}[n] - Du[n]) \tag{6.2}$$

gitt det diskrete systemet

$$x[n+1] = Ax[n] + Bu[n] + Gw(n) \tag{6.3}$$

$$y[n] = Cx[n] + Du[n] + Hw[n] + v[n]$$

der $w[n]$ er hvit prosesstøy, og $v[n]$ er hvit målestøy. Den optimale pådragsmatrisen L, eller Kalmanpådraget, finnes ved å løse den diskrete versjonen av Ricattiligningen[6].

$$L = (APC^T + \bar{N})(CPC^T + \bar{R})^{-1} \tag{6.4}$$
$$\bar{R} = R + HN + N^T H^T + HQH^T \tag{6.5}$$
$$\bar{N} = G(QH^T + N) \tag{6.6}$$

Q, R og N er her støykovariansmatriser gitt ved

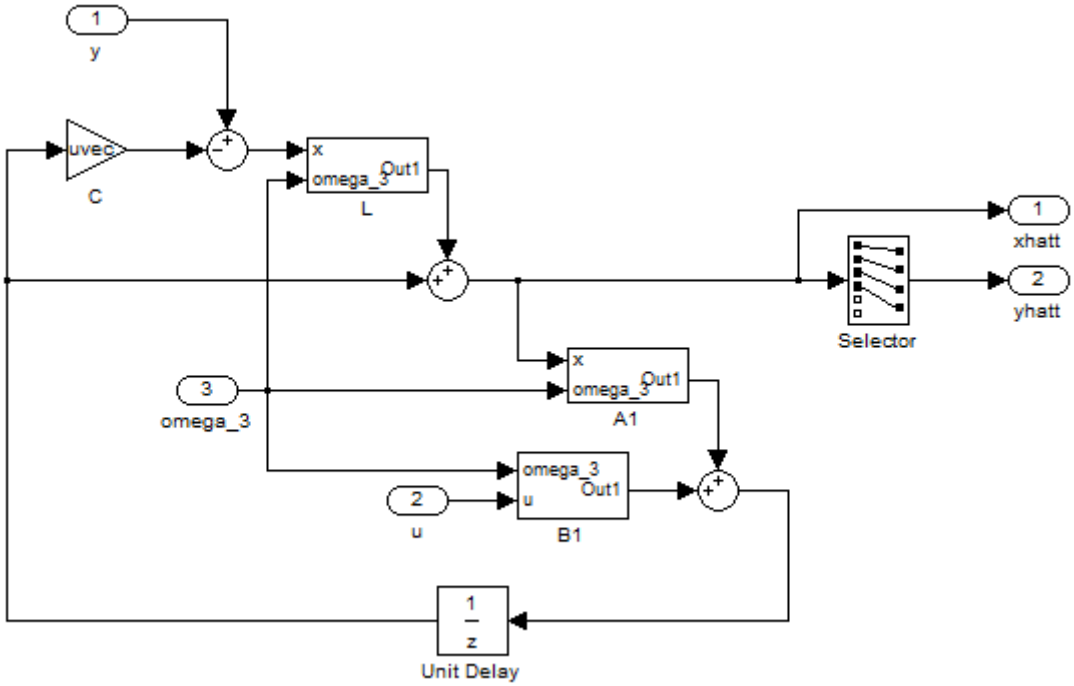
$$Q = E(w[n]w[n]^T), R = E(v[n]v[n]^T), N = E(w[n]v[n]^T \tag{6.7}$$

Verdiene i Q og R representerer kovariansen i henholdsvis prosesstøyen og målestøyen, og N representerer kovariansen mellom disse. For enkelhets skyld har Q og R blitt satt opp som diagonalmatriser, slik at kun én verdi settes for hvert pådrag og hver måling, og N er satt til null. For å sette verdiene i Q har det blitt tatt utgangspunkt i den kvadrerte verdien av det antatte standardaviket til hvert av pådragene. Verdiene i R er satt med utgangspunkt i variansen til den høyfrekvente delen av målingene, som antas å være ren målestøy uten svingningene fra tilstandene som måles. Deretter har verdiene blitt justert manuelt for å oppnå et tilfredsstillende resultat, og de endelige verdiene for Q og R er

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}25 \end{bmatrix} \tag{6.8}$$

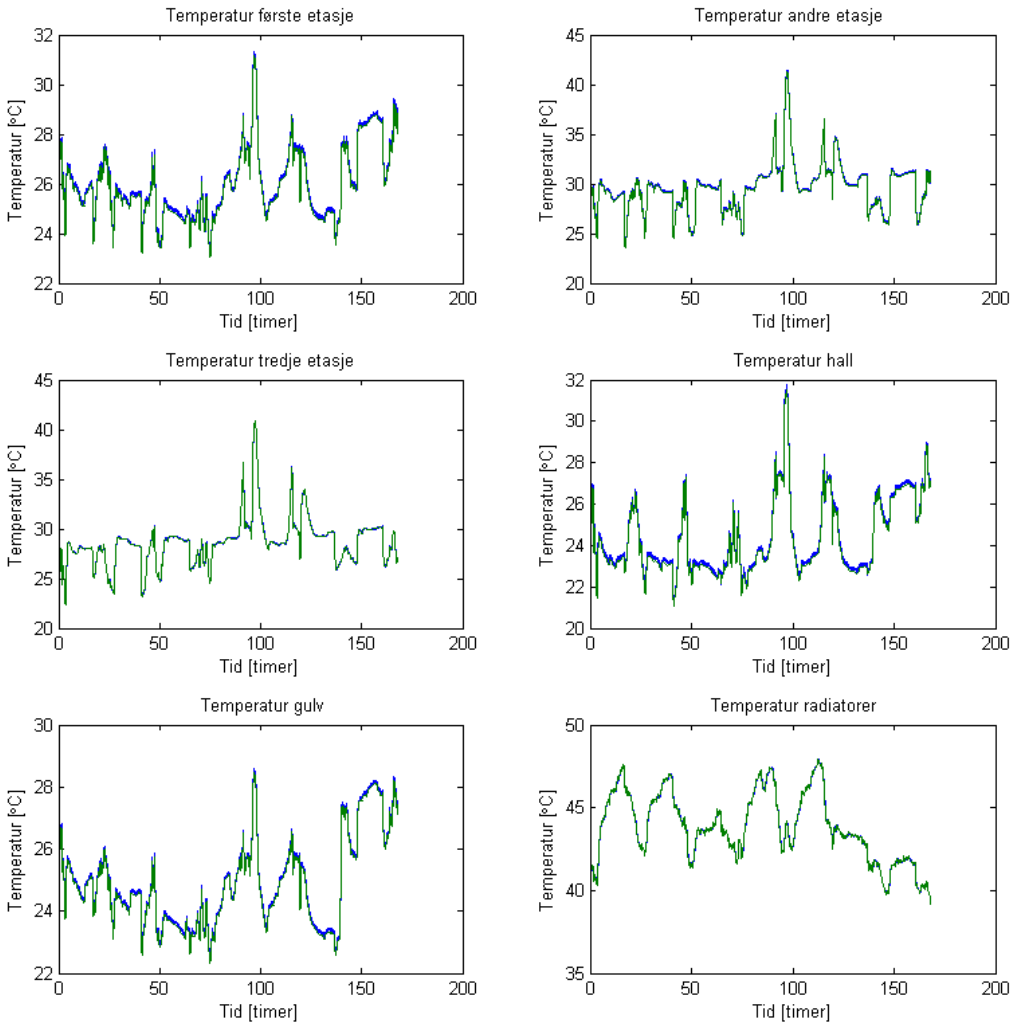
$$R = \begin{bmatrix} 0{,}0207 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}0180 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}0086 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}0188 \end{bmatrix} \tag{6.9}$$

På samme måte som det byttes mellom to versjoner av systemet avhengig av massestrømmene fra ventilasjonsaggregatene, byttes det også mellom to implementasjoner av (6.2) med forskjellige verdier for A, B og L. Se Vedlegg F for dag- og nattverdiene for L.

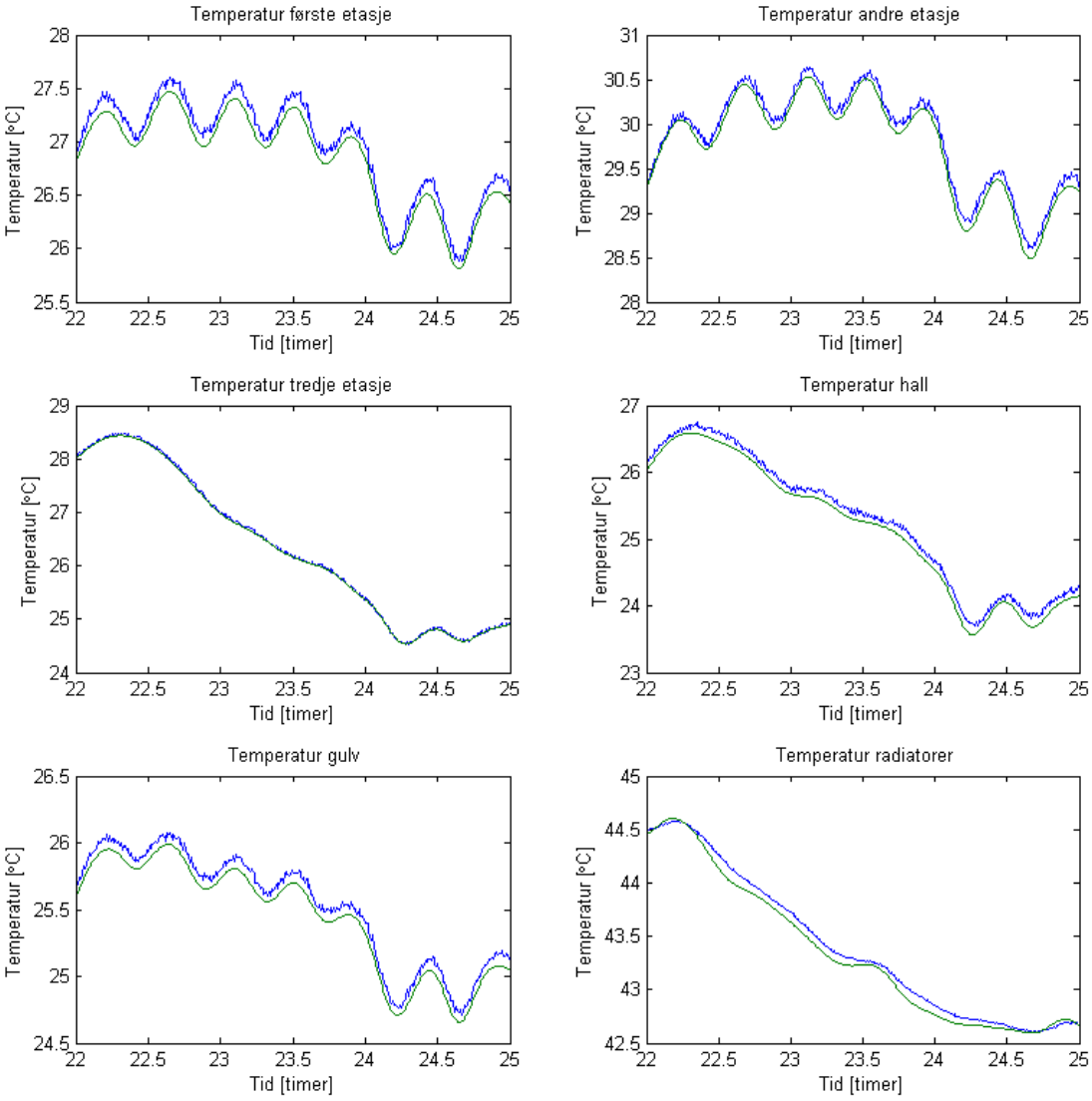


Figur 6-1 Diskret Kalmanfilter implementert i Simulink

De estimerte tilstandene $\hat{x}$ fra Kalmanfilteret, sammenlignet med de støyforurensede tilstandene x fra modellen er vist i Figur 6-2 og Figur 6-3. Grafene er plottet for henholdsvis hele datasettet fra mars, og et tretimers utsnitt for å bedre vise detaljene.



Figur 6-2 Tilstandene fra modellen er plottet i blått, de estimerte tilstandene er plottet med grønt. Plottet for hele tidsperioden i mars.



Figur 6-3 Tretimers utsnitt fra Figur 6-2

6.2 LQ-regulator

For å regne ut et en optimal tilbakekoblingsmatrise for det diskrete systemet har MATLAB-funksjonen dlqr() blitt brukt. En forutsetning for å kunne bruke denne funksjonen på et gitt system, er at systemet er stabiliserbart. Ved å sette opp kontrollerbarhetsmatrisa $C_c = [B\ AB \dots A^5B]$ for systemet (5.14), og slå fast at den har full rang, har det blitt konkludert med at (5.14) er kontrollerbart. Dette impliserer stabiliserbarhet som beskrevet i "Linear System Theory and Design"[7] av Chen.

dlqr() regner ut K_{LQ} ved minimere den kvadratiske kostfunksjonen

$$J(u) = \sum_{n=1}^{\infty} (x[n]^T Q_{lqr} x[n] + u[n]^T R_{lqr} u[n]) \tag{6.10}$$

for det diskrete systemet

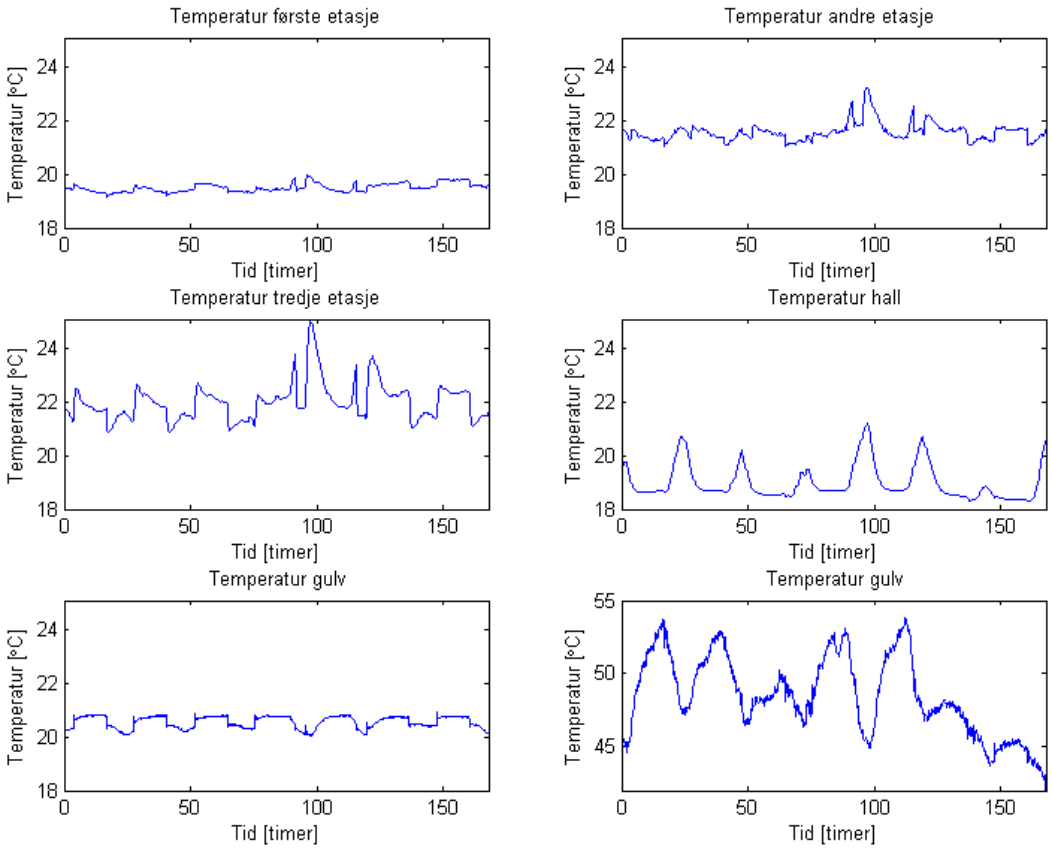
$$x[n+1] = Ax[n] + B_1 u_r[n] \tag{6.11}$$

B_r utgjør de tre første kolonnene i B, altså de som har å gjøre med de pådragene man har kontroll over. u_1 utgjør den tilsvarende delen av pådragsvektoren u. Q_{lqr} og R_{lqr} er "straffematriser" for henholdsvis tilstander og pådrag. Høyere verdier i Q_{lqr} vil gjøre at K_{lrq} blir satt slik at kontrolleren bruker store pådrag for å regulere x mot referansen (referansen er her lik 0) raskere. Høyere verdier i R_{lqr} vil begrense pådragsbruken. Det er derfor forholdet mellom Q_{lqr} og R_{lqr} som bestemmer K_{lqr}, ikke de absolutte størrelsene. For enkelhets skyld blir Q_{lqr} og R_{lqr} satt opp som diagonalmatriser slik at hver tilstand og hvert pådrag straffes av én variabel hver. Verdiene på diagonalene har i utgangspunktet blitt satt lik 1, og deretter justert for å oppnå en tilfredsstillende oppførsel med tanke på hurtighet og pådragsbruk. Siden temperaturen i radiatorene ikke kan reguleres, straffes heller ikke avvik fra denne referansen og elementet i rad seks, kolonne seks i Q_{lqr} er derfor satt til 0. De endelige verdiene for straffematrisene er

$$Q_{lqr} = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{6.12}$$

$$R_{lqr} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6.13}$$

På samme måte som med Kalmanfilteret finnes det også to verdier for K_{lqr}, én for hver av driftsinnstillingene av ventilasjonsaggregatet.



Figur 6-4 Resultater med optimal pådragsmatrise

Figur 6-4 viser de forskjellige temperaturene når regulatoren er koblet til systemet, og referansene er satt til 22 grader. Skiftet mellom natt- og dagverdier i ventilasjonsaggregatene synes godt på temperaturforløpene. Dette er naturlig siden regulatoren ikke tar høyde for disse skiftene på forhånd, selv om det skiftes mellom ulike pådragsmatriser. Spesielt rundt time 100 presterer regulatoren dårlig, og temperaturen i andre- og tredje etasje og hallen svinger med to-tre grader. Det er også verdt å merke seg at radiatortemperaturen virker noe høy, og dette kan tyde på en svakhet ved modellen. Det oppstår et mer eller mindre tydelig stasjonæravvik i reguleringsfeilen for alle de fem regulerte tilstandene.

6.3 Foroverkobling

Så langt tar ikke regulatoren hensyn til de andre energikildene som påvirker bygget. Bidragene fra disse kildene er modellert som

$$B_f u_f = F \tag{6.14}$$

der B_f er de fem siste kolonnene i B og u_f er den tilsvarende delen av pådragsvektoren. For å eliminere forstyrrelsen fra de ukontrollerbare energikildene, må energibidraget fra de tre kontrollerbare pådragene settes lik $-F$

$$B_r u_r = -F \tag{6.15}$$

Dette gir et ligningssett med flere ligninger enn uavhengige variabler, og det er derfor ikke gitt at det finnes en vektor u_r som tilfredsstiller (6.15). For finne den kombinasjonen av pådrag som eliminerer forstyrrelsen i størst grad, har (6.15) blitt formulert som et ubegrenset kvadratisk programmeringsproblem.

For å gjøre formuleringen enklest mulig har den versjonen av pådragsmatrisa som er gitt i kontinuerlig tid $B_r(t)$ blitt brukt. Siden den sjette raden i B_r er en nullrad (fordi denne raden gjelder radiatorene som det ikke finnes noe kontrollerbart pådrag til), utgjør (6.15) med noe forenklet notasjon følgende matriser og tilsvarende ligninger

$$\begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 \\ b_2 & 0 & 0 \\ 0 & b_3 & 0 \\ 0 & b_4 & 0 \\ 0 & 0 & b_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} \tag{6.16}$$

$$\begin{aligned} u_1 b_1 + f_1 &= e_1 \\ u_1 b_2 + f_2 &= e_2 \\ u_2 b_3 + f_3 &= e_3 \\ u_2 b_4 + f_4 &= e_4 \\ u_3 b_5 + f_5 &= e_5 \end{aligned} \tag{6.17}$$

der variablene e_1 til e_4 utgjør vektoren E, og uttrykker differansen mellom ideelt og faktisk energibidrag fra det aktuelle pådraget til tilstanden i. Verdien for u_3 opptrer kun i én ligning og lar seg utregne trivielt. Dersom normen til E minimeres, kan den kombinasjonen av pådrag som gir den beste elimineringen av F bli funnet. Normen av E kan uttrykkes som

$$\begin{aligned} \|E\|^2 = (u_1 b_1 + f_1)^2 + (u_1 b_2 + f_2)^2 + (u_2 b_3 + f_3)^2 \\ + (u_2 b_4 + f_4)^2 \end{aligned} \tag{6.18}$$

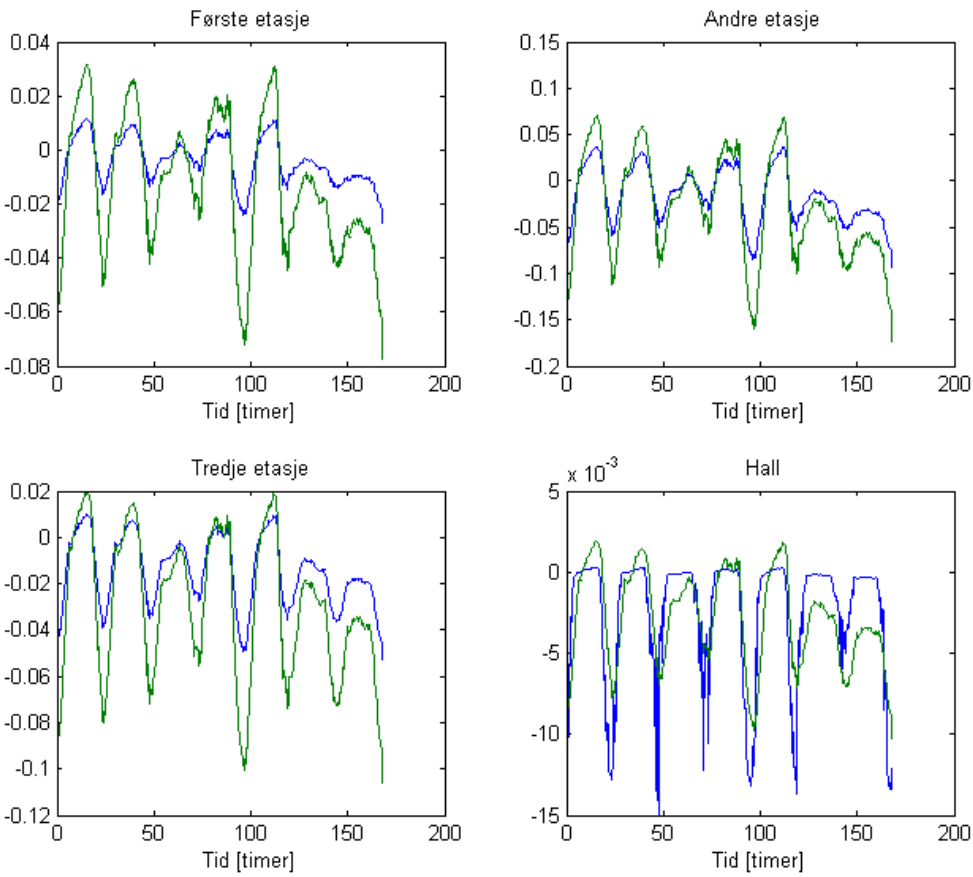
$$\begin{aligned} \|E\|^2 = u_1^2 \overbrace{(b_1^2 + b_2^2)}^{z_1} + u_1 \overbrace{(2b_1 f_1 + 2b_2 f_2)}^{z_2} + u_2^2 \overbrace{(b_3^2 + b_4^2)}^{z_3} \\ + u_2 \overbrace{(2b_3 f_3 + 2b_4 f_4)}^{z_4} + f_1^2 + f_2^2 + f_3^2 + f_4^2 \end{aligned} \tag{6.19}$$

I (6.19) er størrelsen på feilen E formulert som en kvadratisk funksjon som kan minimeres ved hjelp av kvadratisk programmering uten beskrankninger, formulert som følger

$$\min_{u} \frac{1}{2} u^T H u + hx \tag{6.20}$$

$$H = \begin{bmatrix} z_1 & 0 \\ 0 & z_3 \end{bmatrix}, h = \begin{bmatrix} z_2 & z_4 \end{bmatrix} \tag{6.21}$$

Denne minimeringen tar forholdsvis mye lenger tid enn de andre utregningene i regulatoren, men siden det ikke er noen beskrankninger, og siden samplingstiden er hele 30 sekunder, vil det ikke bli problematisk å kjøre en kvadratisk programmeringsalgoritme online.



Figur 6-5 Forstyrrelsenes bidrag til endring i hver av tilstandene er plottet med blå grafer, mens foroverkoblingen er plottet med grønne.

Plot av den utregnete foroverkoblingen er vist i Figur 6-5, og det er tydelig at forstyrrelsen lar seg eliminere til en viss grad. Særlig de konstante forstyrrelsene lar seg eliminere, og en slik foroverkobling vil i teorien kunne redusere stasjonæravvikene. Det er derimot viktig å bemerke at foroverkoblingen her er basert på nøyaktig samme B-matrise som modellen, noe som gir en ideell løsning av minimeringsproblemet. På grunn av modelleringsfeil vil ikke disse være like i virkeligheten, og kvaliteten på foroverkoblingen vil lide under dette. Denne foroverkoblingen eliminerer også alle forstyrrelsene blindt, selv om dette kanskje ikke alltid er hensiktsmessig. Dersom for eksempel bygget er under oppvarming på en kald dag, og innstrålt solenergi kanskje kunne bidratt positivt, vil fortsatt temperaturen på ventilasjonslufta senkes som følge av foroverkoblingen. Simuleringer på de virkelige datasettene har vist seg å gi bedre resultater uten denne foroverkoblingen.

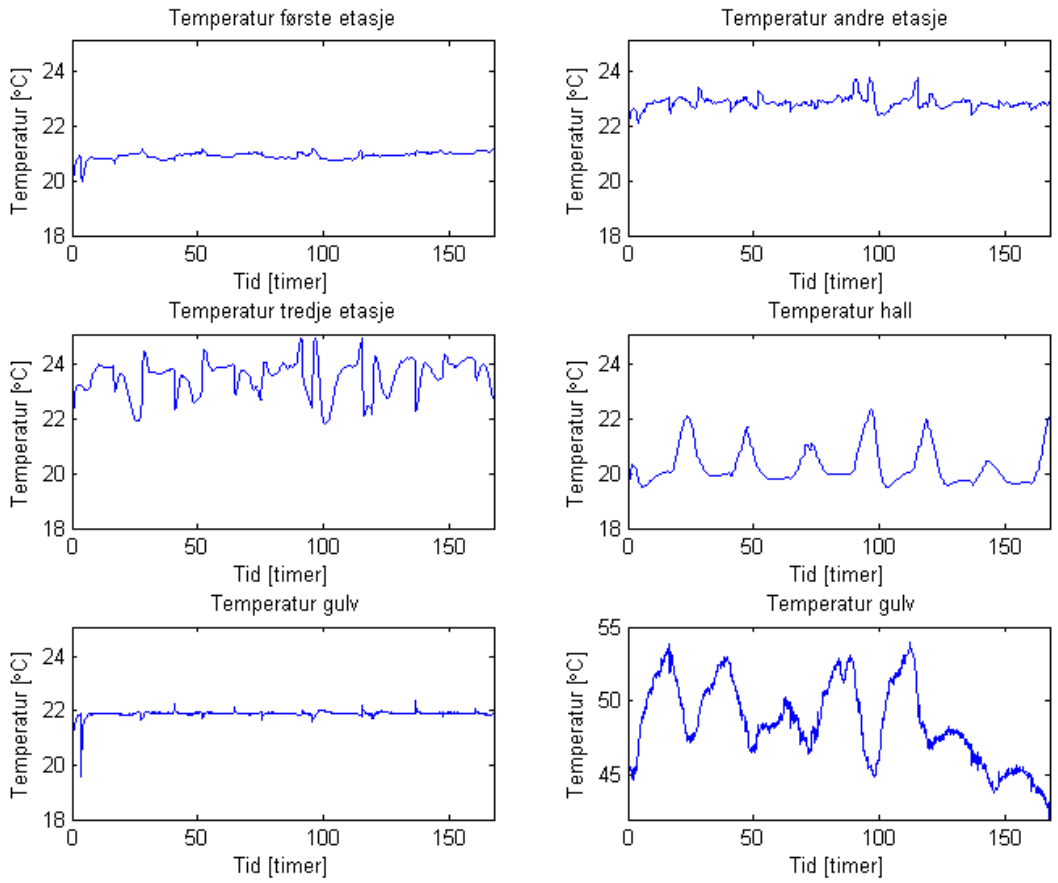
6.4 Integralvirkning

Som vist i Figur 6-4 oppstår det ved ren LQ-regulering stasjonæravvik mellom referansen og de estimerte tilstandene. For å bøte på denne problematikken har det blitt lagt til integralvirkning. På samme måte som med Kalmanfilteret og LQ-regulatoren, byttes det også her mellom en integrator for nattverdi og en integrator dagverdi, slik at bare én av dem integrerer feilen til enhver tid.

Når feilen skal integreres gjør underaktueringsproblematikken seg gjeldende, og for å ikke bruke flere integralvirkninger enn det finnes tilgjengelige pådrag, er det tatt utgangspunkt i gjennomsnittsverdier mellom feilene. Integralvirkningen til temperaturpådraget for ventilasjonsaggregatene i andre- og tredje etasje er basert på gjennomsnittet mellom temperaturfeilen i henholdsvis første- og andre etasje, og tredje etasje og hallen. Pådraget for gulvvarmen påvirker kun én tilstand direkte, og integralvirkningen er basert på temperaturfeilen i gulvet.

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{1}{2}\left(T_{1ref} - T_1 + T_{2ref} - T_2\right)K_{I1} \\ \dot{I}_2 &= \frac{1}{2}\left(T_{3ref} - T_3 + T_{href} - T_h\right)K_{I2} \\ \dot{I}_3 &= \left(T_{gref} - T_g\right)K_{I3} \end{aligned} \tag{6.22}$$

Figur 6-6 viser simuleringsresultatene når integralvirkningen er inkludert. Stasjonæravvikene er redusert for samtlige reguleringsfeil, og for temperaturen i gulvet er den nærmest eliminert.

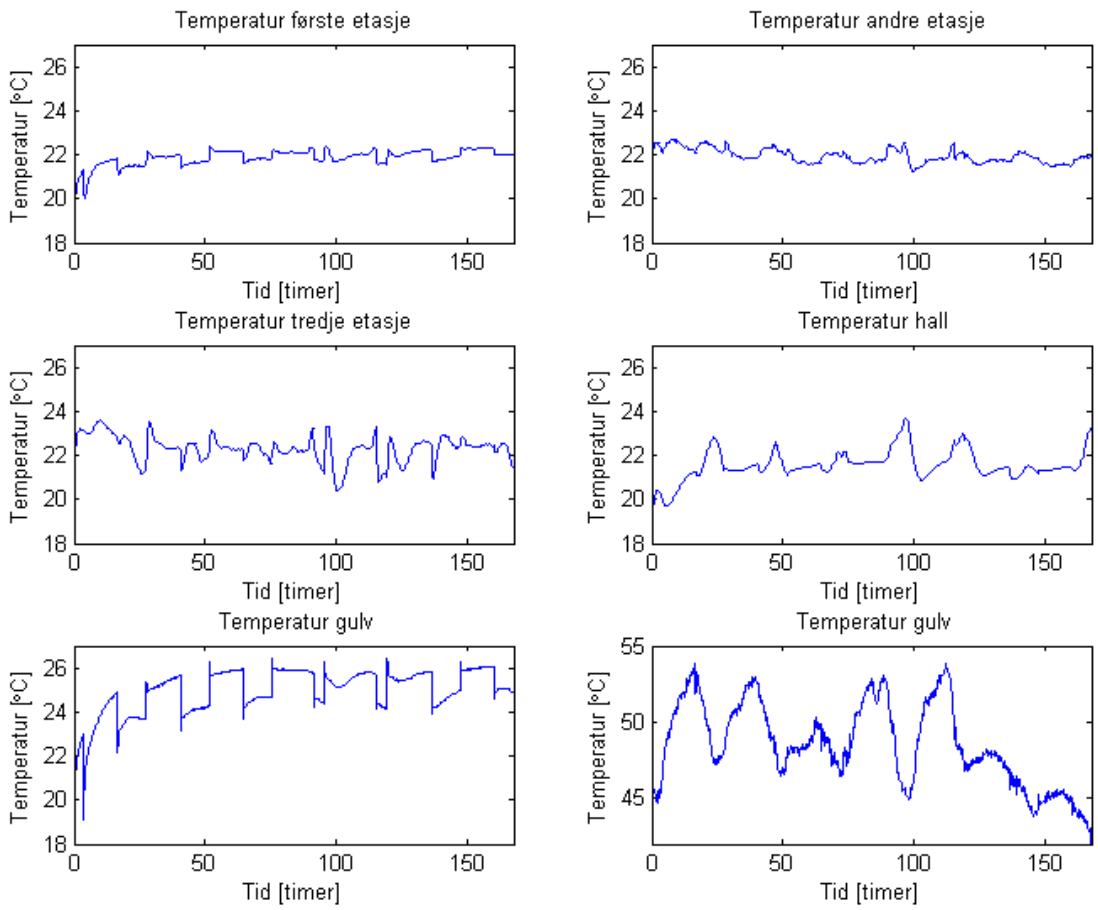


Figur 6-6 Resultater med optimal pådragsmatrise og integralvirkning

Et problem som gjør seg gjeldende med denne type enkel I-regulator er at den ikke bruker selve temperaturen i gulvet, som er en tilstand, til å regulere temperaturen i de tett forbundne sonene første etasje og hallen. Dette fører til at regulatoren stabiliserer seg når gjennomsnittet mellom avvikene fra referansene for første- og andre etasje, og tredje etasje og hallen er lik null, selv om dette medfører at det for eksempel er to grader for varmt i andre etasje, og to grader for kaldt i første etasje. Det har derfor blitt lagt til en integralvirkning på selve gulvtemperaturreferansen basert på temperaturfeilen i disse sonene som påvirkes direkte av gulvtemperaturen.

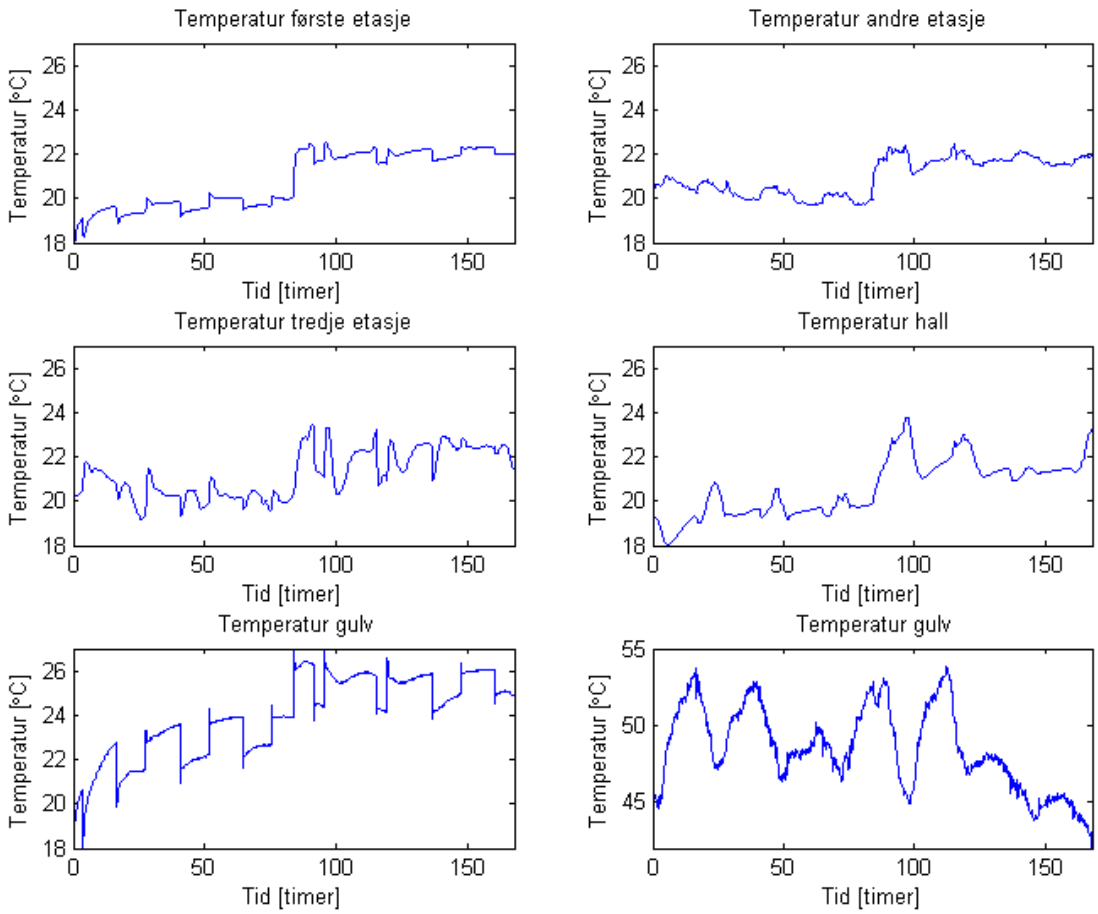
$$\dot{I}_{gref} = (T_{1ref} - T_1 + T_{href} - T_h)K_{Igref} \tag{6.23}$$

Innføringen av denne integralvirkningen gjør at referanseverdien for gulvtemperaturen justeres slik at også summen av avvikene i første etasje og hallen trekkes mot null.



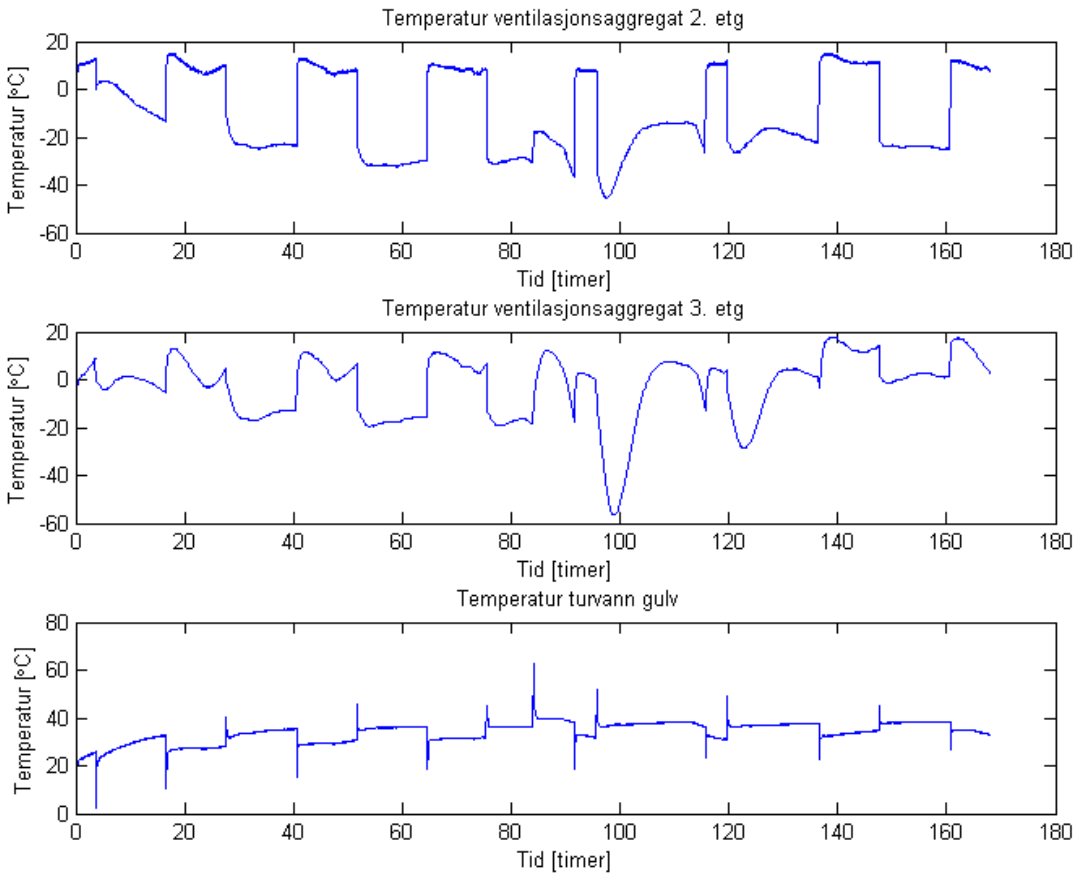
Figur 6-7 Resultater med justering av gulvtemperaturreferansen.

Figur 6-7 viser de resulterende plottene, og det vises at referansen for gulvtemperaturen øker fra 22 grader, og fortsetter å endre seg i takt med skiftene mellom dag- og nattverdier. Innføringen av integralvirkning har liten effekt på de nevnte problemene rundt time 100.



Figur 6-8 Stepresponsen

Figur 6-8 viser simuleringsresultater med samme oppsett som i Figur 6-7, men referansen endres her fra 20 grader til 22 grader halvveis i simuleringen (i time 84), for samtlige tilstander.



Figur 6-9 Pådrag

Figur 6-9 viser pådragsverdiene brukt i samme simulering som plottene i Figur 6-8 er hentet fra. De store sprangene i pådragsverdier stammer fra skiftene mellom dag- og nattverdier i regulatoren, og problematikken rundt time 100 fører som forventet til stor pådragsbruk. Innføringen av integralvirkningen har også lagt snittverdiene for pådragene fra ventilasjonsanleggene svært lavt, rundt 0 grader. Dette er ikke realistiske verdier for temperatur på ventilasjonsluft i Fredrikstad i mars, men de lave verdiene stammer fra de tilsvarende høye verdiene for radiatortemperaturen. Dette stammer som nevnt fra svakheter i selve modellen, og kvaliteten på pådragene påvirkes av dette. Dersom regulatoren var koblet til det virkelige anlegget, ville ikke pådragene bli satt så lavt.

6.5 Regulator for varmtvann i gulv

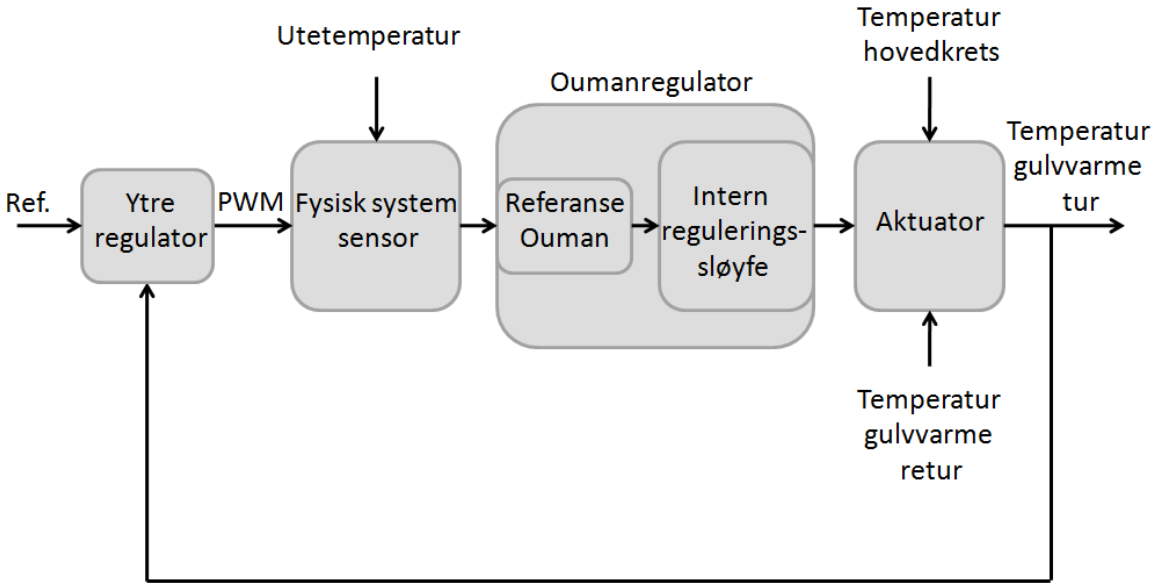
Som tidligere nevnt er regulatordesignet for systemet basert på at temperaturen på varmtvannet i gulvet kan settes som et eget pådrag. I virkeligheten er denne temperaturen regulert av en egen regulator, påvirket av et varmeelement som beskrevet i kapittel 4.2.1.

Temperaturen i effektmotstanden som utgjør varmeelementet vil være avhengig av den tilførte elektriske energien, som er avhengig av den påtrykte spenningen, som igjen er avhengig av PWM-signalet fra PLS-enheten. Den tilførte elektriske effekten P som

funksjon av PWM-signalet K_{pwm}, motstanden i kretsen R og den påtrykte hovedspenningen U er

$$P = K_{pwm}^2 UR \tag{6.24}$$

Effektmotstanden utgjør som sagt en tredjedel av motstanden i kretsen og omsetter dermed $P/3$. Varmeelementet overfører varme til sensoren, og i tillegg til den elektriske effekten påvirkes også varmeelementet og sensoren av omgivelsestemperaturen. Målingen fra sensoren er én av verdiene som Ouman-regulatoren baserer sitt pådrag på, men denne målingen er ikke tilgjengelig. Ouman-regulatorens reguleringsstrategi er ikke kjent, men referanseverdien for vanntemperaturen er grovt skissert som funksjon av utetemperaturen på selve regulatoren. Kunnskapen om reguleringssløyfa er dermed begrenset til at temperaturen i sensoren er en funksjon av K_{pwm}^2 og utetemperaturen, samt et grovt bilde av referanseverdien til den interne reguleringssløyfa i Ouman-regulatoren. Ouman-regulatoren er koblet til en ventil som styrer varmevekslingen i shuntventilen mellom hoved- og gulvvarmekretsen. Selve pådraget, temperaturen på turvannet i gulvvarmekretsen, er dermed bestemt av "graden" av denne varmevekslingen, og begrenset av temperaturen i hovedkretsen og returtemperaturen i gulvvarmekretsen. En skisse av hele reguleringssløyfa som den ytre regulatoren skal regulere er vist i Figur 6-10



Figur 6-10 Reguleringssløyfe gulvvarme

Instrumenteringen og programvaren for den ytre regulatoren var ikke på plass før våren 2011, da utetemperaturen i Fredrikstad hadde blitt såpass høy at regulatoren gikk i metning, som beskrevet i kapittel 4.2.1, store deler av døgnet. Det har derfor ikke lyktes å få på plass en god løsning for regulering av temperaturen på turvannet i gulvvarmekretsen. Det har heller ikke latt seg gjøre å identifisere en modell som oppfører seg på samme måte som det fysiske systemet, basert på det begrensede datagrunnlaget.

7 Diskusjon

7.1 Modell

Det har vist seg å være svært utfordrende å utforme en modell som oppfører seg på samme måte som det fysiske systemet. De første versjonene av modellen var i stor grad basert på [1], noe som medførte å gjøre om Simulink-blokkdiagrammene i [1], til en matematisk modell på formen $\dot{x} = Ax + Bu$. I likhet med modellen de var basert på, ga disse tidlige forsøkene resultater som virket gode intuitivt sett. Innetemperaturene påvirket hverandre, og steg i takt med solinnstråling og utetemperatur. Da modellen ble sammenlignet med data fra det virkelige systemet, viste det seg derimot at en slik intuitivt fornuftig modell ikke var tilstrekkelig.

Etter at ulike metoder for å identifisere modellparametrene var prøvd ut, hadde modellen utviklet seg. Den ga da resultater som lå mye nærmere målingene fra det virkelige systemet, men dette hadde gått på bekostning av kvaliteten på den modellerte temperaturen i radiatorene. Denne problematikken kunne vært løst ved å ha flere målinger tilgjengelige

Modellen er også basert på å skifte mellom ulike verdier basert på massestrømmen fra ventilasjonsaggergatene.

7.2 Kontroll

Det har som antatt vært utfordrende å utvikle en god reguleringsstrategi for innetemperaturen i Habornveien 48B. Særlig byr de forskjellige luftmassestrømmene fra ventilasjonsaggregatene på problemer. Løsningen har blitt å basere både modell og regulator på å skifte mellom ulike verdier basert på to nivåer for luftmassestrømmene. Regulatoren har blitt basert på en kombinasjon av Kalmanfiltrering og LQ-regulering, og utvidet med en egen løsning for integralvirkning. Dette har gitt relativt gode resultater modellen tatt i betraktning, og innetemperaturen holdes relativt jevn og relativ nære referansen. Dette har gått på bekostning av pådragsbruken, og den framstår ikke som realistisk i sluttresultatet, men dette grunner igjen ut i svakheter i modellen. Dersom en MPC-løsning hadde blitt implementert, kunne begrensninger i pådragene blitt håndtert bedre, og det hadde også vært mulig å implementere en løsning for senking av energiforbruket på nattestid. På denne måten kunne regulatoren jobbet i takt med endringene i luftmassestrømnivåene.

Etter ønske fra Prediktor, har det blitt satt opp en egen løsning for å kunne styre gulvvarmeregulatoren som i utgangspunktet ikke har noen mulighet for ekstern styring. På grunn av problematikken med høy utetemperatur på tidspunktet da dette sto ferdig, er det ikke utviklet en regulator til dette formålet. Det er også vanskelig å si noe om

gjennomførbarheten av dette, men det faktum at det ikke har latt seg gjøre å modellere dynamikken, tyder på at dette kan bli vanskelig å få til å fungere godt.

8 Videre arbeid

Modellen som er utviklet fanger opp den sentrale dynamikken i systemet, men det er som sagt visse problemer med radiatortemperaturene. Dette kan med fordel utbedres, og dersom sensorsystemet i bygget utvides til å måle radiatortemperaturer, vil antakeligvis grey box-metoden beskrevet i kapittel 5.4, med utgangspunkt i modellverdiene utviklet i denne oppgaven, kunne gi en enda bedre modell. Det er montert opp én PLS-enhet i første etasje, med sensorkabler lagt inn til første etasje og hallen, og én PLS-enhet i andre etasje. Det vil derfor hverken medføre stor kostnad eller mye arbeid å utvide PLS-enhetene med flere temperatursensorer som kan monteres på radiatorene i disse sonene.

Reguleringen av innetemperaturen vil antakelig kunne forbedres betraktelig dersom en MPC implementeres. Med modellen fra denne oppgaven, og framtidige verdier for utemiljøet hentet fra ApisYr-bia, er det nå godt tilrettelagt for å utvikle en slik regulator. Regulatoren utviklet i denne oppgaven er ikke implementert i ModFrame, og dersom man ønsker å teste ytelsen på denne må dette gjøres.

Dersom man vil ha kontroll over temperaturen på turvannet i gulvet, må også en regulator for dette utvikles. Kretsen som sørger for oppvarming av utetemperatursensoren er koblet til PLS-enheten i fyringsrommet, og det er derfor mulig å implementere en regulator i PLS-programvaren. Dersom dette ikke er ønskelig kan regulatoren implementeres på et annet nivå i nettverket, og pådraget sendes til PLS-enheten som et OPC-item. På grunn av problematikken med utetemperaturen bør dette arbeidet gjøres når det er tilstrekkelig kaldt, med andre ord på vinterstid. Dersom dette ikke er mulig bør det ordnes med nedkjøling av lufta rundt sensoren slik at lav utetemperatur kan simuleres. Hele problematikken med regulering av turvannet i gulvet kan unngås dersom Ouman-regulatoren byttes ut med en regulator med kommunikasjonsmuligheter.

Det har siden starten vært ytret et ønske fra Prediktors side om å optimalisere reguleringen med hensyn til fyringskostnadene. For å oppnå dette bør det tas kontroll over Siemens-regulatoren som styrer vannstrømmen fra fjernvarmeanlegget. Dette kan gjøres via Meter-Bus-grensesnittet som er koblet til PLS-enheten i fyringsrommet via et modem.

9 Kilder og referanser

[1] Vold, J.E. *SD anlegg hos Prediktor, Modellering, simulering og datainnsamling* Masteroppgave ved institutt for teknisk kybernetikk, NTNU, 2010.

[2] Caro, D. *Automation Network Selection. A Reference Manual.* International Society of Automation 2009

[3] Egeland, O., and Gravdal, J. T. *Modeling and Simulation for Automatic Control*. Marine Cybernetics AS, 2002.

[4] Sintef *Enøk i Bygninger. Effektiv Energibruk*. Gyldendal Norsk Forlag AS, 2007

[5] Maciejowski, J.M. *Predictive Control with Constraints.* Pearson Eduacation Ltd. 2002

[6] Brown, R.g og Hwang, P.Y.C. *Introduction to random Sigals and applied Kalman filtering*. John Wiley & Sons 1997

[7] Chen, C-T. *Linear System Theory and Design.* Oxford University Press 1999

Vedlegg A

Følgende kode er vedlagt:

Matlab/ Simulink

greyboxmodeling.m	Oppretter en modell m basert på verdiene opprettet av initParams(), og kjører modellidentifikasjonsalgoritmen pem() 4 ganger. Hver iterasjon av pem() tilsvarer 20 iterasjoner av lsqnonlin() og for hver iterasjon av pem() lagres den resulterende modellen.
initParams.m	Definisjonen av funksjonen initParams(). Oppretter alle parametrene som modellen er basert på, og gir dem initialverdier. Returnerer alle parametrene som en vektor.
run.m	Henter inn de lagrede modellene og iddata-objektene, oppretter systemmatrisene, kovariansmatrisene til kalmanfilteret og straffematrisene til LQ-algoritmen. Oppretter så selve kalmanfilteret og de optimale pådragsmatrisene. Kjører til slutt kalman.mdl, kalmanlqr.mdl og ff.mdl
plots.m	Oppretter plottene brukt i denne rapporten.
ffoptim.m	Definisjonen av funksjonen ffoptim() som formulerer foroverkoblingen som et kvadratisk programmeringsproblem og kjører algoritmen quadprog().
data.mat	Inneholder alle iddata-objektene som brukes
rawdata.mat	Inneholder datasettene iddata-objektene er bygd opp av
savedmodels.mat	Inneholder den initielle modellen m, samt mellomlagret modell for hver 20. iterasjon av lsqnonlin()-algoritmen, me1-me4.
kalman.mdl	Implementering av Kalmanfilteret i Simulink
kalmanlqr.mdl	Implementering Kalmanfilteret, LQ-regulatoren og itegralvirkningen.
ff.mdl	Implementering av foroverkoblingen i Simulink.

PC WORX

Programvaren til PLS-enhetene er pakket i to prosjektfiler, én for hver PLS, med navnene ”PLS1etg.zwt” og ”PLS2.etg.zwt”. Hvert av prosjektene inneholder flere POU’er (Program Organization Unit) og disse er listet opp nedenfort.

PLS1etg.zwt

Temp48Lib	Bibliotek som inneholder den delen av koden som allerede var på plass.
PWM_ST	Structured Text-POU som implementerer PWM-funskjonalitet. POUen tar inn et én tidsvariabel ”Period” som bestemmer perioden på pulsene og ”DutyCycle” med verdi mellom 0 og 100, som bestemmer hvor mange prosent av perioden utgangen skal stå høy. Utgangen er koblet til en av de digitale utgangene på PLS-enheten.
AvgPulse	Tar inn pulser fra Kamstrup-instrumentet, teller disse og gir ut et rullende gjennomsnitt for antall pulser per kvarter, regnet ut over de 15 siste minuttene.
Counter	Teller som brukes i AvgPulse
ConfigChannels	Tar inn en kommando for hver kanal på tempereturmåleren og setter opp målingene basert på disse. Kommandoen må følge formatet definert i databladet for temperaturmålereren.
MultipleOr	Utgangen er en logisk OR funksjon av de 8 inngangene. Brukes i ConfigChannels
Main	Main-funksjonen der alle de andre POUene kjøres.

PLS1etg.zwt

Main	Inneholder kun en enkel main-funksjon som setter opp de to temperatursensorene og leser dem av.

Apis-bier

ApisWeatherLinkBee.dll	Bie som kommuniserer med værstasjonen.
ApisYrBee.dll	Bie som henter værmeldingsdata fra meteorologisk institutt.

Vedlegg B

$$\dot{T}_1 = \frac{1}{m_1 c_{v1}}\left(-K_{11}T_1 + K_{12}T_2 + K_{1h}T_h + K_{1g}T_g + K_{1r}T_r + K_{1l}T_{l2} + K_{1u}T_u + K_{1str}P_{str} + K_{1el}P_{eltot} + K_{1p}P_{pers}\right)$$

$$\dot{T}_2 = \frac{1}{m_2 c_{v2}}\left(K_{12}T_1 - K_{22}T_2 + K_{2h}T_h + K_{2r}T_r + K_{2l}T_{l2} + K_{2u}T_u + K_{2str}P_{str} + K_{2el}P_{eltot} + K_{2p}P_{pers}\right)$$

$$\dot{T}_3 = \frac{1}{m_3 c_{v3}}\left(K_{23}T_2 - K_{33}T_3 + K_{3h}T_h + K_{3r}T_r + K_{3l}T_{l3} + K_{3u}T_u + K_{3str}P_{str} + K_{3el}P_{eltot} + K_{3p}P_{pers}\right)$$

$$\dot{T}_h = \frac{1}{m_h c_{vh}}\left(K_{1h}T_1 + K_{2h}T_2 + K_{3h}T_3 - K_{hh}T_h + K_{hr}T_r + K_{hl}T_{l3} + K_{hu}T_u + K_{hstr}P_{str} + K_{hel}P_{eltot}\right)$$

$$\dot{T}_g = \frac{1}{m_g c_{vg}}\left(K_{1g}T_1 + K_{hg}T_h - K_{gg}T_g + K_{gv}T_v + K_{gkonst}P_{eltot}\right)$$

$$\dot{T}_r = \frac{1}{m_r c_{vr}}\left(K_{1r}T_1 + K_{2r}T_2 + K_{3r}T_3 + K_{hr}T_h - K_{rr}T_r + K_{rkonst}P_{eltot}\right)$$

Vedlegg C

Oversikt over konstanter og initialverider:

Konstant	Beskrivelse	Hentet fra [1]	Verdi	Benevning
c_{pb}	Spesifikk varmekapasitet betong	Nei	800	J/kgK
c_{ps}	Spesifikk varmekapasitet stål	Nei	460	J/kgK
c_{pl}	Spesifikk varmekapasitet luft	Nei	1012	J/kgK
c_{pv}	Spesifikk varmekapasitet vann	Nei	4018	J/kgK
ρ	Tetthet luft	Nei	1,2041	kg/m^3
ρ_b	Tethet betong	Nei	2400	kg/m^3
ω_r	Massestrøm radiatorer	Nei	0,5	kg/s
ω_g	Massestrøm gulv	Nei	1	kg/s
P_{eltot}	Totalt omsatt elektrisk effekt	Nei	30000	W
s	Solfaktor vinduer	Ja	0,26	
$A1$	Areal 1. etg	Ja	600	m^2
$h1$	Takhøyde 1.etg	Ja	3	m
hg	Tykkelse gulv	Ja	0,1	m
A_{12}	Areal mellom 1. og 2. etg	Ja	600	m^2
A_{1h}	Areal mellom 1. etg og hall	Ja	45	m^2
A_{1g}	Areal mellom 1. etg og gulv	*	$A1$	m^2
U_{12}	Varmeovergang mellom 1. og 2. etg	Ja	0,5	W/Km^2
U_{1h}	Varmeovergang mellom 1. etg og hall	Ja	0,5	W/Km^2
U_{1g}	Varmeovergang mellom 1. etg og gulv	Ja	10	W/Km^2
U_{1r}	Varmeovergang mellom 1. etg og radiatorer	Nei	7,9	W/Km^2
A_{1yv}	Areal mellom 1.etg og yttervegger	Ja	140	m^2
A_{1v}	Areal mellom 1.etg og vinduer	Ja	150	m^2
A_{1r}	Areal mellom 1.etg og radiatorer	Ja	32	m^2
U_{1yv}	Varmeovergang mellom 1.etg og yttervegger	Ja	0,22	W/Km^2
U_{1v}	Varmeovergang mellom 1.etg og vinduer	Ja	1,4	W/Km^2
$A3$	Areal 3. etg	Ja	500	m^2
A_{23}	Areal mellom 2. og 3. etasje	*	A3	m^2
A_{3r}	Areal mellom 3.etasje og radiatorer	Ja	40	m^2
U_{3t}	Varmeovergang mellom 3. etasje og takk	Ja	0,15	W/Km^2
Ah	Areal hall	Ja	300	m^2
hh	Takhøyde hall	Ja	6	m
A_{hyv}	Areal mellom hall og yttervegger	Ja	72	m^2
A_{hv}	Areal mellom hall og vinduer	Nei	260	m^2
K_{12}	Termisk kobling mellom 1. og 2. etasje	*	$A_{12}U_{12}$	W/K
K_{1h}	Termisk kobling mellom 1. etasje og hall	*	$A_{1h}U_{1h}$	W/K
K_{1r}	Termisk kobling mellom 1. etasje og radiatorer	*	$A_{1r}U_{1r}$	W/K
K_{1u}	Termisk kobling mellom 1.etasje og utetemp.	*	$A_{yv}U_{1yv} + A_{1v}U_{1v}$	W/K
K_{23}	Termisk kobling mellom 2. og 3. etasje	*	$A_{23}U_{23}$	W/K
K_{2h}	Termisk kobling mellom 2.etasje og hall	*	K_{1h}	W/K

K_{2r}	Termisk kobling mellom 2. etasje og radiatorer	*	K_{1r}	W/K
K_{2u}	Termisk kobling mellom 2. etasje og utetemp.	*	K_{1u}	W/K
K_{3h}	Termisk kobling mellom 3. etasje og hall	*	K_{1h}	W/K
K_{3r}	Termisk kobling mellom 3. etasje og hall	*	$A_{3r}U_{1r}$	W/K
K_{3u}	Termisk kobling mellom 3. etasje og utetemp	*	$K_{1u} + A_3U_{3t}$	W/K
K_{hg}	Termisk kobling mellom hall og gulv	*	A_hU_{1g}	W/K
K_{hu}	Termisk kobling mellom hall og utetemperatur	*	$A_{hyv}U_{1yv} + A_hU_{3t} + A_{hv}U_{1v}$	
K_{hr}	Termisk kobling mellom hall og radiatorer	*	0	W/K
K_{1l}	Termisk kobling mellom 1. etasje og vent.temp	*	0,5	W/K
K_{2l}	Termisk kobling mellom 2. etasje og vent.temp	*	K_{1l}	W/K
K_{3l}	Termisk kobling mellom 3. etasje og vent.temp	*	K_{1l}	W/K
K_{hl}	Termisk kobling mellom hall og vent.temp	*	K_{1l}	W/K
K_{1p}	Skalering av effekt fra personer for 1.etg	*	2000	
K_{2p}	Skalering av effekt fra personer for 2.etg	*	K_{1p}	
K_{3p}	Skalering av effekt fra personer for 3.etg	*	K_{1p}	
K_{gv}	Termisk kobling mellom gulv og turvanntemp.	*	$c_{pv}\omega_g$	W/K
K_{rv}	Termisk kobling radiatorer og turvanntemp	*	$c_{pv}\omega_r$	W/K
K_{1s}	Skalering av strålingseffekt for 1. etg	*	$A_{1v}s$	
K_{2s}	Skalering av strålingseffekt for 2. etg	*	K_{1s}	
K_{3s}	Skalering av strålingseffekt for 3. etg	*	K_1s	
K_{hs}	Skalering av strålingseffekt for hall	*	$A_{hv}s$	
P_{1el}	Skalering av elektrisk effekt for 1. etg	*	0,3	
P_{2el}	Skalering av elektrisk effekt for 2. etg	*	P_{1l}	
P_{3el}	Skalering av elektrisk effekt for 3. etg	*	0,25	
P_{hel}	Skalering av elektrisk effekt for hall	*	0,15	
P_{gkonst}	Skalering av konstant forstyrrelse gulv	*	0	
P_{rkonst}	Skalering av konstant forstyrrelse gulv	*	0	
m_1	Masse 1.etg	*	$A_1h_1\rho$	kg
m_2	Masse 2.etg	*	m_1	kg
m_3	Masse 3.etg	*	$A_3h_1\rho$	kg
m_h	Masse hall	*	$A_hh_h\rho$	kg
m_g	Masse gulv	*	$(A_1 + h_1)h_g\rho_b$	kg
m_r	Masse radiatorer	*	$20(2A_{1r} + A_{3r})$	kg

Vedlegg D

BORGE RØR A/S

INNREGULERINGS PROTOKOLL

ANLEGG: PREDIKTOR A/S ADRESSE: Haborvein SYSTEM: Vannanlegg

SYSTEM:	PLASSERING:	TYPE VENTIL:	PROSJEKT L/s	MÅLT L/s	ANT. OMDR.	DIV.
Gulvv.			0.35 L/s	0,35 L/s		Primer
Vent. 2 etg			0.20 L/s	0,20 L/s		
" 3 etg			0,23 L/s	0,23 L/s		
Radiator			2.5 L/s	2.5 L/s		
Gulvv.			1,03 L/s	1 L/s		Sek.

Vedlegg E

TD 3.A Teknisk dokumentasjon

Therm X2 -Plan

Vekt, vanninnhold: Therm X2 Plan-V/-VM/-K

		Type 10					Type 11					Type 12					Type 22					Type 33				
Høyde *(mm)* ▶		305	405	505	605	905	305	405	505	605	905	305	405	505	605	905	305	405	505	605	905	305	405	505	605	905
Lengde *(mm)* ▼																										
405 mm	kg	4,17	5,26	6,34	7,43	10,68	5,63	7,28	8,92	10,57	15,51	7,49	9,76	12,04	14,31	21,14	8,59	11,27	13,94	16,61	24,62	12,23	16,07	19,91	23,75	35,27
	l	0,72	0,90	1,08	1,26	1,80	0,72	0,90	1,08	1,26	1,80	1,44	1,80	2,16	2,52	3,60	1,44	1,80	2,16	2,52	3,60	2,16	2,70	3,24	3,78	5,40
505 mm	kg	5,02	6,37	7,73	9,08	13,14	6,79	8,84	10,88	12,93	19,07	9,11	11,94	14,77	17,60	26,09	10,43	13,75	17,07	20,39	30,36	14,84	19,62	24,40	29,17	43,50
	l	0,89	1,12	1,35	1,57	2,25	0,89	1,12	1,35	1,57	2,25	1,80	2,25	2,70	3,15	4,50	1,80	2,25	2,70	3,15	4,50	2,70	3,38	4,05	4,72	6,75
605 mm	kg	5,86	7,49	9,11	10,73	15,61	7,91	10,35	12,80	15,24	22,58	10,74	14,12	17,50	20,89	31,04	12,26	16,23	20,20	24,18	36,10	17,46	23,17	28,88	34,60	51,74
	l	1,08	1,35	1,62	1,89	2,70	1,08	1,35	1,62	1,89	2,70	2,16	2,70	3,24	3,78	5,40	2,16	2,70	3,24	3,78	5,40	3,24	4,05	4,86	5,67	8,10
705 mm	kg	6,70	8,60	10,49	12,39	18,07	9,01	11,85	14,70	17,54	26,08	12,36	16,30	20,24	24,17	35,98	14,09	18,71	23,34	27,96	41,84	20,07	26,72	33,37	40,02	59,97
	l	1,25	1,57	1,89	2,20	3,15	1,25	1,57	1,89	2,20	3,15	2,52	3,15	3,78	4,41	6,30	2,52	3,15	3,78	4,41	6,30	3,78	4,73	5,67	6,61	9,45
805 mm	kg	7,55	9,71	11,88	14,04	20,53	10,17	13,41	16,66	19,90	29,64	13,99	18,48	22,97	27,46	40,93	15,92	21,20	26,47	31,75	47,57	22,69	30,28	37,86	45,45	68,21
	l	1,44	1,80	2,16	2,52	3,60	1,44	1,80	2,16	2,52	3,60	2,88	3,60	4,32	5,04	7,20	2,88	3,60	4,32	5,04	7,20	4,32	5,40	6,48	7,56	10,80
905 mm	kg	8,39	10,83	13,26	15,69	22,99	11,33	14,98	18,62	22,27	33,20	15,61	20,65	25,70	30,75	45,88	17,75	23,68	29,60	35,53	53,31	25,30	33,83	42,35	50,87	76,44
	l	1,60	2,02	2,43	2,83	4,05	1,60	2,02	2,43	2,83	4,05	3,24	4,05	4,86	5,67	8,10	3,24	4,05	4,86	5,67	8,10	4,86	6,07	7,29	8,50	12,15
1005 mm	kg	9,24	11,94	14,64	17,34	25,45	12,50	16,54	20,58	24,63	36,76	17,29	22,89	28,48	34,08	50,88	19,68	26,25	32,83	39,41	59,14	28,07	37,53	46,99	56,45	84,83
	l	1,80	2,25	2,70	3,15	4,50	1,80	2,25	2,70	3,15	4,50	3,60	4,50	5,40	6,30	9,00	3,60	4,50	5,40	6,30	9,00	5,40	6,75	8,10	9,45	13,50
1105 mm	kg	10,08	13,05	16,02	19,00	27,91	13,66	18,10	22,55	26,99	40,32	18,91	25,06	31,22	37,37	55,83	21,51	28,74	35,96	43,19	64,88	30,69	41,08	51,48	61,87	93,06
	l	1,99	2,48	2,97	3,47	4,95	1,99	2,48	2,97	3,47	4,95	3,96	4,95	5,94	6,93	9,90	3,96	4,95	5,94	6,93	9,90	5,94	7,42	8,91	10,40	14,85
1205 mm	kg	10,92	14,17	17,41	20,65	30,37	14,82	19,66	24,51	29,35	43,88	20,53	27,24	33,95	40,66	60,78	23,34	31,22	39,10	46,98	70,62	33,38	44,71	56,04	67,38	101,37
	l	2,16	2,70	3,24	3,78	5,40	2,16	2,70	3,24	3,78	5,40	4,32	5,40	6,48	7,56	10,80	4,32	5,40	6,48	7,56	10,80	6,48	8,10	9,72	11,34	16,20
1305 mm	kg	11,77	15,28	18,79	22,30	32,83	15,98	21,23	26,47	31,71	47,44	22,16	29,42	36,68	43,94	65,73	25,17	33,70	42,23	50,76	76,36	35,84	48,11	60,38	72,65	109,46
	l	2,35	2,93	3,51	4,10	5,85	2,35	2,93	3,51	4,10	5,85	4,68	5,85	7,02	8,19	11,70	4,68	5,85	7,02	8,19	11,70	7,02	8,77	10,53	12,29	17,55
1405 mm	kg	12,61	16,39	20,17	23,95	35,29	17,15	22,79	28,43	34,07	51,00	23,89	31,70	39,52	47,33	70,78	27,19	36,37	45,55	54,73	82,28	38,83	52,04	65,25	78,45	118,07
	l	2,52	3,15	3,78	4,41	6,30	2,52	3,15	3,78	4,41	6,30	5,04	6,30	7,56	8,82	12,60	5,04	6,30	7,56	8,82	12,60	7,56	9,45	11,34	13,23	18,90
1605 mm	kg	14,30	18,62	22,94	27,26	40,21	19,47	25,91	32,35	38,80	58,12	27,14	36,06	44,98	53,91	80,68	30,85	41,33	51,82	62,30	93,76	44,06	59,14	74,22	89,30	134,54
	l	2,88	3,60	4,32	5,04	7,20	2,88	3,60	4,32	5,04	7,20	5,76	7,20	8,64	10,08	14,40	5,76	7,20	8,64	10,08	14,40	8,64	10,80	12,96	15,12	21,60
1805 mm	kg	16,08	20,94	25,80	30,65	45,23	21,91	29,15	36,39	43,63	65,35	30,48	40,51	50,54	60,57	90,66	34,60	46,39	58,18	69,96	105,32	49,38	66,34	83,29	100,24	151,10
	l	3,24	4,05	4,86	5,67	8,10	3,24	4,05	4,86	5,67	8,10	6,48	8,10	9,72	11,34	16,20	6,48	8,10	9,72	11,34	16,20	9,72	12,15	14,58	17,01	24,30
2005 mm	kg	17,77	23,16	28,56	33,96	50,15	24,23	32,27	40,31	48,35	72,47	33,72	44,86	56,00	67,14	100,56	38,27	51,35	64,44	77,53	116,80	54,61	73,44	92,27	111,09	167,57
	l	3,60	4,50	5,40	6,30	9,00	3,60	4,50	5,40	6,30	9,00	7,20	9,00	10,80	12,60	18,00	7,20	9,00	10,80	12,60	18,00	10,80	13,50	16,20	18,90	27,00
2305 mm	kg	20,30	26,50	32,71	38,92	57,53	27,72	36,96	46,20	55,44	83,15	38,60	51,40	64,20	77,00	115,41	43,76	58,80	73,84	88,89	134,01	62,46	84,10	105,73	127,37	192,28
	l	4,14	5,18	6,21	7,24	10,35	4,14	5,18	6,21	7,24	10,35	8,28	10,35	12,42	14,49	20,70	8,28	10,35	12,42	14,49	20,70	12,42	15,52	18,63	21,73	31,05
2605 mm	kg	22,83	29,84	36,86	43,87	64,91	31,21	41,65	52,08	62,52	93,83	43,52	57,99	72,45	86,91	130,30	49,35	66,34	83,34	100,33	151,32	70,46	94,90	119,35	143,80	217,13
	l	4,68	5,85	7,02	8,19	11,70	4,68	5,85	7,02	8,19	11,70	9,36	11,70	14,04	16,38	23,40	9,36	11,70	14,04	16,38	23,40	14,04	17,54	21,06	24,57	35,10
3005 mm	kg	26,21	34,30	42,39	50,48	74,76	35,86	47,90	59,93	71,97	108,07	50,07	66,75	83,43	100,11	150,15	56,77	76,37	95,96	115,56	174,36	81,07	109,26	137,45	165,65	250,23
	l	5,40	6,75	8,10	9,45	13,50	5,40	6,75	8,10	9,45	13,50	10,80	13,50	16,20	18,90	27,00	10,80	13,50	16,20	18,90	27,00	16,20	20,24	24,30	28,35	40,50

Vekttillegg ved Therm X2 Plan-V/-VM: 0.5 kg.
Når det gjelder Therm X2 Plan-VM er et begrenset utvalg lengder tilgjengelig.

Vedlegg F

Systemmatriser A og B

Nattverdier: $\omega_2 = \omega_3 = 767,6\ kg/s$

Initiell A

$$A_{natt} = 10^{-4} * \begin{bmatrix} -977,0 & 40,7 & 0 & 3,1 & 814,2 & 34,3 \\ 40,7 & -203,54 & 40,7 & 3,1 & 0 & 34,3 \\ 0 & 48,9 & -207,6 & 3,7 & 0 & 41,2 \\ 3,1 & 3,1 & 3,1 & -511,2 & 407,1 & 0 \\ 25000,0 & 0 & 0 & 12500,0 & -54242,0 & 0 \\ 79,3 & 79,3 & 79,3 & 0 & 0 & -867,7 \end{bmatrix}$$

Endelig A

$$A_{natt} = 10^{-4} * \begin{bmatrix} -316,1 & 42,41 & 0 & 0,8 & 225,7 & 10,7 \\ 305,3 & -684,1 & 152,7 & 5,6 & 0 & 107,9 \\ 0 & 31,6 & -85,3 & 1,2 & 0 & 23,9 \\ 0,3 & 0,3 & 0,3 & -28,1 & 18,9 & 2,4 \\ 122,2 & 0 & 0 & 29,1 & -190,3 & 0 \\ 2503,3 & 3506,6 & 3754,7 & 1568,3 & 0 & -125970 \end{bmatrix}$$

Initiell B

$$B_{natt} = 10^{-4} * \begin{bmatrix} 52,1 & 0 & 0 & 0 & 32,7 & 2,6 & 0,04 & 271,4 \\ 52,1 & 0 & 0 & 0 & 32,7 & 2,6 & 0,04 & 271,4 \\ 0 & 62,5 & 0 & 0 & 51,4 & 3,2 & 0,04 & 325,68 \\ 0 & 52,1 & 0 & 0 & 57,7 & 4,6 & 0,02 & 0 \\ 0 & 0 & 16742,0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 629,9 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Endelig B

$$B_{natt} = \begin{bmatrix} 11,2 & 0 & 0 & 0 & 25,2 & 0,1 & 0,5 * 10^{-6} & 271,4 \\ 22,2 & 0 & 0 & 0 & 91,3 & 0,3 & 285,3 * 10^{-6} & 271,4 \\ 0 & 5,8 & 0 & 0 & 22,9 & 0,1 & 577,1 * 10^{-6} & 325,68 \\ 0 & 0,6 & 0 & 0 & 0,6 & 0,2 & 24,7 * 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 39,0 & 0 & 0 & 0 & 01,2 * 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 114640,0 & 0 & 0 & 3116,0 * 10^{-6} & 0 \end{bmatrix}$$

Dagverdier: $\omega_2 = 2729\ kg/$ $_3 = 3241\ kg/s$

Initiell A

$$A_{dag} = 10^{-4} * \begin{bmatrix} -111{,}0 & 40{,}7 & 0 & 3{,}1 & 814{,}2 & 34{,}3 \\ 40{,}7 & -336{,}6 & 40{,}7 & 3{,}1 & 0 & 34{,}3 \\ 0 & 48{,}9 & -409{,}0 & 3{,}7 & 0 & 41{,}2 \\ 3{,}1 & 3{,}1 & 3{,}1 & -679{,}0 & 407{,}1 & 0 \\ 25000{,}0 & 0 & 0 & 12500{,}0 & -54242{,}0 & 0 \\ 79{,}3 & 79{,}3 & 79{,}3 & 0 & 0 & -867{,}7 \end{bmatrix}$$

Endelig A

$$A_{natt} = 10^{-4} * \begin{bmatrix} -344{,}64 & 42{,}41 & 0 & 0{,}8 & 225{,}7 & 10{,}7 \\ 305{,}3 & -741{,}5 & 152{,}7 & 5{,}6 & 0 & 107{,}9 \\ 0 & 31{,}6 & -103{,}9 & 1{,}2 & 0 & 23{,}9 \\ 0{,}3 & 0{,}3 & 0{,}3 & -30{,}2 & 18{,}9 & 2{,}4 \\ 122{,}2 & 0 & 0 & 29{,}1 & -190{,}3 & 0 \\ 2503{,}3 & 3506{,}6 & 3754{,}7 & 1568{,}3 & 0 & -125970 \end{bmatrix}$$

Initiell B

$$B_{dag} = \begin{bmatrix} 185{,}2 & 0 & 0 & 0 & 32{,}7 & 2{,}6 & 0{,}04 & 271{,}4 \\ 185{,}2 & 0 & 0 & 0 & 32{,}7 & 2{,}6 & 0{,}04 & 271{,}4 \\ 0 & 263{,}9 & 0 & 0 & 51{,}4 & 3{,}2 & 0{,}04 & 325{,}68 \\ 0 & 219{,}9 & 0 & 0 & 57{,}7 & 4{,}6 & 0{,}02 & 0 \\ 0 & 0 & 16742{,}0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 629{,}9 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Endelig B

$$B_{natt} = \begin{bmatrix} 39{,}8 & 0 & 0 & 0 & 25{,}2 & 0{,}1 & 0{,}5 * 10^{-6} & 271{,}4 \\ 78{,}8 & 0 & 0 & 0 & 91{,}3 & 0{,}3 & 285{,}3 * 10^{-6} & 271{,}4 \\ 0 & 24{,}3 & 0 & 0 & 22{,}9 & 0{,}1 & 577{,}1 * 10^{-6} & 325{,}68 \\ 0 & 2{,}8 & 0 & 0 & 0{,}6 & 0{,}2 & 24{,}7 * 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 39{,}0 & 0 & 0 & 0 & 01{,}2 * 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 114640{,}0 & 0 & 0 & 3116{,}0 * 10^{-6} & 0 \end{bmatrix}$$

Optimal pådragsmatrise $\boldsymbol{L}$

Nattverdier: $\boldsymbol{\omega_2 = \omega_3 = 767,6\ kg/s}$

$$L_{natt} = 10^{-4} * \begin{bmatrix} 478,3 & 832,9 & 116,32 & 18,2 \\ 703,6 & 2605,9 & 1157,5 & 20,2 \\ 46,7 & 587,1 & 1102,7 & 21,5 \\ 16,3 & 21,5 & 47,0 & 160,0 \\ 232,6 & -5,7 & -7,9 & 49,3 \\ 30,9 & 107,2 & 68,1 & 3,6 \end{bmatrix}$$

Dagverdier: $\boldsymbol{\omega_2 = 2729\ kg/}$ $\boldsymbol{_3 = 3241\ kg/s}$

$$L_{dag} = 10^{-4} * \begin{bmatrix} 1084,6 & 1728,3 & -120,9 & 25,2 \\ 1461,7 & 3981,2 & 586,7 & -2,3 \\ -48,3 & 295,3 & 2450,7 & 105,3 \\ 23,0 & -5,2 & 231,3 & 173,3 \\ 201,0 & -11,9 & 4,7 & 47,2 \\ 61,3 & 154,6 & 89,9 & 5,8 \end{bmatrix}$$