



Universitetet  
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

## BACHELOROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering:

Automatisering og elektronikkdesign, y-vei

Vårsemesteret 2021

Åpen

Forfatter: Vegard Jaatun, Espen Grønskei Sandengen

Fagansvarlig: Tormod Drengstig

Veileder(e): Tormod Drengstig

Tittel på bacheloroppgaven:

Styresystem for gjæringsprosessen ved Jåttå gårdsbryggeri AS

Engelsk tittel:

Control system for fermentation process at Jåttå gårdsbryggeri AS

Studiepoeng: 20

Emneord:

PLS

Modellutvikling

Simulering

PID-regulering

Brukergrensesnitt

Matlab

Simulink

Sidetall: .....79.....

+ vedlegg/annet: .....6.....

Stavanger, ...15/05/2021...  
dato/år

# Styresystem for gjæringsprosessen ved Jåttå Gårdsbryggeri AS

Universitetet i Stavanger



Vegard Jaatun  
Espen Grønskei Sandengen

15. mai 2021

# Sammendrag

Oppgaven har gått ut på å konstruere et styresystem for temperaturregulering av gjæringsprosessen ved Jåttå gårdsbryggeri AS. For å styre temperaturen benyttes kun utstyr for nedkjøling av gjæringsprosessen, ettersom gjæringsprosessen utvikler varme. Nedkjøling av ølet foregår ved at en reguleringsventil på hver tank styrer gjennomstrømming av kjølevæske i tankenes kjølekapper.

Vi har benyttet det eksisterende kjøleanlegget i bryggeriet, som består av en kjølekolonne, tank for oppsamling av kjølevæske, pumpe og rør ut til hver enkelt gjæringsstank. Pumpepådraget står da konstant døgnet rundt og det ble derfor bare implementert styring av reguleringsventilene inn til hver av gjæringskarene.

For temperaturovervåking ble det kjøpt inn Pt100-sensorer og transmittere. Bryggeriet hadde reguleringsventiler de ønsket å gjenbruke, og styresystemet ble dermed skreddersydd for bruk av disse. Bryggeriet har videre bidratt med finansiering av nødvendig utstyr for å bygging av styreskap. Det har vært fokus på å holde utgiftene lave og gjenbruke det man kan fra eksisterende styresystem.

Styreskapet ble bygget, testet og ferdigstilt på et av UiS sine laboratorier. Deretter ble produksjonen i bryggeriet stanset i en uke mens montasje av reguleringsventiler, styreskap og kabeltrekking ble gjennomført. For å få produksjonen i gang så fort som mulig ble det midlertidig implementert en enkel av/på-regulering for kjøling av ølet mens arbeidet med modellering og avdekking av PID-parametere fortsatte.

Det ble utviklet en matematisk modell for temperaturen i øl og kjølevæske, som ble verifisert mot loggede data fra en gjæringsprosess. I forbindelse med modelleringen ble det gjennomført eksperiment på bryggerianlegget. Det ble da funnet estimat for væskeflyt gjennom kjølekappene, ventilkaraktistikk og varmeoverføringskoeffisient fra øl til kjølevæske.

Modellen ble verifisert mot måledata, og basert på den lineære modellen og Skogestad's metode ble det beregnet regulatorparametere.

Avsluttende testing i bryggeriet avdekket betydelig ventilsvikt. Det er grunn til å tro at ventilene fungerte som forventet i de innledende eksperimentene, men har deretter gradvis opparbeidet seg større og større lekkasjer. Innledningsvis ble det konkludert

med at lekkasjene kom fra oppbygging av is på ventilene, men problemene fortsatte selv etter at det ble gjort tiltak mot isen. Ingen øl har gått til spille som følge av ventilsvikten, da lekkasjene har falt i balanse med varmeproduksjonen fra gjærens metabolyse. Det ble til slutt konkludert med at gjenbruken av de gamle reguleringsventilene ikke lot seg gjøre, og at bryggeriet må vurdere en investering i nye og tette ventiler.

Parallelt med modellutvikling og testing har det vært fokus på utvikling av et mest mulig funksjonelt og enkelt brukergrensesnitt. Det har vært kontinuerlig kommunikasjon mellom forfatterne av rapporten og bryggeriledelsen, slik at endelig produkt har blitt i henhold til bryggeriets ønsker. Brukergrensesnitt er likevel utformet på en universell måte, slik at det kan implementeres og brukes i andre bryggerier.

# Forord

Dette er en avsluttende bacheloroppgave til studiet *Automatisering og elektronikkdesign, y-vei* som tilbys av det teknisk-naturvitenskapelige fakultetet ved Universitetet i Stavanger.

Dette er en ekstern oppgave som forfatterne har utledet grunnlaget for i samarbeid med Jåttå Gårdsbryggeri AS. Prosjektet tar hovedsakelig utgangspunkt i pensum fra emnene *ELE320-Reguleringsteknikk* og *ELE310-Styringsteknikk*.

Vi ønsker å takke bryggeriet for at de gjorde prosjektet mulig ved finansiering av utstyr og bistand for eksperimentering på bryggerianlegget.

Videre vil vi rette en takk til vår veileder, Tormod Drengstig, som har vært en klippe i prosjektet med solide tilbakemeldinger og grundig oppfølging.

Ikke minst vil vi takke labingeniør Romuald Karol Bernacki. I arbeidet med PLS, styreskap og elektroteknikk har Romauld stilt seg disponibel og vært en enorm ressurs for oss i det daglige arbeidet med løsning av små og store utfordringer.

# Innholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>2</b>
1.1	Om de involverte i prosjektet . . . . .	2
1.2	Bryggerverkets status før oppstart . . . . .	2
1.3	Motivasjon for prosjektet . . . . .	5
1.4	Oppbygging av rapporten . . . . .	6
1.5	Oppgavebeskrivelse . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Teorigrunnlag: Gjæring av øl</b>	<b>7</b>
2.1	Innledning . . . . .	7
2.2	Om fermentering av øl . . . . .	7
2.3	Faser i gjæringsprosessen . . . . .	9
2.3.1	Formeringsfasen . . . . .	10
2.3.2	Stormgjæring . . . . .	10
2.3.3	Sekundærgjæring . . . . .	11
2.3.4	Stasjonærfase . . . . .	11
2.4	Konveksjon . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Styresystemet</b>	<b>13</b>
3.1	Innledning . . . . .	13
3.2	Styreskap . . . . .	14
3.2.1	PLS . . . . .	15
3.2.2	HMI . . . . .	15
3.3	Prosessen som skal reguleres . . . . .	17
3.4	Temperatursensorer og transmittere . . . . .	17
3.4.1	Temperatursensor for industriell tanktype . . . . .	18
3.4.2	Temperatursensor for modifisert melketank . . . . .	18
3.4.3	Transmittere . . . . .	20
3.5	Reguleringsventiler . . . . .	20
3.6	Skalering av analoge signaler . . . . .	23
3.7	Datalogging . . . . .	26
3.8	Brukergrensesnitt . . . . .	28
3.9	Av/på-regulator . . . . .	31

<b>4</b>	<b>Modellutvikling</b>	<b>32</b>
4.1	Innledning . . . . .	32
4.2	Ventilmodell . . . . .	33
4.3	Eksperiment 1: Installert ventilkarakteristikk . . . . .	34
4.3.1	Eksperimentelt . . . . .	34
4.3.2	Resultat . . . . .	35
4.3.3	Diskusjon og konklusjon . . . . .	37
4.4	Eksperiment 2: Væskeflyt når flere tanker kjører samtidig. . . . .	38
4.4.1	Eksperimentelt . . . . .	38
4.4.2	Resultat . . . . .	39
4.4.3	Diskusjon og konklusjon . . . . .	39
4.5	Varmestrømmer og energier . . . . .	40
4.5.1	Varmestrømmene . . . . .	41
4.5.2	Energimengden i øl og kjølevæske . . . . .	42
4.6	Eksperiment 3: Estimere temperaturoverføringskoeffisienten . . . . .	43
4.6.1	Eksperimentelt . . . . .	43
4.6.2	Resultat . . . . .	44
4.6.3	Diskusjon og konklusjon . . . . .	48
4.7	Modellering av gjæringsprosessen . . . . .	49
4.7.1	Differensialligning for kjølevæsketemperatur . . . . .	49
4.7.2	Differensialligning for temperatur i ølet . . . . .	50
4.7.3	Oppsummert ulineær modell . . . . .	50
4.8	Implementering og verifikasjon av ulineær modell i Simulink . . . . .	51
4.8.1	Implementering i Simulink . . . . .	51
4.8.2	Verifikasjon av ulineær modell ved sammenligning mot måledata . . . . .	54
4.8.3	Diskusjon og konklusjon . . . . .	56
4.9	Linearisering og overføringsfunksjon . . . . .	57
4.9.1	Linearisering av differensialligning for kjølevæsketemperatur: . . . . .	57
4.9.2	Tilstandsrommodell og overføringsfunksjon . . . . .	58
4.10	Verifisering av overføringsfunksjon . . . . .	60
4.10.1	Arbeidspunkt . . . . .	60
4.10.2	Simulering av $H_p$ . . . . .	61
4.10.3	Diskusjon og konklusjon . . . . .	62
4.11	Analyse av overføringsfunksjonen . . . . .	63
4.11.1	Poler og karakterisering . . . . .	63
4.11.2	Forenkling av $H_p$ . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Regulatorparametere</b>	<b>67</b>
5.1	Skogestads metode . . . . .	67
5.2	Simulering med regulatorparametere . . . . .	67
5.2.1	Diskusjon og konklusjon . . . . .	69
5.3	Implementering av PID-algoritme i PLS . . . . .	70
5.4	Verifikasjon av PI-regulator i bryggeriet med moderne tanktype . . . . .	71
5.5	Diskusjon og konklusjon . . . . .	72

<b>6</b>	<b>Avsluttende diskusjon og konklusjon</b>	<b>73</b>
6.1	Diskusjon og konklusjon . . . . .	73
<b>A</b>	<b>Alle datablad</b>	<b>77</b>
<b>B</b>	<b>Programfiler</b>	<b>78</b>
<b>C</b>	<b>Utstyrsdeler i styreskap</b>	<b>79</b>
C.1	Kapsling . . . . .	79
C.2	Strømforsyning 24VDC . . . . .	80
C.3	Strømforsyning 24 VAC . . . . .	80
C.4	Svitsj . . . . .	80
C.5	Vern . . . . .	81
C.6	Kabling . . . . .	81
<b>D</b>	<b>Koblings skjema</b>	<b>83</b>
<b>E</b>	<b>Rekkeklemmetabell for styreskap</b>	<b>88</b>
E.1	Rekkeklemmetabell: Anlegg - internt . . . . .	88
E.2	Interntabell: styrestrøm . . . . .	90
E.3	Interntabell: hovedstrøm . . . . .	90
<b>F</b>	<b>Initialisering av PLS</b>	<b>91</b>
F.1	Speiling og initialisering av inn-/utganger . . . . .	92
F.2	PLSens tilkoblingsoppsett . . . . .	96
F.3	HMIens tilkoblingsoppsett . . . . .	98



# Kapittel 1

## Innledning

### 1.1 Om de involverte i prosjektet

Jåttå Gårdsbryggeri AS er et mikrobryggeri fra Stavanger som ble etablert i 2015 av tre kamerater med en lidenskap for hjemmebrygging. Av disse tre kameratene er det i dag Marius Marthinsen og Kristoffer Fossmark som står for den daglige driften av bryggeriet.

Selve prosjektet har blitt gjennomført av Espen Grønskei Sandengen og Vegard Jaatun. Begge har tidligere erfaring som elektrikere og sistnevnte var også blant de tre som grunnla og stiftet bryggeriet. Fra UiS har Tormod Drengstig stått som veileder og fagansvarlig.

### 1.2 Bryggverkets status før oppstart

Det eksisterende anlegget i bryggeriet er i stor grad basert på hjemmelaget utstyr som bryggerne har sveiset på egenhånd. Både meskekar og kokekar er gamle melketanker fra Tine og rommer oppimot 3000 liter, men typisk brygges ikke mer enn 1000 liter om gangen.



Figur 1.1: Kokekar til venstre og meskekar til høyre.

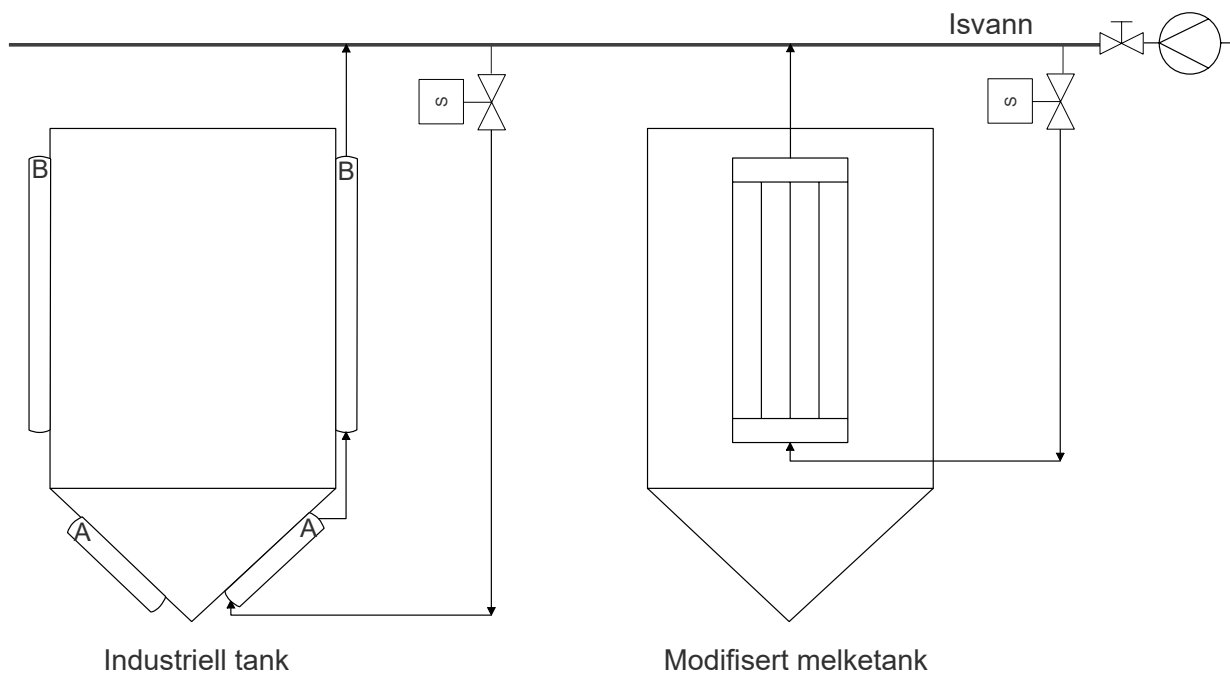
Ved oppstart av dette prosjektet hadde bryggeriet seks gjæringskar. Hvorav ett av de eksisterende var en moderne industritank og de resterende fem var modifiserte melketanker. Alle gjæringskarene har kapasitet til å fermentere 1000 liter øl hver. For temperaturstyring er tankene utstyrt med kjølekapper for gjennomstrømming av kjølevæske. Bryggeriet hadde dessuten på forhånd bestilt inn fire nye tanker av samme type som den moderne til venstre i figur 1.2. Styresystemet som ble utviklet i denne oppgaven måtte derfor være klart for disse tankene til de blir levert. Til sammen ble det da ti gjæringskar i systemet.



Figur 1.2: Moderne tank til venstre og modifiserte melketanker fra høyre.

Begge tanktypene er isolerte og har koniske bunner for ansamling av gjærceller og slam, jamfør figur 1.3. Hovedforskjellen på tankene er utforminga av kjølekappene. Den moderne varianten har to seriekoblede sløyfer som går 360° rundt tanken. De

modifiserte melketankene har kun en plate i ryggen hvor kjølevæska strømmer igjennom. Gjærcellene produserer varme når de omdanner sukker til alkohol og det er denne varmen som må fjernes slik at ølet holder en så konstant temperatur som mulig. For å regulere denne prosessen er det derfor kun nødvendig med et system for nedkjøling av brygget, og tankene har dermed heller ingen mulighet for å varme opp ølet.



Figur 1.3: Teknisk diagram over anlegget slik det står i dag

Temperaturstyringa i gjæringsprosessen ble tidligere gjort av noen enkle termostater kalt STC100, se figur 1.4. Disse har vært med bryggeriet helt siden det startet som et enkelt hobbyprosjekt i garasjen, og symboliserer en lenge etterlengtet oppgradering. Sensorene til disse termostatene er av ukjent type og presisjon, har heller ingen form for reguleringsalgoritme eller PID-styring. De vil kun skru kjølingen av og på avhengig av om målt temperatur er innenfor valgt verdiintervall.



Figur 1.4: Eksisterende ventiler og styreskap for gjæringsprosessen. STC100-enhetene er felt inn i døra.

For å åpne eller stenge for gjennomstrømning av kjøleveske i tankene ble det tidligere brukt enkle solenoideventiler fra nettstedet Ebay. Vi har ingen navn eller teknisk dokumentasjon på disse ventilene og vi er ikke sikre på om de fremdeles er i produksjon. Bryggeriet har hatt problemer med at disse ofte går i stykker og må byttes til andre liknende ventiler.

### 1.3 Motivasjon for prosjektet

For mikrobryggeriene sin del har vi de siste årene observert at den mest typiske temperaturstyringen er ved av/på-styring av kjølesystemet. Dette er bryggeri som typisk har gjæringstanker i størrelsesorden rundt 1000 liter.

Samtaler med forskjellige bryggmestere har avslørt at dette er en helt kurant måte å regulere gjæringstemperaturen på, men ulempen er at denne metoden ofte gir litt mer kjøling enn ønsket. Typisk vil flere bryggeri stille inn regulatoren en grad over ønsket gjæringstemperatur, og dermed kompensere for denne ekstra kjølingen. Dette har også vært tilfellet på Jåttå, men her har problemet blitt ytterligere forsterket av upresise sensorer.

En bedre løsning vil derfor være regulering basert på en PI- eller PID-regulator, slik at regulatoren hele tiden kan tilpasse nedkjølinga opp mot hvor mye varmeproduksjon som skjer inni tanken. Motivasjonen for denne oppgaven var derimot å utvikle en PID-regulator som kan håndtere brygg av industriell størrelsesorden. I dette prosjektet er regulatoren som ble utviklet skreddersydd til Jåttå gårdsbryggeri med hensyn til deres kjølesystem og gjæringstanker, men programmet er likevel utformet på en slik måte at det kan implementeres i et hvilket som helst bryggeri og tilpasses ved eksperimentering. Det nye reguleringssystemet har blitt både utviklet, montert,

driftsatt og testet.

## 1.4 Oppbygging av rapporten

- Kapittel 1 - Introduksjon
  - Innledende informasjon om oppgaven og rammeverket rundt.
- Kapittel 2 - Teori rundt fermentering av øl.
- Kapittel 3 - Valg av utstyr, leverandører, konstruksjon av styreskap, brukergrensesnitt og PLS-oppsett.
- Kapittel 4 - Vekselvis teoretisk modellering av gjæringsprosessen og eksperimentering på bryggerianlegg for å avdekke viktige parametere. Modellen blir også verifisert i dette kapittelet ved hjelp av både simuleringer og fysiske eksperimenter.
- Kapittel 5 - Beregning av regulatorparametere, simulering og verifisering. Implementering av PID i PLS.
- Kapittel 6 - Avsluttende diskusjon og konklusjon.

## 1.5 Oppgavebeskrivelse

- Automatisering av gjæringsprosessen
  - Beskrive utfordringer bryggeriet møter i sin gjæringsprosess i dag.
  - Beskrive gjæringsprosessen
  - Finne nødvendig utstyr og leverandører.
  - Bygge styreskap og montere utstyr i bryggeriet.
  - Utføre eksperiment i bryggeriet for å avdekke viktige parametere og verifisere funksjonaliteten.
  - Lage matematisk modell og simuleringsmodell av prosessen.
  - Beskrive type system og dynamikk man har med å gjøre.
  - Utvikle kode og matematikk for regulering av temperaturen.
  - Utvikle PLS-program.
  - Utvikle et brukervennlig grensesnitt (HMI) for bryggerne.
  - Implementere og teste.

## Kapittel 2

# Teorigrunnlag: Gjæring av øl

### 2.1 Innledning

En av forfatterene av denne rapporten var tidligere bryggmester ved Jåttå gårdsbryggeri. Mye av informasjonen som legges fram i dette kapittelet er derfor basert på kunnskap og erfaringer fra denne personen sin fartstid i bryggeriet og hva han har tilegnet seg av kunnskap fra bøkene *How to brew* [15] av John Palmer, *Encyclopaedia of Brewing* [8] av Christopher Boulton og *Designing Great Beers* [9] av Ray Daniels.

Hvis man ser grovt på bryggeprosessen, kan den deles opp i de fire fasene mesking, koking, gjæring og modning. For denne oppgaven sin del er det da gjæringsfasen som er den interessante og som omtales i dette kapittelet. Vi har her forsøkt å legge fram de viktigste prinsippene for gjæringsfasen uten å henge oss for mye opp i bryggetekniske detaljer. Forskjellige brygg vil gjæres på forskjellig vis og ha annerledes tempo og energiutvikling. Vi vil derfor se på de generelle trekkene som går igjen for alle typer brygg med fokus på hva som har betydning for den temperaturstyringa som gjøres i denne oppgaven.

For variasjonens skyld vil ordene gjæring og fermentering brukes om hverandre, og må ses på som ekvivalente i betydning.

### 2.2 Om fermentering av øl

Fermentering er en prosess som omdanner vørter til ferdig øl som er klar for modning/lagring. Når bryggmester har mesket og kokt vørteren kjøler han den ned gjennom en varmeveksler og pumper den over til gjæringskaret. Her brukes kjølekappene i gjæringstanken til å gjøre den siste biten av nedkjølinga til ønsket gjæringstemperatur før selve gjæren blir tilsatt. Noen typiske gjæringstemperaturer kan ses i tabell 2.1.

Øltype	Typisk gjæringstemperatur
Pilsner	10-15 °C
Amerikansk ale	19-20 °C
Engelsk ale	20-21 °C
Belgisk ale	21-22 °C
Norsk kveikøl	25-35 °C

Tabell 2.1: Typiske gjæringstemperaturer.

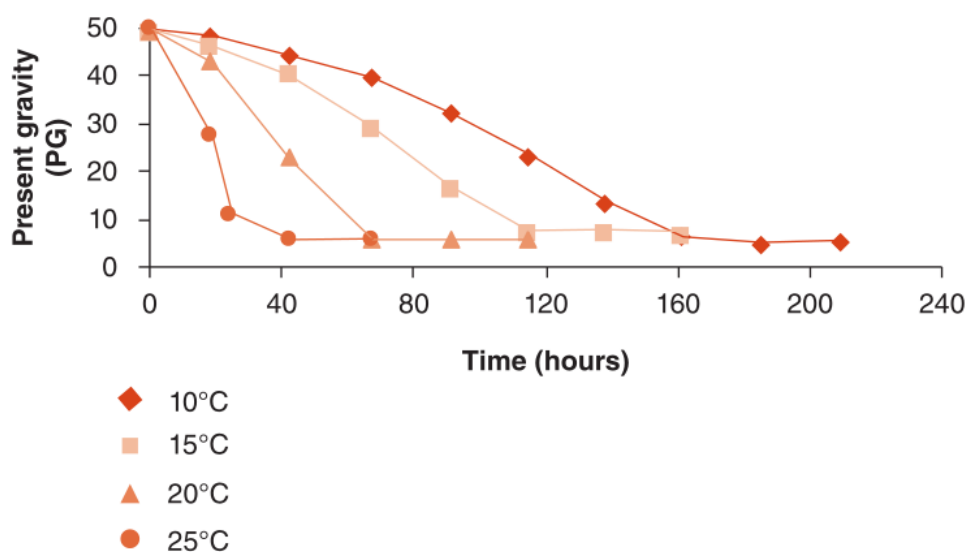
Gjærcellene som typisk brukes til fermentering av øl kalles *Saccharomyces cerevisiae*. Et kjent uttrykk i bryggeribransjen er: *Bryggmesteren lager vørteren, mens gjæren lager ølet*. Oppdraget til de ansatte i bryggeriet er altså å sørge for at gjærcellene har best mulig arbeidsvilkår, da spesielt med tanke på sukkersammensetning i vørteren, oksygennivå, temperatur og andre næringsstoffer.

Under fermentering vil gjærcellene forbruke sukker, næringsstoffer og oksygen for å formere seg. Videre brukes resten av oksygenet til såkalt *aerob* gjæring, hvor gjærcellene forbraker sukker og produserer CO<sub>2</sub>, etanol og varme. Etter hvert som oksygenet i vørteren blir brukt opp vil fermenteringen gå over til *anaerob* gjæring, som gjør samme nytten men har vesentlig lavere aktivitet.

Reaksjonen som skjer kan grovt oppsummeres som i ligning 2.1. Her er ordet *yeast* brukt om gjærceller for å unngå bruk av bokstaven *æ*. Denne reaksjonsligningen er riktig nok en forenkling av virkeligheten. Det vil være en myriade av næringsstoffer som blir konsumert av gjærcellene. Likedan vil det være avfallsstoffer som produseres av gjæren, og noen av disse er ønskelige for smaken i ølet.



Hvor hurtig reaksjonen i ligning 2.1 skjer vil i stor grad styres av temperaturen man velger å gjære ølet på. Kort fortalt vil høy temperatur gi hurtig gjæring, mens lavere temperaturer gir mer forsiktig gjæring. Jmfør figur 2.1, som viser hvordan ølets tetthet endrer seg under fermentering.



Figur 2.1: Grafen viser hvordan ølets tetthet, i spesifikk gravitet, endrer seg under fermentering på forskjellige gjæringstemperaturer. Hentet fra *Encyclopaedia of Brewing*[8] side 229.

I bryggerinæringen brukes ofte spesifikk gravitet for måling av tettheten av et øl relatert til rent vann. Spesifikk gravitet før og etter fermentering kan dermed brukes til å estimere omtrent hvor mye sukker som må ha blitt omdannet til alkohol, og dermed bestemme alkoholprosenten i ølet. *Original gravity* (OG) brukes om tetthet før fermentering, mens *final gravity* er tetthet etter fermentering. En måling på vilkårlig tidspunkt kalles *specific gravity* (SG). Eksempelvis vil en SG på 1045 tilsvare  $1,045 \frac{\text{kg}}{\text{L}}$  i SI-systemet.

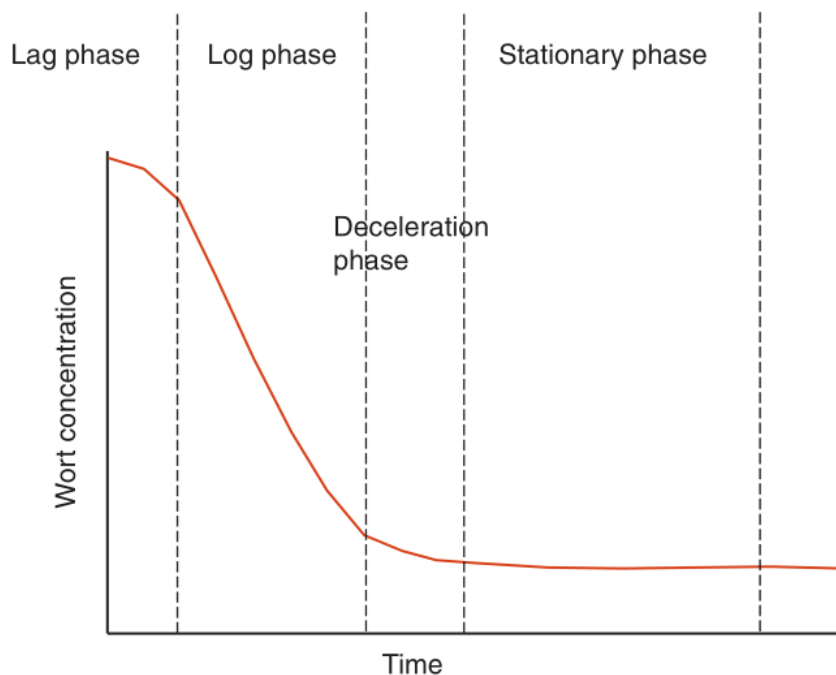
### 2.3 Faser i gjæringsprosessen

Som vist i figur 2.2 kan gjæringsprosessen deles opp i flere faser, på norsk brukes ofte følgende oversettelser:

- Lag phase - formeringsfase
- Log phase - stormgjæring
- Deceleration phase - sekundærgjæring
- Stationary phase - stasjonærfase

Disse fasene blir beskrevet mer detaljert i de neste delkapittelene.





Figur 2.2: Grafen viser hvordan ølets tetthet endrer seg i løpet av de forskjellige fasene av fermenteringen. Hentet fra *Encyclopaedia of Brewing*[8] side 229.

### 2.3.1 Formeringsfasen

Under formeringsfasen vil gjærcellene forbruke oksygen til å formere seg opp til typisk fem ganger antallet som da den ble tilsatt. Noe av aktiviteten i denne fasen vil også gå til å omdanne sukker til alkohol, altså aerob gjæring, men det er lite i forhold til resten av prosessen.

Når oksygenet er brukt opp vil samtlige gjærceller gå over til å fermentere ølet i henhold til ligning 2.1, mesteparten av brygget vil altså fermenteres anaerobt.

Formeringsfasen kan vare i opp til flere dager, alt etter hvor flink bryggeren har vært til å legge forholdene til rette for gjærcellene. Dersom bryggmester tilsetter korrekt antall gjærceller, såkalt *pitching rate*, og tilfører nok oksygen i tanken, vil denne fasen kunne reduseres til en størrelsesorden av timer i stedet for dager.

### 2.3.2 Stormgjæring

Som navnet tilsier er dette fasen hvor gjærcellene har mest aktivitet og omdanningen av sukker til alkohol skjer hurtig. Jamfør igjen figur 2.1 for omtrentlige tider.

Det er i denne fasen man må sørge for å ha god nedkjøling av ølet, ettersom det er her størstparten av energiutviklingen foregår. Fred Scheer [16] estimerer at gjæren i

denne fasen vil produsere omtrent 587 kJ per kilo fermenterbart sukker. For et typisk brygg på Jåttå, med OG = 1,045 og FG = 1,012, vil den totale energiutviklingen for et brygg på 1000 liter være:

$$E_{\text{utv}} = 587 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \cdot (1,045 - 1,012) \left[ \frac{\text{kg}}{\text{L}} \right] \cdot 1000[\text{L}] = \underline{19,37 \cdot 10^6[\text{J}]} \quad (2.2)$$

### 2.3.3 Sekundærgjæring

Stormgjæringa vil gradvis gå over til sekundærgjæring etter hvert som tilgangen på gjærbart sukker og næringsstoffer avtar i vørteren. Hvilke næringsstoffer dette gjelder er da avhengig av øltype og gjærtype.

Visuelt for bryggeren vil denne fasen kjennetegnes av at produksjonen av CO<sub>2</sub> avtar betydelig. Typisk vil en gjæringstank ha et rør ned fra toppen som munner ut i en vannlås. Når boblingen i vannlåsen avtar vet man derfor at gjæringen er i ferd med å stoppe.

For brygging av *ale* vil sekundærfasen være en gradvis nedtrapping av stormgjæringa og er av liten betydning for utfallet av ølet. Sekundærfasen er derimot mye viktigere i produksjon av tradisjonelle *lagerøl*, som for eksempel pilsner. Ved produksjon av disse øltypene vil gjerne bryggmester gripe inn i denne fasen ved å endre temperaturen i ølet for å oppnå ønsket ølkvalitet.

### 2.3.4 Stasjonærfase

Når alt av næring i vørteren er brukt opp vil fermenteringen avsluttes og innta stasjonærfasen. Innledningsvis i denne fasen er gjæren fremdeles oppløst i ølet. Typisk ønsker man å holde brygget noen dager i denne fasen. Gjærcellene vil da i løpet av disse dagene bryte ned en del avfallsstoffer som har blitt produsert under fermenteringa.

I denne fasen vil gjæren begynne å flokkurere, det vil si klumpe seg sammen og synke til bunnen av tanken. Flokkuleringen vil ytterligere forsterkes av at bryggmester kjøler ned ølet til tappetemperatur, såkalt *cold crash*<sup>1</sup>. Den koniske tankbunnen gjør det enkelt å tappe av gjærcellene, som igjen kan nyttes til neste brygg. Deretter kan man igjen tilsette karbondioksid til ølet for å få ønsket kullsyrenivå før ølet tappes på flasker.

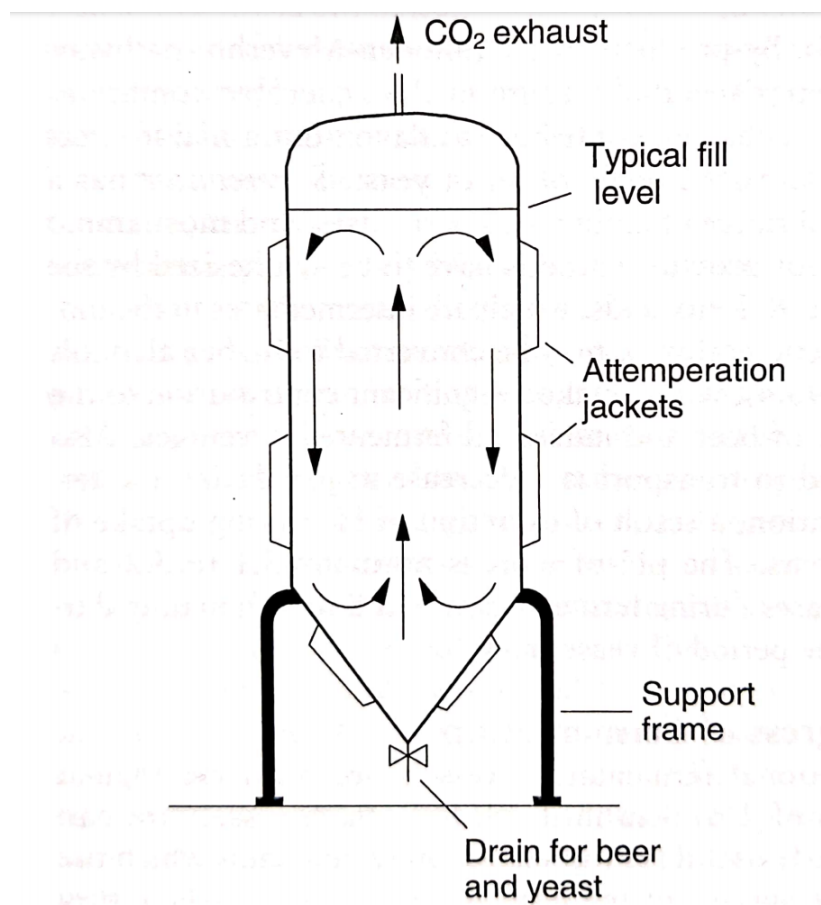
## 2.4 Konveksjon

Gjæringsprosessen vil selv sørge for kontinuerlig røring i ølet. Dette skjer både gjennom produksjon av CO<sub>2</sub> som stiger opp mot toppen av tanken, og gjennom varme-konveksjon som følger av gjærens metabolyse. Denne konveksjonen kan videre for-

---

<sup>1</sup>En hurtig nedkjøling av det ferdige ølet ned til 2-4 °C.

sterkes ved å sette drift på kjølekappene, og dermed lage et kulderas langs veggene inne i tanken. Dette er illustrert i figur 2.3.



Figur 2.3: Figuren illustrerer konveksjon av varm vørter og karbondioksid oppover. Nedkjølt vørter synker nedover langs veggene etter kontakt med kjølekappene. Bildet er skannet fra *Food Microbiology* [10] side 856.

## Kapittel 3

# Styresystemet

### 3.1 Innledning

I dette kapitlet beskrives oppbyggingen av styresystemet og det er delt opp i følgende underkapitler:

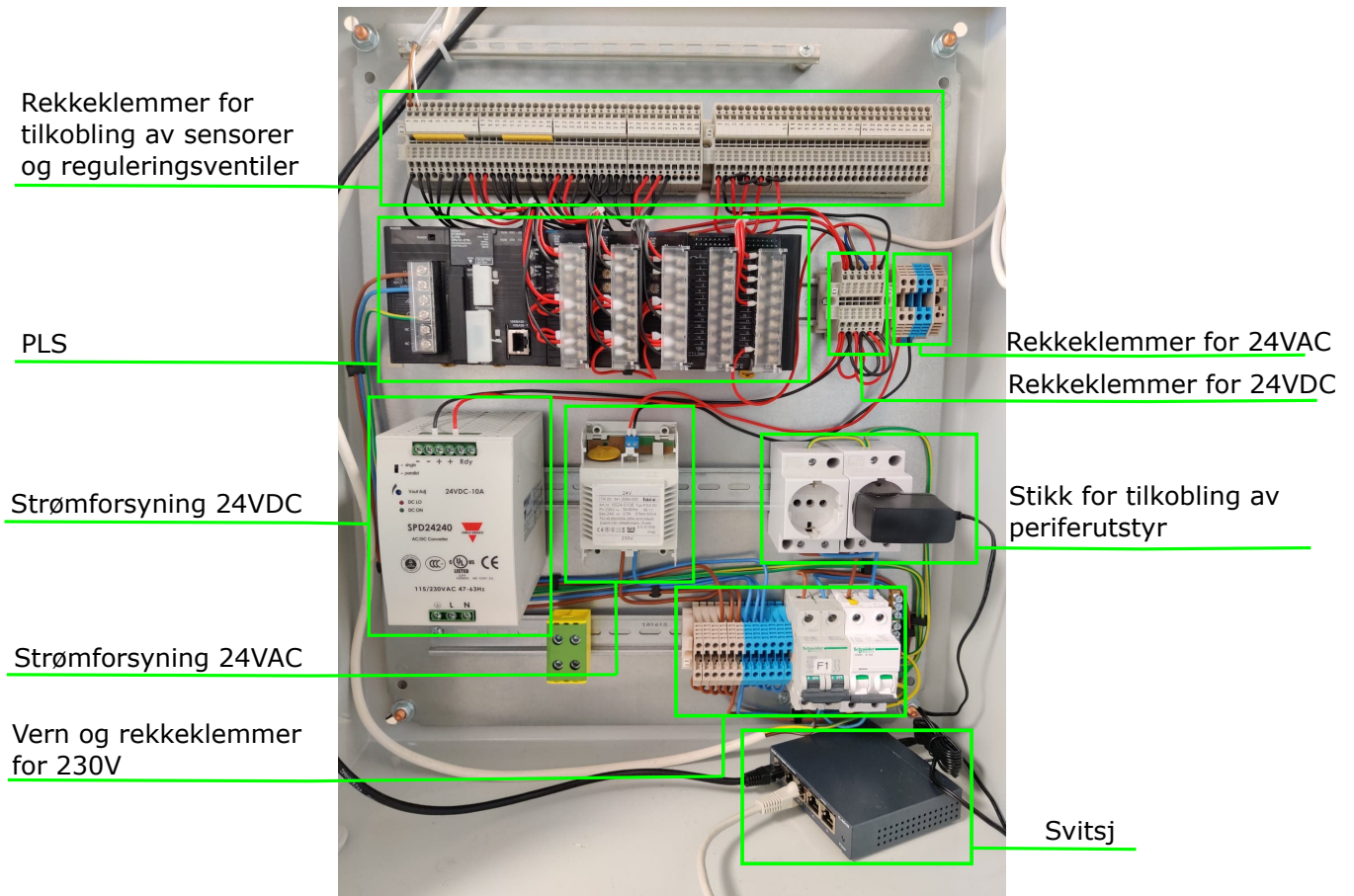
- Styreskap.
- Prosessen som skal reguleres.
- Temperatursensorer og transmittere.
- Reguleringsventiler.
- Skalering av analoge signal.
- Datalogging
- Brukergrensesnitt
- Av/på-regulator

Følgende vedlegg er spesielt relevant til dette kapitlet:

- Vedlegg A: Alle datablad og brukermanualer er samlet her.
- Vedlegg B: Programfiler for Matlab og CX-One er samlet her.
- Vedlegg C: Utdypende tekst om komponentene som inngår i styreskapet.
- Vedlegg D: Koblingsskjema for ventiler og sensorer.
- Vedlegg E: Rekkeklemmetabeller.

## 3.2 Styreskap

I forbindelse med prosjektet bygde vi et styreskap som senere ble montert i bryggeriets gjæringslokaler. Figur 3.1 viser det ferdigbygde skapet og gir en oversikt over komponentene som ble brukt.

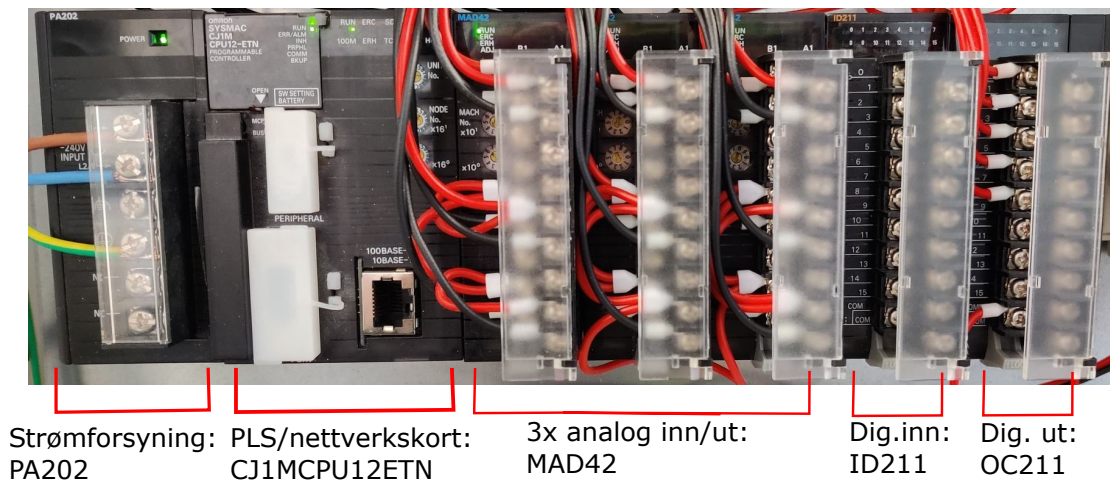


Figur 3.1: Oversiktsbilde over styreskapet.

### 3.2.1 PLS

Vi har benyttet oss av en av UiS sine gamle PLS-er fra produsenten Omron. I henhold til figur 3.2 kan man se at den er utstyrt med tre MAD42 analogkort, ett ID211 digitalt inngangskort og ett OC211 digitalt utgangskort.

- 3x MAD42
  - Totalt tolv analoge innganger
  - Totalt seks analoge utganger
- OC211
  - 16 digitale reléutganger
  - Forspent med 24 VDC
- ID211
  - 16 digitale innganger
  - Kan blant annet brukes til å overvåke høy/lav status på enkelte utstyrsdeler.



Figur 3.2: Detaljbilde over PLS

### 3.2.2 HMI

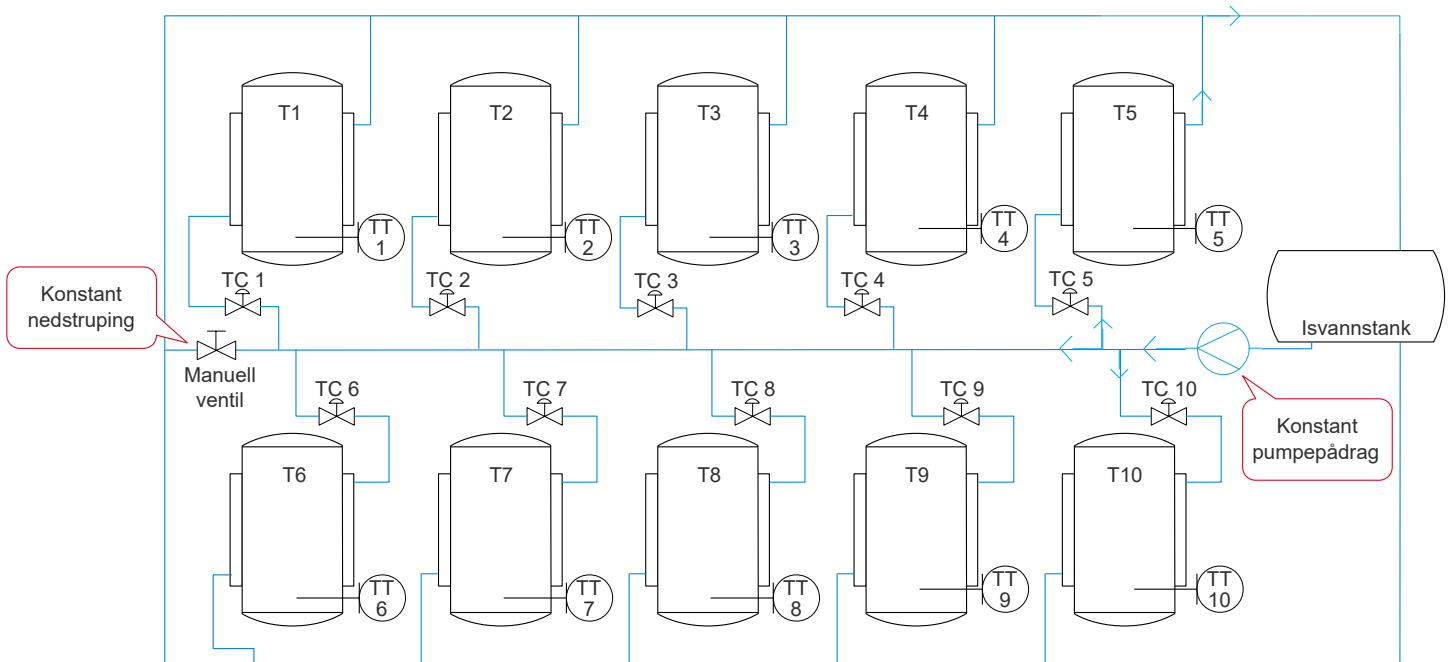
Vi brukte skjermen NS5 fra produsenten Omron, som er en TFT-berøringsskjerm med oppløsning på 320x240 piksler [5]. TFT betyr tynnfilmtransistor og vil si at skjermen har en matrise av berøringssensitive punkter som operatøren kan trykke på. Den krever 24 V driftspenning og har et internt minne på 64 Mb som kan brukes til å blant annet lagre loggedata.



Figur 3.3: NS5 fra Omron. Bildet hentet fra Omrons hjemmeside.[5]

### 3.3 Prosessen som skal reguleres

Oversikt over hele kjølesøyfa, reguleringsventiler og sensorer kan ses figur 3.4. Figuren viser hvordan systemet er konstruert som helhet og illustrerer hvordan kjølevæska beveger seg mellom isvannstanken og kjølekappene til tankene. Pumpa har konstant pådrag, og den manuelle strupeventilen til venstre i figur 3.4 (markert med tekstboble) står med fast nedstruping. Det vil si at det eneste som skal ha variabelt pådrag i dette systemet er reguleringsventilene TC 1-10.



Figur 3.4: Diagram over kjølesøyfa med temperatursensorer og reguleringsventiler.

### 3.4 Temperatursensorer og transmittere

Temperatursensorene og transmitterene ble levert av det norske firmaet Autek AS i Drammen som spesialiserer seg på instrumentering og prosesskontroll. De har levert to forskjellige sensortyper til de to ulike tanktypene i bryggeriet. Begge sensorene er av typen Pt100 og har en nøyaktighet klassifisert som "A" i henhold til IEC 60751:2008. Jamfør figur 3.5.



## TOLERANSE FOR PT 100

IEC 60751:2008

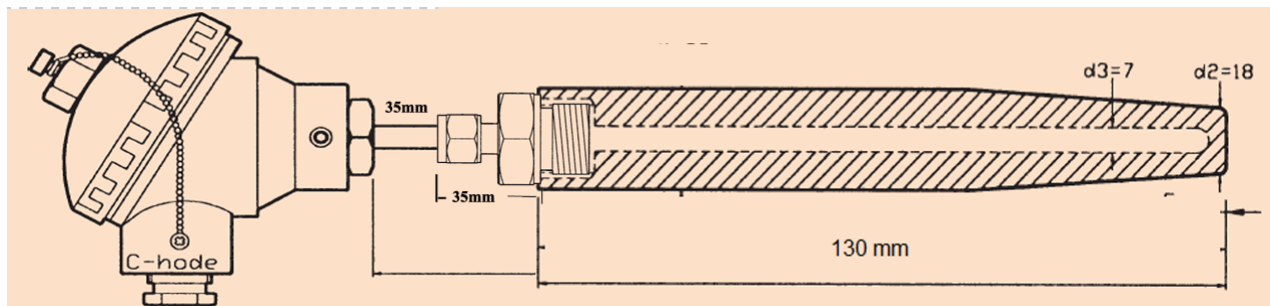
Klasse	Wire sensor		Film sensor		Tolleranse
AA	-50	+250	0	+150	+/- (0,1 + 0,0017 Itl )
A	-100	+450	-30	+300	+/- (0,15 + 0,002 Itl )
B	-196	+600	50	+500	+/- (0,3 + 0,005Itl )
C	-196	+600	50	+600	+/- (0,6 + 0,01 Itl )

Figur 3.5: Tabell for toleranse/nøyaktighet [1].

Pt100 er av typen RTD (Resistance Temperature Detector). Sensorelementet består av grunnstoffet platina og er konstruert på en slik måte at det vil ha en elektrisk motstand på 100  $\Omega$  ved 0°C og 138,5  $\Omega$  ved 100 °C. Ved hjelp av en tilhørende transmitter vil man da kunne konvertere denne variable motstanden til, i vårt tilfelle, et strømsignal på 4-20 mA.

### 3.4.1 Temperatursensor for industriell tanktype

Til den moderne tanktypen fikk vi levert innsatssensorer, som skissert i figur 3.6. Tanken er utstyrt med en innvendig gjenget følerlomme som man trer sensoren inn i, og selve følerelementet sitter helt på tuppen i sensoren. Sensoren ble dessuten levert med en tube varmepasta. Ved å fylle lommen med pasta før man trer inn sensoren vil man da kunne skape direkte termodynamisk kontakt mellom stålet i lomma og sensoren, og de er da å betrakte som **ett** legeme. Skravert område i figur 3.6 vil da tilsvare varmepasta. På dette viset vil man kunne forutsette en tilnærmet førsteordens overføringsfunksjon mellom vørteren og sensoren.



Figur 3.6: Innsatssensor med C-hode for montering av transmitter. Bildet ble tilsendt på epost fra Autek AS sin salgsrepresentant.

### 3.4.2 Temperatursensor for modifisert melketank

Siden melketankene ikke har lommer for montasje av innsatssensor benyttet vi i stedet for en overflatesensor til disse tankene. Det sparte oss ikke bare for en krevende sveisejobb med å lage sensorlomme, men er også en foretrukket løsning ettersom man ønsker minst mulig blindsoner hvor bakterievekst kan oppstå inni tankene. Jo

slettere overflate man har på innsiden av tankene jo mer effektiv blir rengjøringa.

Figur 3.7 vises montasjepunkt for sensor. Hvor vi da er i stand til å skyve sensoren opp under isolasjonen i melketanken, slik at sensoren ligger jevnt og i direkte kontakt med det innerste stål laget i tanken.



Figur 3.7: Fotografi av overflatesensor og melketank. Rød pil viser montasjested for sensoren. Fotograf: Vegard Jaatun.

### 3.4.3 Transmittere

Transmitterene er avbildet i figur 3.8. Utenom form og utseende er de begge ekvivalente i spesifikasjon og egenskap. Den hodemonterte transmitteren plasseres inni C-hodet, jamfør figur 3.6, og den skinnemonterte plasseres i en koblingsboks nært ved overflatesensoren.



Figur 3.8: Venstre: hodemontert transmitter [2]. Høyre: skinnemontert transmitter [3].

Transmitterene er konstruert slik at man selv skal sette opp måleområdet ved hjelp av NFC-teknologi og en smarttelefon. Vi har da satt opp valgt måleområde på  $-10$  til  $90$  °C som omformes til et mA-signal mellom 4-20 mA. Da vil  $-10$ °C tilsvare 4 mA og  $90$ °C tilsvare 20 mA. Man ønsker å kunne måle helt opp til  $90$ °C på grunn av vaskesyklusen (CIP) som kjøres mellom hvert brygg. Den nedre målegrensa er valgt med hensyn til kjølevæska, som i snitt vil holde  $-5$ °C.

Koblingsskjema for transmitterene kan ses i figur D.1 og D.2 i vedlegg D.

## 3.5 Reguleringsventiler

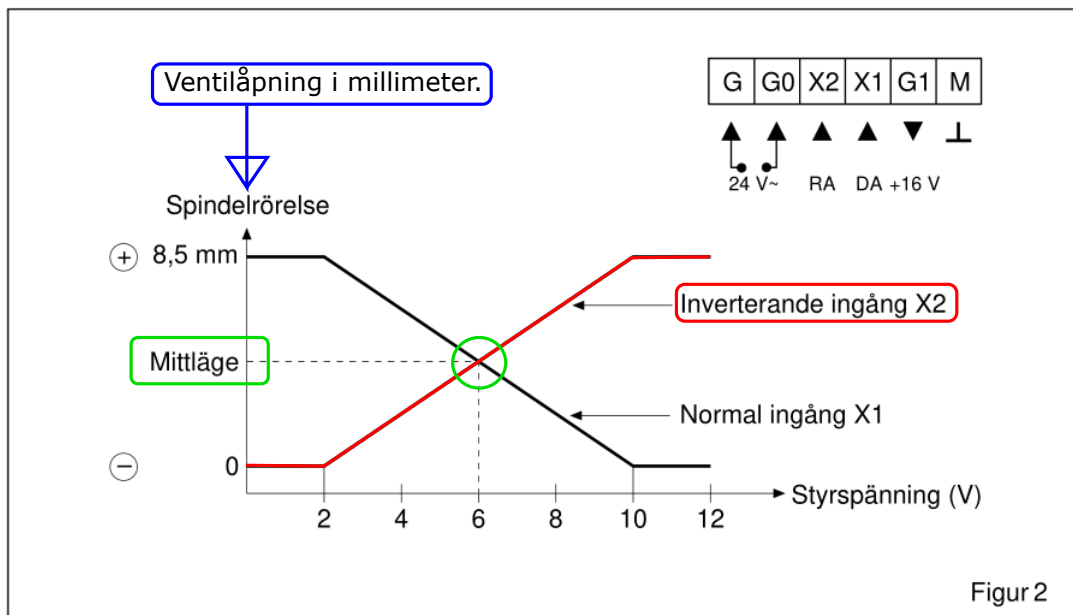
Bryggeriet hadde fra før tilgjengelig et parti med eldre ventiler av typen V354 [7] og aktuatorer av typen EM52L [6]. Begge er produsert av bedriften Tac og er avbildet i figur 3.9.

Ventilen er en toveisventil, men vi benytter den som en énveisventil ved å plugge igjen det andre utløpet. Ventilkarakteristikken er logaritmisk, og denne estimerer vi ved hjelp av eksperimentering i kapittel 4.3. Stenging skjer ved at aktuatoren dytter på staget oppå ventilen.



Figur 3.9: Venstre: aktuator [6]. Høyre: Ventilen med skisseringer for strøm av kjølevæske og stag for å åpne/lukke ventilen, fotografert av Vegard Jaatun.

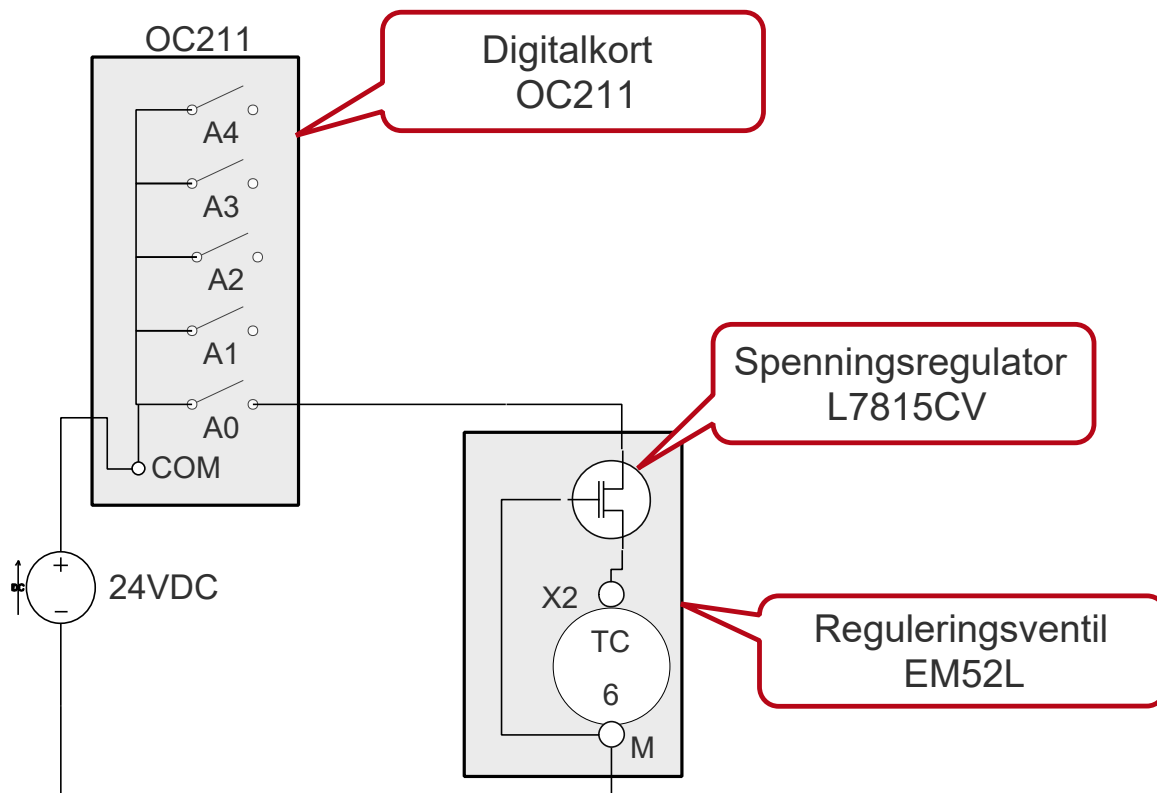
Figur 3.10 viser hvordan den stasjonære sammenhengen mellom påtrykt spenning på aktuatoren og ventilåpning i millimeter. Den bruker et styresignal på 2-10 V, og ventilen er da helt stengt for spenninger opp til 2 V og helt åpen for spenninger høyere enn 10 V. Dersom styrespenningen forsvinner eller brytes, vil aktuatoren automatisk legge 6 V over styreinngangene og innta midstilling. For analogkortene sin del er konsekvensen av dette at de **alltid** må holde på utgangsverdiene.



Figur 3.10: Grafen viser ventilåpning i millimeter som funksjon av styrestrømsignalet [6]. Vi har benyttet oss av den inverterende inngangen, X2, markert i rødt. Midtstilling på 6 V er markert i grønt.

Midtstillingsfunksjonen gjør i tillegg at reguleringsventilene, slik de kommer fra fab-

rikken, ikke kan styres av digitale reléutganger. For å kunne bruke digitalkortet har vi derfor satt inn en spenningsregulator av typen L7815CV [13] som skissert i figur 3.11. Denne vil i høy tilstand gi ut 15 V, og dermed åpne ventilen. I lav tilstand vil den gi ut 0 V, og dermed stenge ventilen. Ventilene som styres av digitalkortet kan altså kun styres ved av/på-regulering. Jamfør figur D.4 i vedlegg D for fullstendig koblingsskjema av ventilene mot digitalkortet.

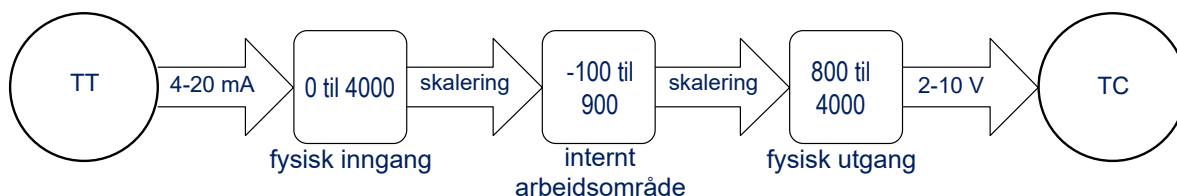


Figur 3.11: Spenningsregulator koblet inn foran reguleringsventilene.

### 3.6 Skalering av analoge signaler

Temperaturtransmitteren (TT) sender et strømsignal på 4-20 mA til PLSen, som omformer dette til en analogverdi i verdiområdet 0 til 4000. For å forenkle programmeringsjobben i PLSen konverteres disse til verdier som tilsvarer måleområdet. Skaleringskartet i figur 3.12 viser de nødvendige skaleringene hele veien fra inngang til utgang. Sammenhengen mellom inngangsverdi, intern arbeidsverdi og utgangsverdi er som følger:

- inngangsverdi, 0 til 4000. Tilsvarer 4 til 20 mA.
- intern arbeidsverdi, -100 til 900. Tilsvarer -10.0°C til 90.0°C. Ganget opp med ti for å få med første desimal.
- utgangsverdi, fra 800 til 4000. Tilsvarer 2 til 10 V.



Figur 3.12: Skaleringskartet viser en analog inngangsverdi sin vei fra sensor til reguleringsventil.

Inngangens analogverdier er ved hjelp av funksjonsblokker skalert til en lesbar verdi i et temperatursjikt fra -10.0°C til 90.0°C ved hjelp av forholdsligningen 3.1.

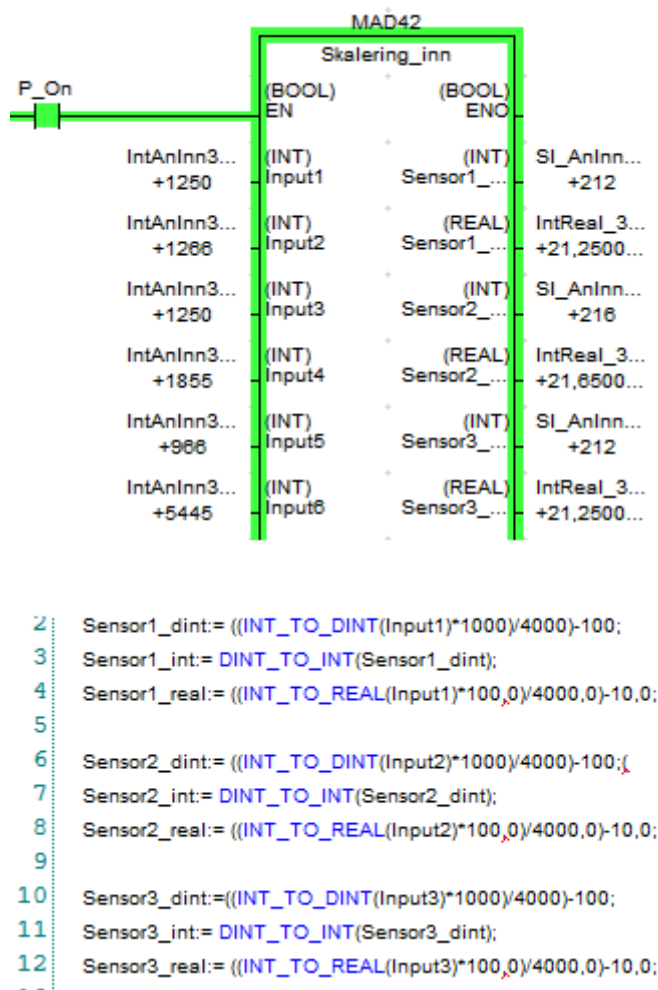
$$\frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} = \frac{A - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}} \quad (3.1)$$

Der leddene  $T_{\max}$ - $T_{\min}$  og  $A_{\max}$ - $A_{\min}$  er skrives om til henholdsvis  $T_{\text{Range}}$  og  $\text{AnalogRange}$ .

$$T = \frac{\text{Analog}_{\text{input}} * T_{\text{Range}}}{\text{Analog}_{\text{Range}}} - T_{\min} \quad (3.2)$$

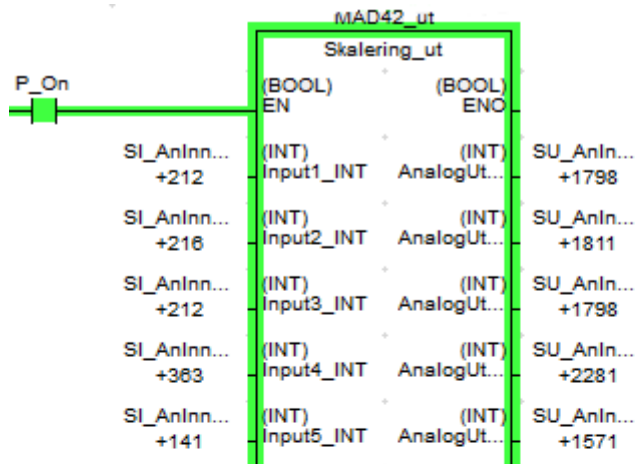
Konverteringen fra analoge verdier til verdier i måleområdet gjøres ved hjelp av funksjonsblokken *Skalering\_inn* i figur 3.13. For grafisk fremstilling av temperaturen er en utgangsvariabel med datatypen REAL mest hensiktsmessig. Det er også en utgangsvariabel med datatype INT, som gir en eksakt fremvisning av temperaturen

på formatet XXY, der XX angir heltallet og Y angir desimalet. Presisjonen i dette systemet er vurdert som tilstrekkelig nok fremstilt på formatet XXY.



Figur 3.13: Utdrag av funksjonsblokken og dens kode.

Funksjonsblokken for analog utgangsskalering er vist i figur 3.14. Regulatoren *benytter* et styresignal på 2-10 V. Analogkortet MAD42 gir et spenningssignal fra 0-10 V, som tilsvarer en analogverdi fra 0 til 4000. Funksjonsblokken *Skalering\_UT* i figur 3.14 skalerer den interne arbeidsverdien til en analogverdi i verdiområdet 800 - 4000 for å løse problematikken med at laveste spenningssignal skal være 2 V, i stedet for 0 V (som analogverdien 0 tilsvarer). Sammenhengen mellom inngang, intern arbeidsverdi og utgangsverdi eksemplifiseres i tabell 3.1.



```

8   Input1_DINT := INT_TO_DINT(Input1_INT);
9   AnalogUt_DINT_T1 := (((Input1_DINT-(-100))*3200)/1000) + 800;
10  AnalogUt_T1 := DINT_TO_INT(AnalogUt_DINT_T1);
11
12  Input2_DINT := INT_TO_DINT(Input2_INT);
13  AnalogUt_DINT_T2 := (((Input2_DINT-(-100))*3200)/1000) + 800;
14  AnalogUt_T2 := DINT_TO_INT(AnalogUt_DINT_T2);
15
16  Input3_DINT := INT_TO_DINT(Input3_INT);
17  AnalogUt_DINT_T3 := (((Input3_DINT-(-100))*3200)/1000) + 800;
18  AnalogUt_T3 := DINT_TO_INT(AnalogUt_DINT_T3);
19

```

Figur 3.14: Utdrag av funksjonsblokken og dens kode.

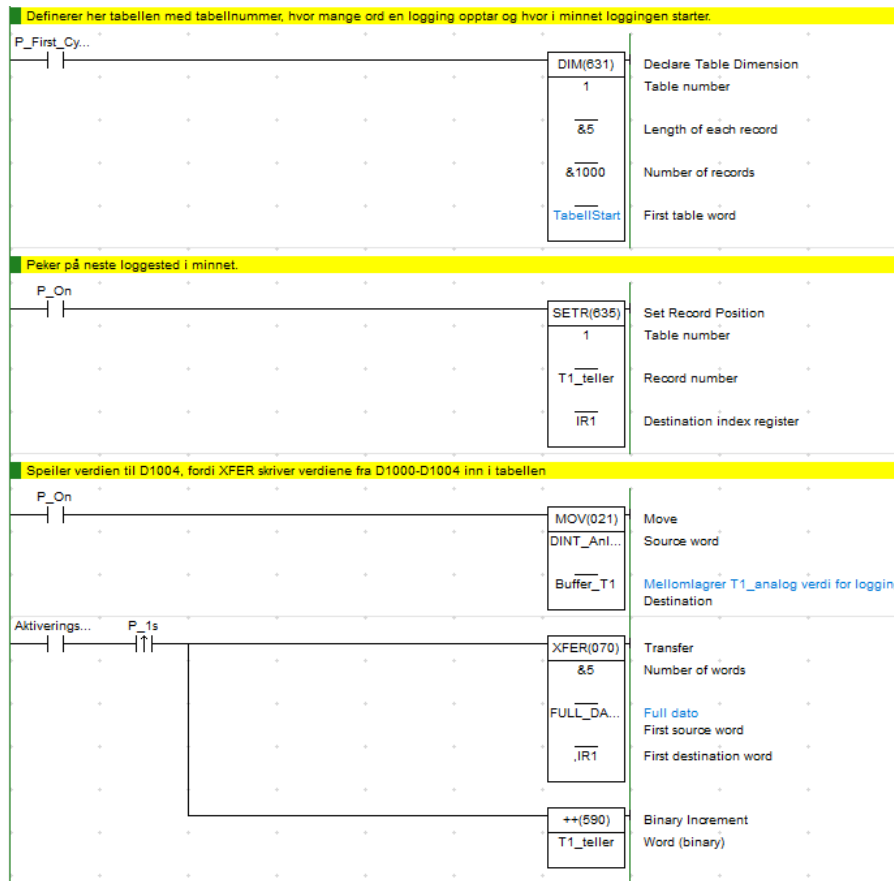
inngangsverdi <i>mA</i>	intern arbeidverdi $^{\circ}C$	utgangsverdi <i>V</i>
0	-100	800
100	-75	880
500	25	1200
1000	150	1600
2000	400	2400
2500	525	2800
4000	900	4000

Tabell 3.1: Tabellen viser skaleringen mellom enheter fra inngangsverdi, via intern arbeidsverdi til utgangsverdi.



### 3.7 Datalogging

Det har vært behov for å eksportere temperatur- og pådragsdata i eksperimenteringsfasen av denne oppgaven. PLSen har en minnekort-funksjon, men den baserer seg på eldre *Compact Flash*-minnekort, som er strevsomt å oppdrive i dag. Dette problemet er dermed løst ved å opprette en tabell internt i PLSens D-minne og flytte sensorverdiene til denne tabellen. Ved å opprette en tabell, som gjøres øverst i figur 3.15, reserveres det et gitt antall ord i minnet til denne tabellen.



Figur 3.15: Koden som flytter sensorverdier til D-minnet.

Den røde uthevingen i figur 3.16 fremstiller ett loggeintervall, der de fire første ordene angir dato og tid. Det siste ordet, i dette tilfellet **00D0** er sensorverdien for temperatur fremstilt på heksadesimalform. Dette tilsvarer heltallsverdien 208, som igjen tilsvarer 20.8°C.

	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9
D01100	2021	0902	1917	0011	00D0	2021	0902	1918	0011	00D0
D01110	2021	0902	1919	0011	00D0	2021	0902	1920	0011	00CF
D01120	2021	0902	1921	0011	00CF	2021	0902	1922	0011	00D0
D01130	2021	0902	1923	0011	00D0	2021	0902	1924	0011	00CF
D01140	2021	0902	1925	0011	00D0	2021	0902	1926	0011	00D0
D01150	2021	0902	1927	0011	00D0	2021	0902	1928	0011	00CF
D01160	2021	0902	1929	0011	00D0	2021	0902	1930	0011	00D0
D01170	2021	0902	1931	0011	00D0	2021	0902	1932	0011	00D0
D01180	2021	0902	1933	0011	00D0	2021	0902	1934	0011	00CF
D01190	2021	0902	1935	0011	00D0	2021	0902	1936	0011	00D0
D01200	2021	0902	1937	0011	00CF	2021	0902	1938	0011	00CF
D01210	2021	0902	1939	0011	00CF	2021	0902	1940	0011	00D0
D01220	2021	0902	1941	0011	00D0	2021	0902	1942	0011	00D0

J: On/Off, T: ChangeOrder  
Ctrl+J: ForceOn, Ctrl+K: ForceOff, Ctrl+L: ForceCancel

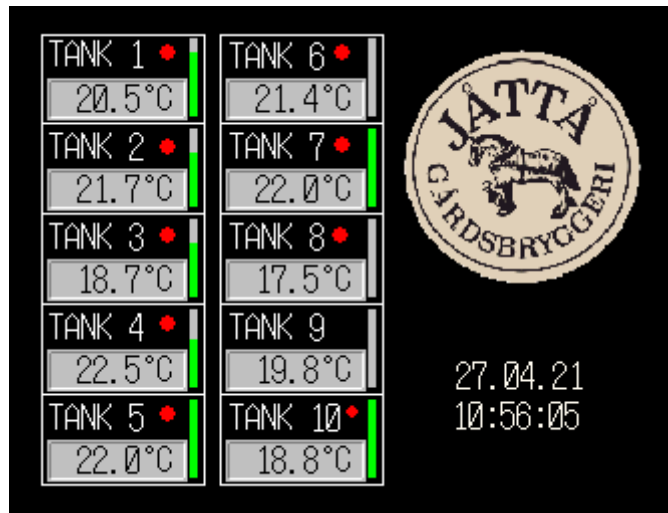
Figur 3.16: Den røde uthevingen tilsvarener en logging.

CX-Programmer har ingen mulighet for direkte eksportering av PLSens minneområde til et fornuftig filformat (for eksempel .csv<sup>1</sup>), men det er en funksjon for å skrive ut tabellen i figur 3.16 til PDF-format. Denne er videre konvertert til Excel-filformat og lastet inn i Matlab. I Matlab gjøres de heksadesimale verdiene om til heltallsverdier for videre analyse.

<sup>1</sup>comma-separated values - filformat som lagrer tabelldata i ren tekstform

### 3.8 Brukergrensesnitt

Hovedfokuset under skjermutviklingen har vært å få frem den viktigste informasjonen i systemet på ett skjermbilde. Skjermen består av 300 trykkpunkter - noe som er relativt lite for å oppnå god presisjon på et tastetrykk. Det har derfor vært fokus på å skape færrest mulig trykk. Skjermens hovedbilde, som vist i figur 3.17 inneholder informasjon om temperatur, rød bitlampe for tankens startknapp og pådragsindikator for tilhørende reguleringsventil (grønn søyle). For å få frem detaljert informasjon for hver tank, navigerer en seg videre ved å trykke på «TANK X».



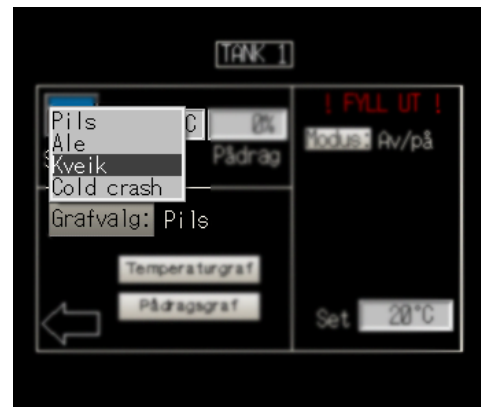
Figur 3.17: Skjermens hovedbilde, med temperatur- og pådragsinformasjon.

Figur 3.18a viser den detaljerte oversikten over hver tank. Hver tank har både en temperaturgraf og en pådragsgraf. Nedtrekksmenyen **grafvalg** i figur 3.18b gir mulighet til å velge riktig dimensjonen på y-aksen i temperaturgrafene i forhold til hvilket type øl som skal gjennomgå gjæringsprosessen. Til høyre i figur 3.18c vil det være nødvendig å fylle ut feltene øltype, modus og set-temperatur før gjæringsprosessen kan startes.

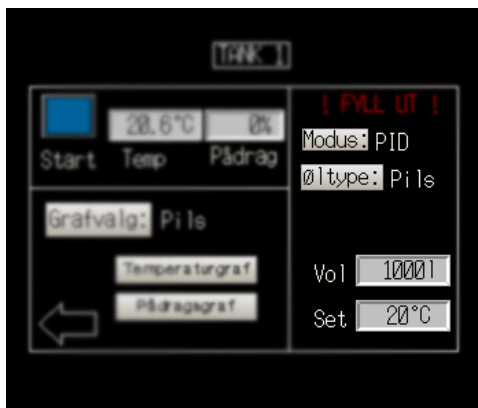
Figur 3.18c og 3.18d gir en muligheten til å velge reguleringstype. PID-regulator for sømløs regulering tilpasset forskjellige øltyper, av/på-regulator for tanker uten analogt ut-signal og manuelt pådrag for spesielle tilfeller ved testing eller tankvasking.



(a) Skjerm bilde av en spesifikk tank.



(b) Grafvalg gjør det mulig å endre akseverdiene til temperaturgraf.



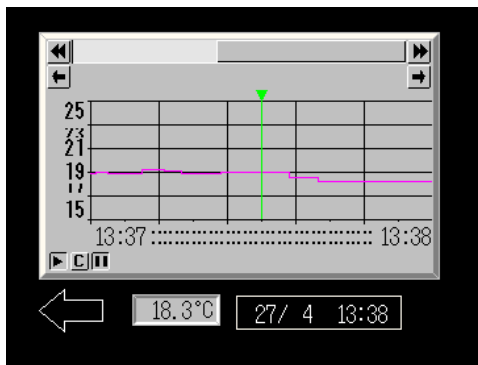
(c) Modusvalg.



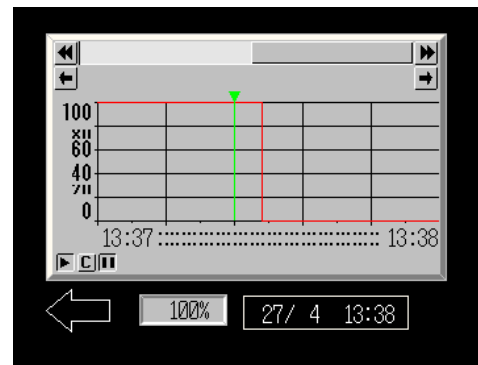
(d) Ved manuell modus kan en sette pådraget selv, «MP».

Figur 3.18: Hovedskjermen til en spesifikk tank og dens valgmuligheter. For å fremheve funksjonaliteten som vises i hver delfigur er det lagt på et *blur*-filter.

I figur 3.19 ser en temperatur- og pådragsgrafene for hver tank. Grafene gir et raskt overblikk av siste døgns temperatur- og pådragsaktivitet. Grafene lagrer 14 dager med informasjon. Den grønne pekeren i figur 3.19a og 3.19b kan flyttes ved tastetrykk, og aktuell temperatur- og pådragsinformasjon vil fremvises i bunnen av skjerm bildene, med dato og klokkeslett.



(a) Temperaturgraf.

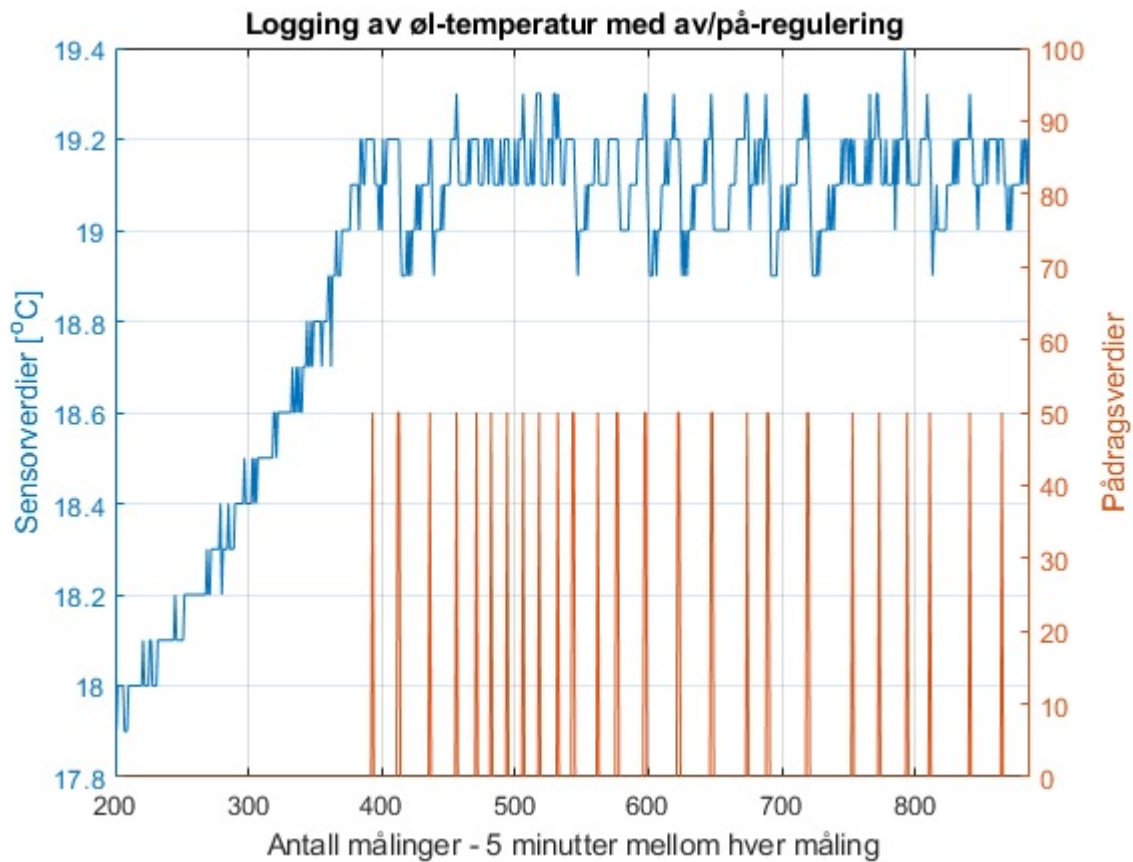


(b) Pådragsgraf.

Figur 3.19: Den grønne pekeren i hver graf gir en mulighet til å lese av presise temperatur- og pådragsverdier inntil 14 dager tilbake i tid. Verdiene presenteres nederst i skjermbildene.

### 3.9 Av/på-regulator

Ettersom det har vært utført diverse eksperimenter på ventiler og aktuatorer, samt logging av data fra gjæringsforløp og *cold crash* før reguleringsparametrene har vært klare, så har det vært nødvendig å implementere en av/på-regulator. Figur 3.20 viser temperaturutviklingen under gjæringsprosessen ved bruk av av/på-regulering. Det aktuelle utsnittet viser stormgjæringen, som starter ved ca. tidsskritt 200. Energiutviklingen øker øl-temperaturen med ca.  $1,5^{\circ}\text{C}$  over en 15 timers periode, før regulatoren aktiveres når settpunkt på  $19^{\circ}\text{C}$  er nådd. Denne form for regulering gir en del svingninger. I ølbryggingen og gjæringsforløpets øyemed vil ikke disse svingningene være kritiske.



Figur 3.20: Temperaturgraf ved av/på-regulering. Grafen strekker seg over ca. to døgn.

Av/på-regulatorens programkode er IF-kommandoer som setter et bestemt pådrag basert på øl-temperaturens avvik fra settpunktet.

## Kapittel 4

# Modellutvikling

### 4.1 Innledning

I dette kapitlet beskriver vi hvordan vi har gått fram for å lage en matematisk modell av gjæringsprosessen som verifiseres mot måledata. For å finne regulatorparametre har vi funnet overføringsfunksjonen  $H_o l(s)$  fra ventilpådrag til ølets temperatur.

Vi har kun modellert den moderne tanktypen ettersom utregningene enkelt kan repeteres og tilpasses for den hjemmelagde tanktypen, uten at man behøver å gjenta det i denne rapporten.

Kapitlet veksler mellom teoretiske utledninger, simuleringer og praktiske eksperiment gjennomført i bryggeriet. Noen eksperiment har som formål å avdekke parametre til ligningene mens andre har som formål å verifisere at teoriene stemmer i praksis.

Først ut i kapitlet kommer teoretisk ventilmodellering etterfulgt av eksperimenter som leder til en installert ventilkarakteristikk. Deretter beskrives varmestrømmer mellom ølet og kjølekappene i tanken, som brukes videre til å utvikle en ulineær modell av gjæringsprosessen. Etter at modellen har blitt verifisert utledes nevnte overføringsfunksjon. Til slutt verifiseres overføringsfunksjonen ved sammenligning mot den ulineære modellen.

## 4.2 Ventilmodell

For å modellere strømmen av kjølevæske gjennom ventilene, som ble beskrevet i kapittel 3.5, benyttet vi ventilligningen vist i ligning 4.1 (Olsen, 1992, s. 277 [14]).

$$K_v = \frac{q(t)}{\sqrt{\frac{\Delta p_v}{G}}} \left[ \frac{m^3}{h} \right] \quad (4.1)$$

Hvor:

- $q$  er væskeflyt ( $\frac{m^3}{h}$ )
- $p_v$  er trykkfall over ventilen (bar)
- $K_v = 2,5 \frac{m^3}{h}$ ; kapasitetsindeks for ventil
- $G$  er tetthetskorreksjon

Ved å inkludere funksjon for pådraget til aktuatoren, samt omregning fra  $\frac{m^3}{h}$  til  $\frac{m^3}{s}$ , kan ligningen skrives om til følgende:

$$q(t) = f(z(t)) K_v \sqrt{\frac{\Delta p_v}{G}} \frac{1}{3600} \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (4.2)$$

Hvor:

- $f(z(t))$  [-] er ventilkararakteristikken.
- $z(t)$  [-] er ventilåpningen

Vi antar at dynamikken til ventilaktuatoren er neglisjerbar sammenliknet med prosessen, slik at ventilpådraget,  $u(t)$ , dermed er lik ventilåpningen:  $u(t) = z(t)$ .

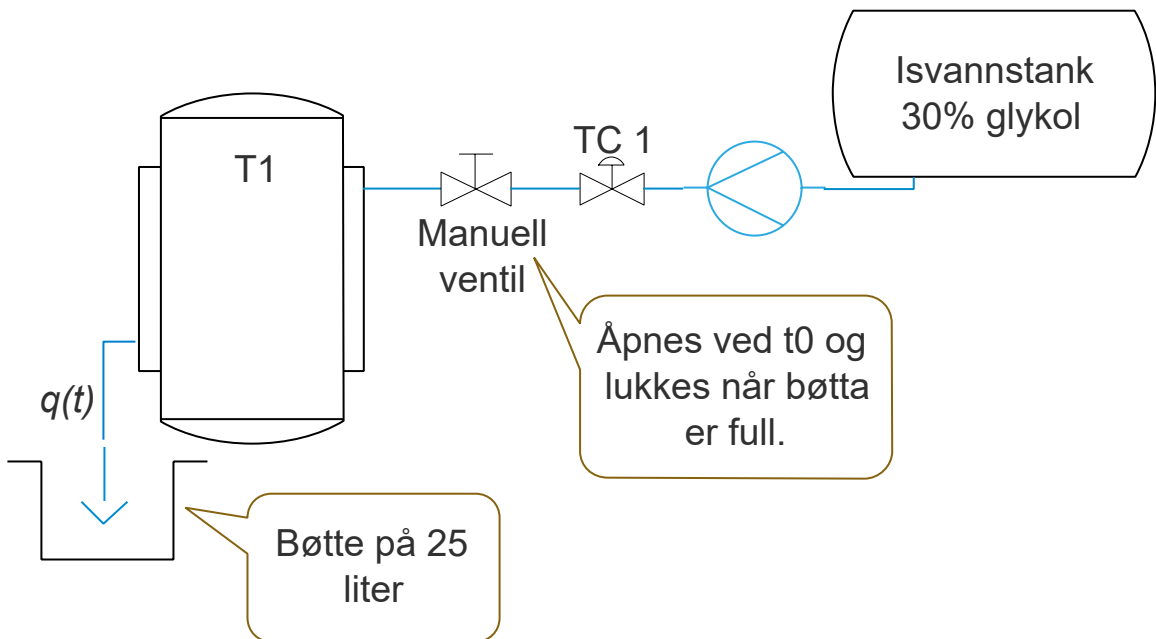
Faktoren  $\sqrt{\frac{\Delta p_v}{G}}$  og ventilkararakteristikken  $f(u(t))$  estimeres eksperimentelt i kapittel 4.3.



## 4.3 Eksperiment 1: Installert ventilkarakteristikk

### 4.3.1 Eksperimentelt

I dette eksperimentet estimerte vi hvor mye kjølevæske som strømmer gjennom tankens kjølekapper ved forskjellige pådragsverdier. I henhold til figur 4.1 målte vi tida det tok å fylle opp en 25 liters bøtte. Basert på resultatene regnet vi ut volumstrømmen og massestrømmen. Til slutt utledet vi en installert karakteristikk for ventilen og et estimat for faktoren  $\sqrt{\frac{\Delta p_v}{G}}$  fra ligning 4.2.



Figur 4.1: Skisse over oppsett for eksperiment.

For å gjøre om volumstrøm til massestrøm ble framgangsmetoden beskrevet nedenfor brukt:

Fra kjølevæskas datablad fant vi følgende tabell [17]:

Temperatur °C	Specifikk varme kJ / (kg) (K)	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Värmekonduktivitet W/mK	Viskositet mPa.s
<b>Mättnadsegenskaper för DOWCAL™ 200 vid 30% volymkoncentration</b>				
0	3.762	1.041	0.417	7.812
25	3.829	1.026	0.446	2.780
50	3.897	1.011	0.467	1.327
100	4.032	0.981	0.489	0.512
130	4.114	0.962	0.491	0.355
160	4.195	0.944	0.487	0.271

Figur 4.2: Egenskaper til kjølevæska ved 30% konsentrasjon. Fra kjølevæskas datablad [17].

Her kan vi se at ved 30% dosering har kjølevæska en **tetthet på**  $\rho_{kv} = 1041 \frac{kg}{m^3}$ . Massestrømmen av kjølevæske gjennom tankens kjølekapper er da gitt ved:

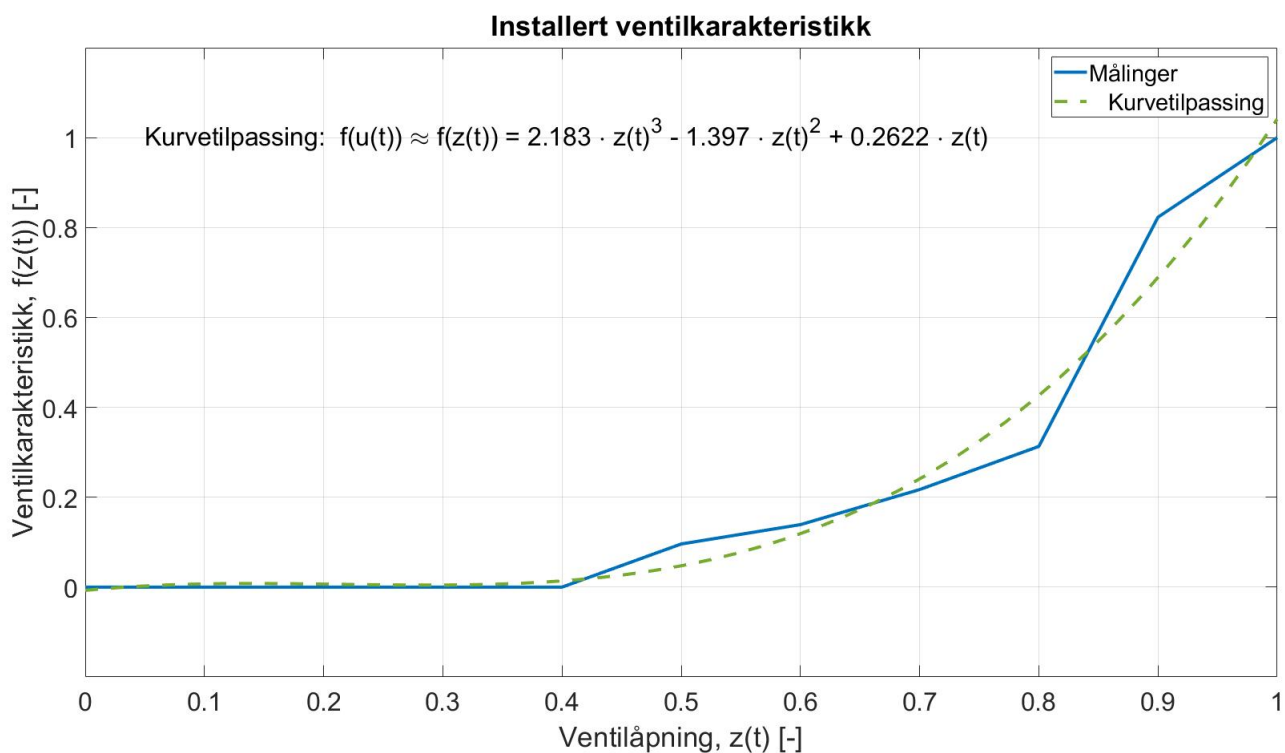
$$\omega(t) = \rho_{kv} \cdot \frac{1}{1000} \cdot q_L(t) \quad (4.3)$$

$$\left[ \frac{kg}{s} \right] = \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \left[ \frac{m^3}{L} \right] \left[ \frac{L}{s} \right]$$

Hvor  $q_L(t)$  er væskestrøm i liter per sekund og  $\omega(t)$  er massestrøm i kilogram per sekund. Liter gjøres om til kubikk ved å dividere med 1000.

### 4.3.2 Resultat

Figur 4.3 og påfølgende tabell oppsummerer resultatene av eksperimentet.



Figur 4.3: Grafen viser installert ventilkarakteristikk, altså normalisert volumstrøm som funksjon av ventilåpning. Stiplet linje representerer Matlab sin kurvetilpassning.

Pådrag $u(t)$ [-]	Ventilåpning $z(t)$ [-]	Målt volum $V$ [L]	Tid[s] $t$ [s]	Væskestrøm $q_L(t)$ [ $\frac{L}{s}$ ]	Massestrøm $\omega(t)$ [ $\frac{kg}{s}$ ]	Ventilkarakteristikk $f(u(t)) \approx f(z(t))$ [-]
0	0	0	0	0	0	0
0,5	0,5	5	103	0,049	0,051	0,096
0,6	0,6	5	70	0,071	0,074	0,139
0,7	0,7	5	46	0,11	0,115	0,217
0,8	0,8	5	31	0,16	0,167	0,315
0,9	0,9	5	12,5	0,42	0,437	0,823
1	1	25	49	0,51	0,531	1

Tabell 4.1: Resultat av målingene oppsummert på tabellform.

Ligning 4.2 kan nå også skrives om til å inkludere kurvetilpassingen for  $f(u(t))$  fra figur 4.3:

$$\begin{aligned}
q(t) &= f(u(t)) K_v \sqrt{\frac{\Delta p_v}{G}} \frac{1}{3600} \\
&= \left( 2, 2(u(t))^3 - 1, 4(u(t))^2 + 0, 26u(t) \right) K_v \sqrt{\frac{\Delta p_v}{G}} \frac{1}{3600} \left[ \frac{m^3}{s} \right]
\end{aligned} \tag{4.4}$$

Her er da  $K_v = 2,5$ , som både er gravert inn på selve ventilen og kan bekreftes fra ventilens datablad[7].

Resultatene gjør at vi nå kan estimere en verdi for faktoren  $\sqrt{\frac{\Delta p_v}{G}}$  fra ventilligningen 4.2. Vi valgte å benytte den verdien som oppstår ved helt åpen ventil, ved  $u(t) = 1$ , da dette er det eneste punktet i ventilkarakteristikken hvor vi helt sikkert vet hvilken posisjon ventilen faktisk står i. Hvis vi løser ventilligningen, 4.4, for  $\sqrt{\frac{\Delta p_v}{G}}$  finner vi følgende:

$$\sqrt{\frac{\Delta p_v}{G}} = \underline{0,6928} \tag{4.5}$$

### 4.3.3 Diskusjon og konklusjon

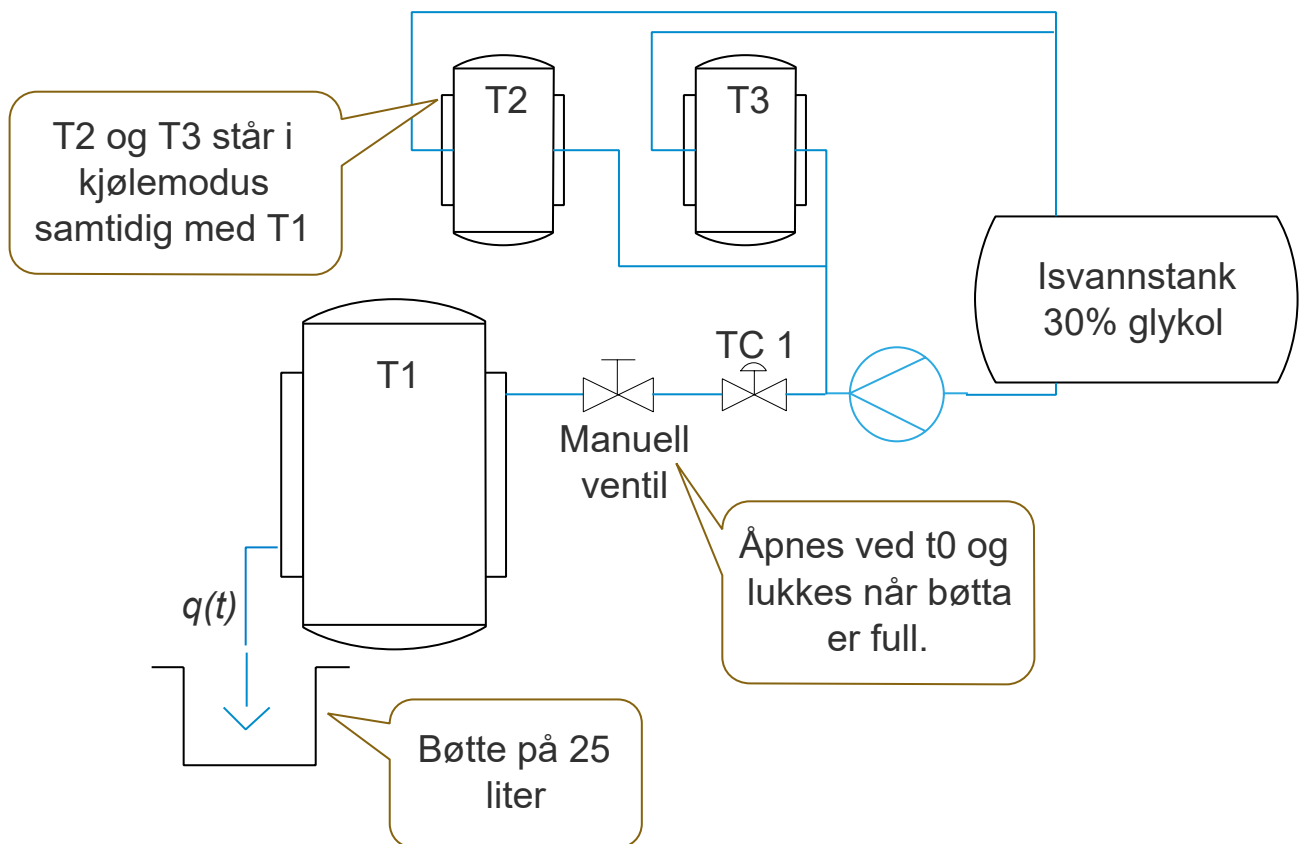
Pådragsverdier lavere enn 0,5 ga så lite væskeflyt at de knapt var målbare. Estimaterne vi har kommet fram til må anses som grove. Svakheter i dette oppsettet er blant annet at vi har ingen informasjon om pumpa og hva slags pumpekarakteristikk den har. Pumpa som står i bryggeriet er godt brukt, og alle merkelapper er slitt bort. I tillegg må vi ta hensyn til at pumpetrykk kan ha endret seg noe da vi koblet vekk slangen fra tankene og førte den ned i bøtta. Her fikk vi da en åpen kjølesløyfe, men normalt vil kjølesløyfa være lukket. I tillegg kan vi ha lagt til en heverteffekt på væskestrømmen her.

Vi antar likevel at pumpa leverer et trykk som er høyt og stabilt, dette fikk vi også bekreftet ytterligere i resultatene av eksperimentet i kapittel 4.4. Vi vil derfor gå ut i fra at feilkildene fra heverteffekt og åpen sløyfe er tilnærmet neglisjerbare sammenlignet med pumpetrykket.

## 4.4 Eksperiment 2: Væskeflyt når flere tanker kjører samtidig.

### 4.4.1 Eksperimentelt

Hensikten med dette eksperimentet var å finne ut hvor mye strømmen av kjølevæske blir påvirket av at flere tanker står i kjølemodus samtidig. I henhold til figur 4.4 målte vi tida det tok å fylle opp en bøtte med 25 liter kjølevæske. Deretter gjentok vi eksperimentet for en mer realistisk situasjon, hvor også to andre tanker var aktive.



Figur 4.4: Skisse over oppsett for eksperiment.

#### 4.4.2 Resultat

Tank 1 u(t) [-]	Tank 2 u(t) [-]	Tank 3 u(t) [-]	Målt volum V [L]	Tid[s] t [s]	Målt volum q(t) [ $\frac{L}{s}$ ]
1	0	0	25	49,0	0,51
1	1	1	25	50,6	0,494

Tabell 4.2: Resultat på tabellform.

Forsøket viste en differanse i mengde gjennomstrømmet kjølevæske. Tank 1 alene hadde en væskestrøm på  $0,51 \frac{L}{s}$  og tank 1 sammen med to andre tanker hadde en strøm på  $0,494 \frac{L}{s}$ . Dette utgjør en differanse på:

$$\frac{0,51 \frac{L}{s}}{0,494 \frac{L}{s}} * 100\% - 100\% \approx \underline{\underline{3,2\%}} \quad (4.6)$$

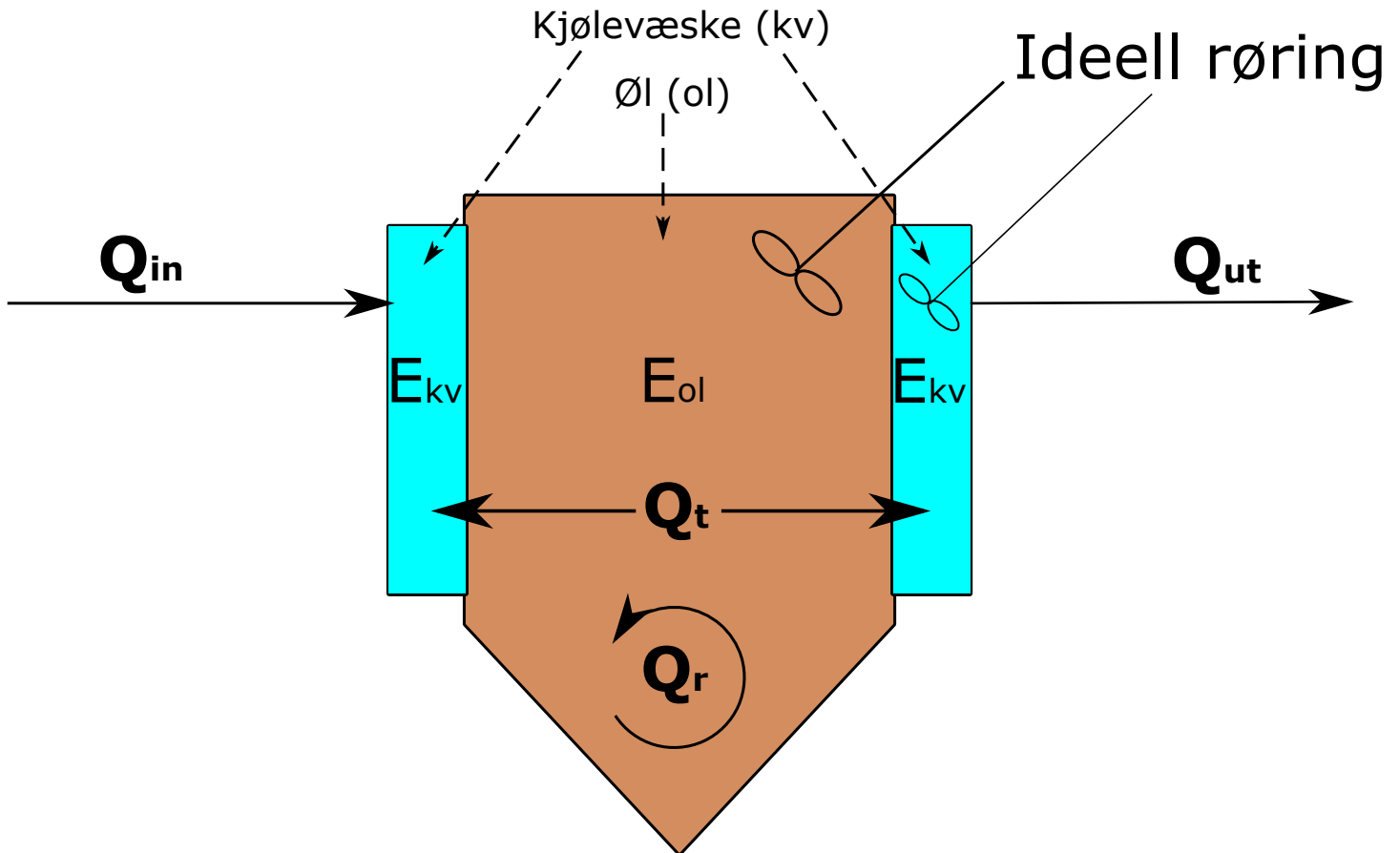
#### 4.4.3 Diskusjon og konklusjon

Siden det er snakk om volum på 1000 L vørter og at responstiden er såpass treig, som vi vil se seinere i kapittel 4.8.2, valgte vi å se på denne forskjellen som liten og neglisjerbar. I følge bryggeriet er den mest typiske situasjonen at det vil være opptil tre tanker som står i kjølemodus samtidig. Til tross for dette har vi til videre arbeid og beregninger brukt den høyeste målte verdien for strømming av væske, fra eksperimentet i 4.3, da denne verdien vil gi den høyeste kjøleeffekten som kan oppstå i verste fall.

At differansen i væskeflyt er såpass liten bekrefter videre mistanken vi fikk fra forrige eksperiment, nemlig at pumpa sannsynligvis er noe overdimensjonert og holder høyt pumpetrykk tilnærmet uavhengig av belastningen på systemet.

## 4.5 Varmestrømmer og energier

For å finne en dynamisk modell for temperaturen i ølet under gjæringa har vi tatt utgangspunkt i figur 4.5. Den viser varmemestømmene og energiene som er tatt med i modellen. Vi har antatt at påvirkning fra omgivelsestemperaturen er neglisjerbar ettersom tanken er godt isolert i tillegg til at ølet i flere tilfeller skal gjære på samme temperatur som er i omgivelsene. Vi har også antatt at man har ideell blanding med jevn temperatur både i øl og kjølevæske. Matematiske sammenhenger er hentet fra Finn Haugens *Dynamiske systemer* side 25 og 26 [11].



Figur 4.5: Varmestrømmer og energier for den termodynamiske modellen.

Variablene fra figuren er da:

- $Q_{in}(t), Q_{out}(t) [\frac{kJ}{s}]$ : energistrøm inn og ut av kjølekappene via kjølevæska.
- $Q_t(t) [\frac{kJ}{s}]$ : tap av energi, fra øl til kjølevæska.
- $Q_r(t) [\frac{kJ}{s}]$ : energi som genereres av gjærens metabolyse.
- $E_{kv}(t), E_{ol}(t) [J]$ : energi i henholdsvis kjølevæske og øl.

### 4.5.1 Varmestrømmene

$Q_{\text{inn}}(t)$  og  $Q_{\text{ut}}(t)$  er varmetransport, det vil si hvor mye energi som går inn/ut av systemet på grunn av forflytning av masse. Varmetransporten bestemmes derfor av kjølevæskas masseflyt, spesifikke varmekapasitet og temperatur; som vist i ligning 4.7 og 4.8.

$$Q_{\text{inn}}(t) = \omega(t)c_{p,\text{kv}}T_{\text{inn\_kv}}(t) \quad (4.7)$$

$$Q_{\text{ut}}(t) = \omega(t)c_{p,\text{kv}}T_{\text{kv}}(t) \quad (4.8)$$

Her er da:

- $\omega(t) \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$ : masseflyt av kjølevæske gjennom kjølekappene.
- $c_{p,\text{kv}} \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right]$ : Spesifikk varmekapasitet for kjølevæske.
- $T_{\text{inn\_kv}}(t), T_{\text{kv}}(t) [^{\circ}\text{C}]$ : temperatur for kjølevæska henholdsvis inn/ut av kjølekappene.

$Q_{\text{t}}(t)$  er varmeovergang i form av konveksjon fra ølet til kjølevæska, gjennom stålet i kjølekappene. Hvor mye energi som overføres vil være avhengig av differansen i temperatur på hver side av stålet, samt stålets varmeoverføringskoeffisient og areal. Denne sammenhengen vises i ligning 4.9.

$$Q_{\text{t}}(t) = hA(T_{\text{ol}(t)} - T_{\text{kv}}(t)) \quad (4.9)$$

Her er da:

- $hA \left[ \frac{\text{J}}{\text{s}\cdot\text{K}} \right]$ : produktet for varmeovergangstallet til stålet og arealet kjølinga foregår over. Denne estimeres eksperimentelt i kapittel 4.6.
- $T_{\text{ol}}(t), T_{\text{kv}}(t) [^{\circ}\text{C}]$ : temperatur for henholdsvis øl og kjølevæska som forlater kjølekappene.

$Q_{\text{r}}(t)$  er en varmestrøm som kommer fra gjærens metabolyse. For å estimere denne varmeproduksjonen bruker vi erfaringstall fra prosessingeniøren Fred Scheer, som har jobbet med industriell gjæring av øl i flere år [16]. Scheer sier at for hvert kilo fermenterbart sukker i ølet, vil gjæren produsere  $587 \cdot 10^3$  joule.

$$e_{\text{f}} = 587 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}_{\text{sukker}}} \quad (4.10)$$

I tillegg må vi vite hvor mange kilo fermenterbart sukker som er i ølet. Dette finner vi ved å ta differansen mellom ølets tetthet før fermentering (*OG: original gravity*) og etter gjæring (*FG: final gravity*). Denne måten å måle tetthet på er typisk for bryggeribransjen og enhetene for OG og FG vil være kilogram per liter, vi må derfor skalere dette opp med bryggets volum i liter, som vist i ligning 4.11.

$$m_{\text{s}}[\text{kg}] = (\text{OG} - \text{FG}) \cdot V_{\text{ol}} \quad (4.11)$$



Over hvor lang tid varmeproduksjonen foregår vil være bestemt av flere faktorer, eksempelvis mengden levende gjærceller, oksygen i ølet og sammensetning av forskjellige næringsstoffer i ølet. Disse verdiene er vanskelige å måle uten at man har et laboratorium og spisskompetanse innen mikrobiologi. Derfor bruker vi heller erfaringstall fra bryggeriet på Jåttå, nemlig at øl av typen *ale* vil gjæres i løpet av to dager. Det betyr at tiden for fermenteringa,  $t_f$ , er:

$$t_f[s] = \text{dager} \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \quad (4.12)$$

Oppsummert blir sammenhengen for gjærens metabolyse,  $Q_r(t)$ , som vist i ligning 4.13.

$$Q_r(t) = \frac{e_f \cdot m_s}{t_f} = \frac{e_f \cdot (OG - FG) \cdot V_{ol}}{t_f} \quad (4.13)$$

Dette blir da et tall som kan regnes ut, og dermed har vi at  $Q_r(t) = Q_r$ .

### 4.5.2 Energimengden i øl og kjølevæske

Som vist i figur 4.5 har vi energimengdene  $E_{kv}(t)$  og  $E_{ol}(t)$  for henholdsvis kjølevæska og ølet. I alle energiberegningene er referansetemperaturen  $T_0 = 0^\circ C$

**Energien i kjølevæska** som går ut av kjølekappene vil være gitt av ligning 4.14.

$$E_{kv}(t) = m_{kv} \cdot c_{p,kv} \cdot T_{kv}(t) \quad (4.14)$$

Her er da:

- $m_{kv}[kg]$  mengden kjølevæske det er plass til i kjølekappene.
- $c_{p,kv}[\frac{J}{kg \cdot K}]$  spesifikk varmekapasitet for kjølevæska.
- $T_{kv}(t)[^\circ C]$  kjølevæskas temperatur ut av kappene.

**Energien i ølet** vil være gitt av ligning 4.15.

$$E_{ol}(t) = m_{ol} \cdot c_{p,ol} \cdot T_{ol}(t) \quad (4.15)$$

Her er da:

- $m_{ol}[kg]$ , ølets masse i kilogram.
- $c_{p,ol} = 4100[\frac{J}{kg \cdot K}]$ , spesifikk varmekapasitet for ølet, estimat hentet fra Fred Scheer [16].
- $T_{ol}(t)^\circ C$ , ølets temperatur.

For å beregne massen til ølet må man kjenne til ølets massetetthet, og den vil igjen ikke være konstant under fermenteringa. Noe masse vil gå ut av ølet i form av  $CO_2$ -gass mens noe vil omdannes til alkohol. Vi vet uansett at ølets OG og FG vil være tettheten før og etter fermentering, som en tilnærming kan man da bruke snittet mellom disse to verdiene. Fra øltype til øltype vil variasjoner i tettheten kun utgjøre

forskjeller i hundredeler, man kan derfor med trygghet estimere en fast verdi for ølets tetthet til å benytte for alle øltyper.

Basert på erfaringer fra bryggeriet kan man anta at et øl har tettheten  $1,050 \frac{kg}{L}$  før fermentering og  $1,012 \frac{kg}{L}$  etter fermentering, man kan dermed estimere gjennomsnittlig tetthet,  $\rho_{ol}$ , til følgende:

$$\rho_{ol} = \frac{OG + FG}{2} = \frac{1,045 + 1,012}{2} \approx 1,029 \left[ \frac{kg}{L} \right] \quad (4.16)$$

Videre kan man da utrykke ølets masse som følgende:

$$m_{ol} = \rho_{ol} \cdot V_{ol} \quad (4.17)$$

## 4.6 Eksperiment 3: Estimere temperaturoverføringskoeffisienten

### 4.6.1 Eksperimentelt

I dette eksperimentet fant vi et estimat for produktet  $h \cdot A$ , jamfør ligning 4.9, som er en nødvendig parameter i den termodynamiske modellen. Konstanten  $h$  er da spesifikt varmeovergangstall for stålet mellom kjølevæska og ølet i tanken, mens  $A$  er arealet varmeoverføringa skjer over. I kapittel 4.5 introduseres sammenhengene vist i ligningene 4.18-4.20 under.

$$Q_t(t) = hA(T_{ol}(t) - T_{kv}(t)) \quad (4.18)$$

$$Q_{in}(t) = \omega(t)c_{p,kv}T_{inn\_kv}(t) \quad (4.19)$$

$$Q_{ut}(t) = \omega(t)c_{p,kv}T_{kv}(t) \quad (4.20)$$

Videre kan vi dermed konstantere at energistrømmen som blir tilført kjølevæska fra ølet må være:

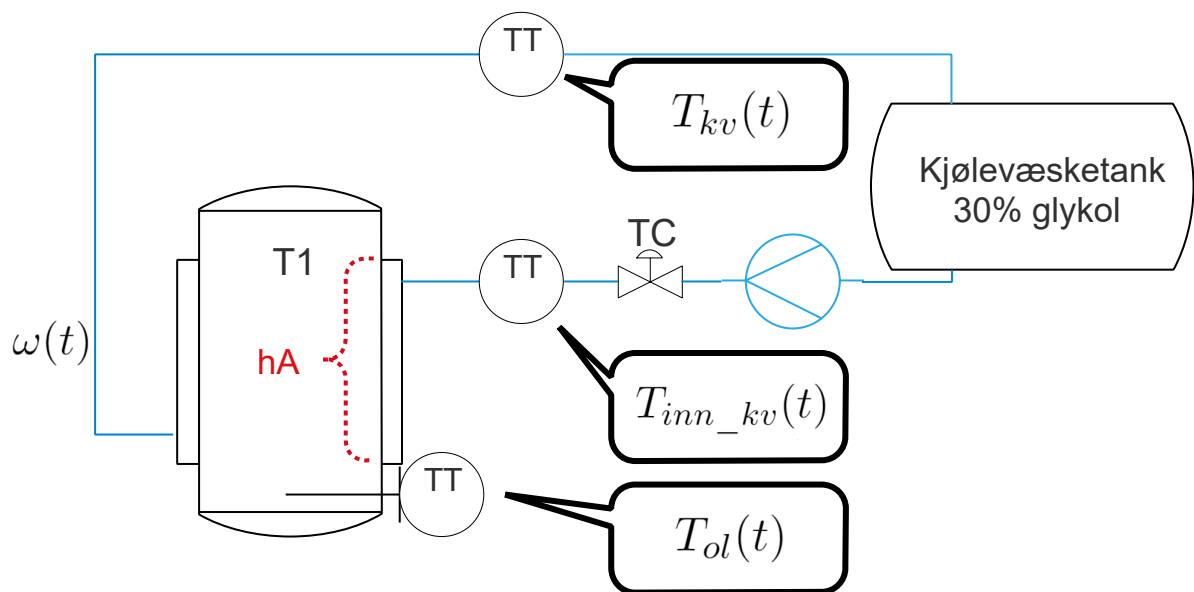
$$\Delta Q_{tilfort} = \omega(t) \cdot c_{p,kv} \cdot \Delta T_{innkv} \quad (4.21)$$

Masseflyten,  $\omega(t)$ , kjenner vi allerede fra resultatene i eksperiment 4.3.

Etter å ha tilegnet oss loggede verdier for kjølevæskene kan vi fortsette med løse likning 4.21 for produktet  $hA$  som følger:

$$hA = \frac{\Delta Q_{tilfort}}{T_{ol}(t) - T_{kv}(t)} \quad (4.22)$$

For dette eksperimentet rigget vi opp tre sensorer til å overvåke de nødvendige temperaturene under nedkjøling av et brygg, nemlig  $T_{kv}(t)$ ,  $T_{inn\_kv}(t)$  og  $T_{ol}(t)$ ; jamfør figur 4.6. Reguleringsventilen, TC, stod i 100% pådrag under hele nedkjølinga, altså  $u=1$ .



Figur 4.6: Skisse over eksperimentet. Parameteren vi fant,  $hA$ , er markert i rødt.

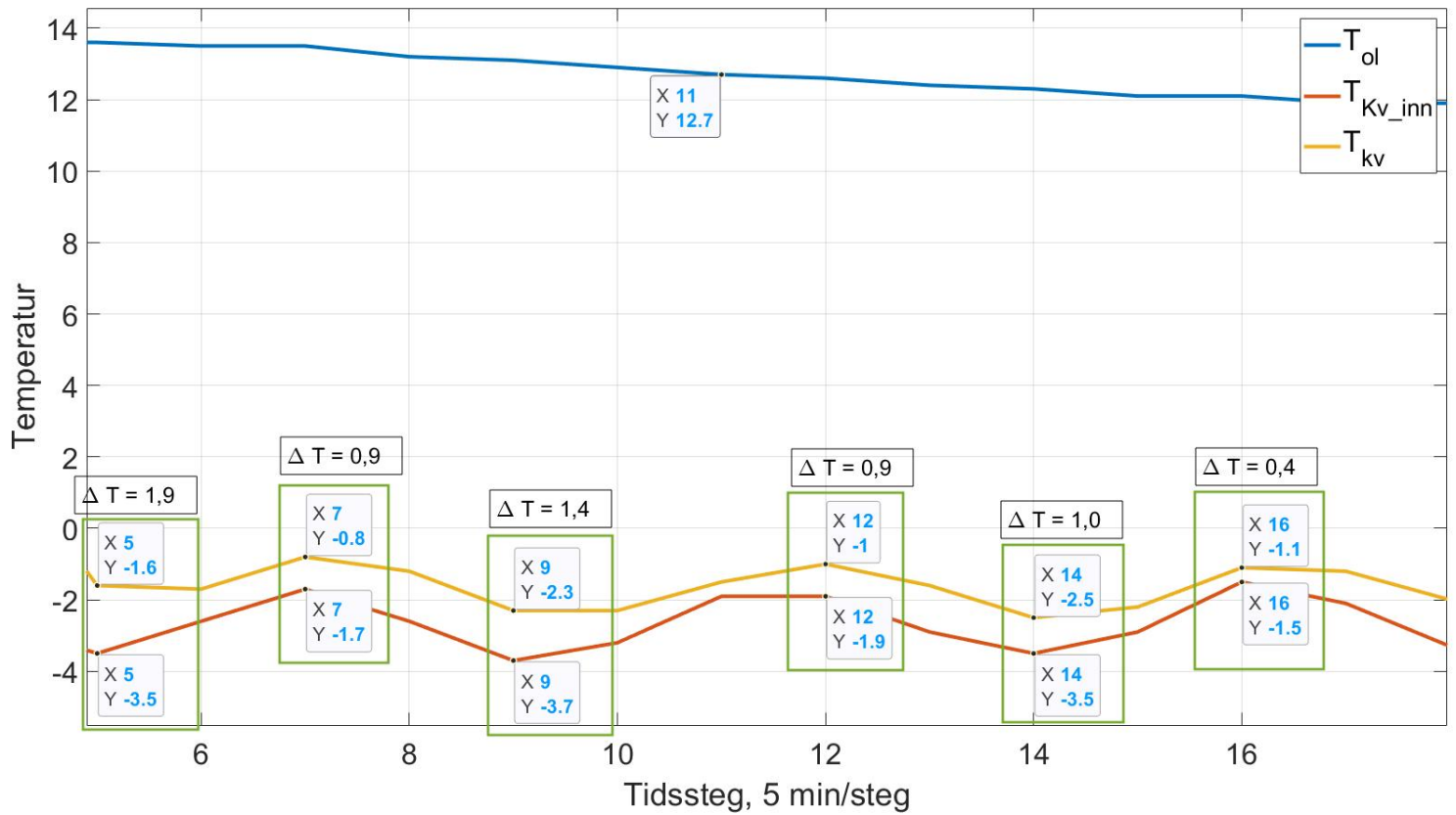
#### 4.6.2 Resultat

For utregningene av  $hA$  sammenlignet vi forskjellen mellom temperaturene i kjølevæska inn og ut av kappene. For sammenligning valgte vi å estimere  $hA$  på flere punkt i nedkjølinga, nemlig omkring øltemperatur på tolv, ni og fire  $^{\circ}C$ . Fra eksperimentet i kapittel 4.3 vet vi at et pådrag på  $u=1$  tilsvarer en masseflyt på  $\omega(t) = 0,53 \frac{kg}{s}$ . Fra samme kapittel fant vi også at  $c_{p,kv} = 3762 \frac{J}{kg \cdot K}$

#### $hA$ omkring $12^{\circ}C$ :

Som vist i figur 4.7 ga de loggede verdiene temperaturdifferanser i kjølevæska. Snittet av disse blir:

$$\overline{\Delta T_{kv,inn/ut}} = \frac{1,9 + 0,9 + 1,4 + 0,9 + 1,0 + 0,4}{6} \approx \underline{1,1^{\circ}C} \quad (4.23)$$



Figur 4.7: Grafen viser et utsnitt av loggede temperaturverdier under nedkjøling av et brygg omkring øltemperatur på 12 grader celsius.

Energien som blir tilført kjølevæska er dermed:

$$\begin{aligned}
 \Delta Q_{\text{tilfort}} &= \omega(t) \cdot c_{p,\text{kv}} \cdot \Delta T_{\text{kv,inn/ut}} \\
 &= 0,53 \cdot 3762 \cdot 1,1 \\
 &= 2193 \frac{J}{s}
 \end{aligned} \tag{4.24}$$

$hA_{12\text{gr}}$  blir dermed:

Snittet av kjølevæsketemperaturen ut av tanken blir:

$$\overline{T_{\text{kv}}(t)} = \frac{-(1,6 + 0,8 + 2,3 + 1 + 2,5 + 1,1)}{6} = -1,55^{\circ}\text{C} \tag{4.25}$$

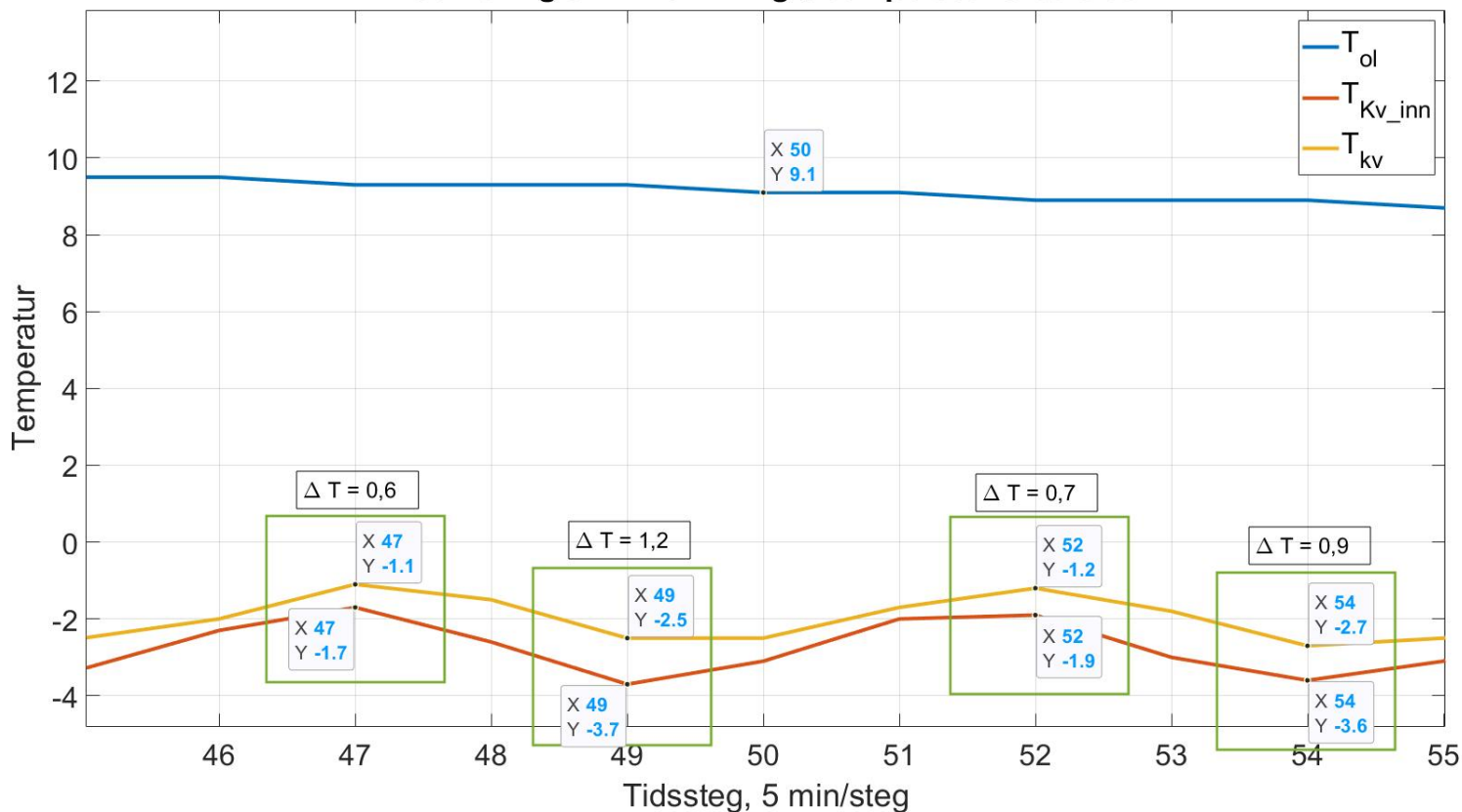
$$hA_{12\text{gr}} = \frac{\Delta Q_{\text{tilfort}}}{\overline{T_{\text{ol}}(t)} - \overline{T_{\text{kv}}(t)}} = \frac{2193}{12 + 1,55} \approx 162 \frac{J}{sK} \tag{4.26}$$

**hA omkring 9 °C:**

Som vist i figur 4.8 ga de loggede verdiene oss noen forskjellige temperaturdifferanser i kjølevæska. Snittet av disse blir som følger:

$$\overline{\Delta T_{kv,inn/ut}} = \frac{0,6 + 1,2 + 0,7 + 0,9}{4} = \underline{0,85^{\circ}C} \quad (4.27)$$

**Estimering av hA omkring øltemperatur 9 celsius**



Figur 4.8: Grafen viser et utsnitt av loggede temperaturverdier under nedkjøling av et brygg.

Energien som blir tilført kjølevæska er dermed:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\text{tilført}} &= \omega(t) \cdot c_{p,kv} \cdot \Delta T_{kv,inn/ut} \\ &= 0,53 \cdot 3762 \cdot 0,85 \\ &= \underline{1695} \frac{J}{s} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Snittet av kjølevæsketemperaturen ut av tanken blir:

$$\overline{T_{kv}(t)} = \frac{-(1,1 + 2,5 + 1,2 + 2,7)}{4} = \underline{-1,875^{\circ}C} \quad (4.29)$$

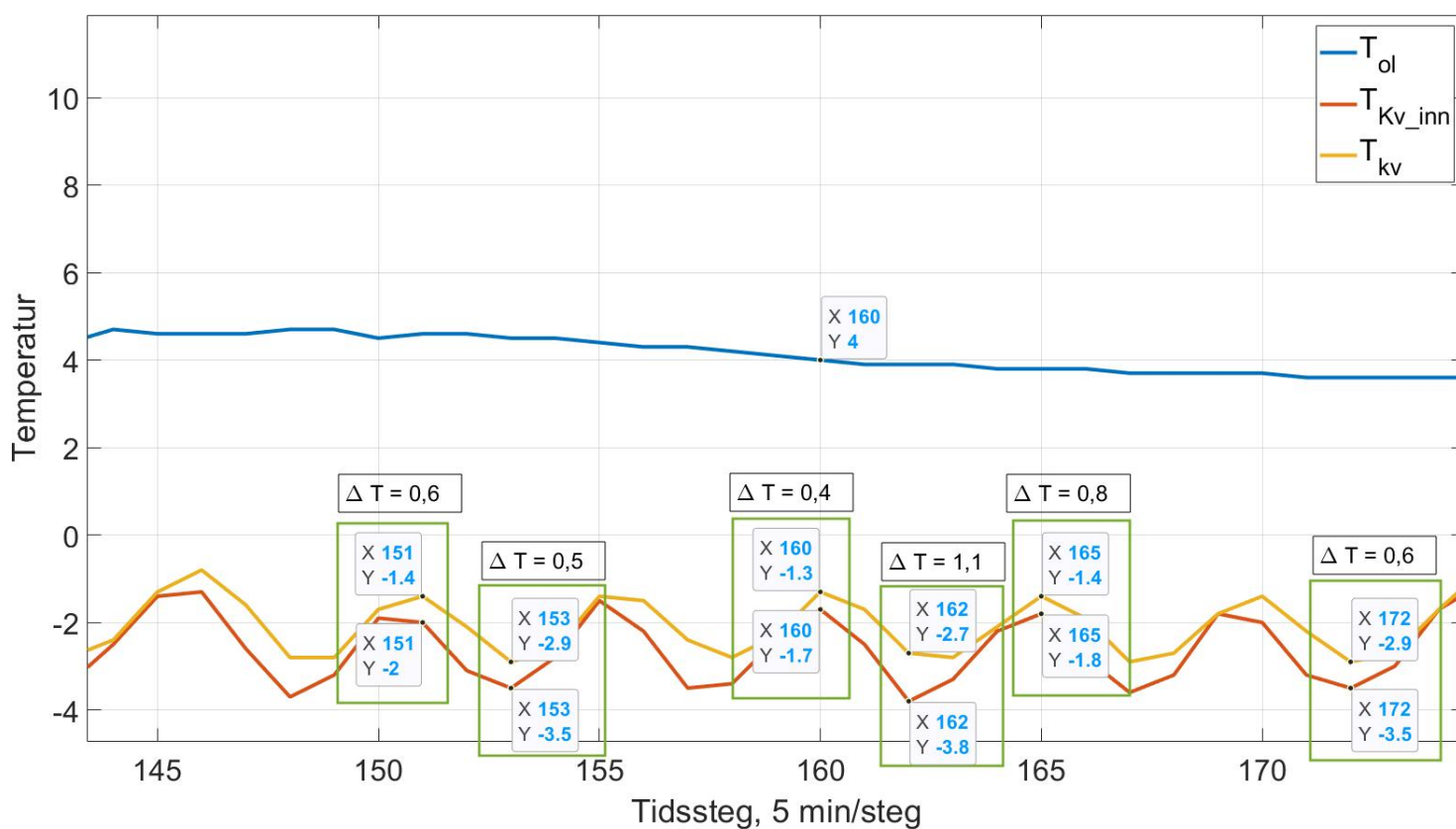
$hA_{9gr}$  blir dermed:

$$hA_{9gr} = \frac{\Delta Q_{tilfort}}{T_{ol}(t) - T_{kv}(t)} = \frac{1695}{9 + 1,875} \approx \underline{156} \frac{J}{sK} \quad (4.30)$$

**hA omkring 4 °C:**

I henhold figur 4.9 blir snittet av temperaturdifferansene:

$$\overline{\Delta T_{kv,inn/ut}} = \frac{0,6 + 0,5 + 0,4 + 1,1 + 0,8 + 0,6}{6} \approx \underline{0,67}^{\circ}C \quad (4.31)$$



Figur 4.9: Grafen viser et utsnitt av loggede temperaturverdier under nedkjøling av et brygg omkring øltemperatur på 4 grader celsius.

Energien som blir tilført kjølevæska er dermed:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{tilfort} &= \omega(t) \cdot c_{p,kv} \cdot \Delta T_{kv,inn/ut} \\ &= 0,53 \cdot 3762 \cdot 0,67 \\ &= \underline{1336} \frac{J}{s} \end{aligned} \quad (4.32)$$

Snittet av kjølevæsketemperaturen ut av tanken blir:

$$\overline{T_{kv}(t)} = \frac{-(1,4 + 2,9 + 1,3 + 2,7 + 1,4 + 2,9)}{6} = -2,1^{\circ}C \quad (4.33)$$

$hA_{4gr}$  blir dermed:

$$hA_{4gr} = \frac{\Delta Q_{tilfort}}{T_{ol}(t) - \overline{T_{kv}(t)}} = \frac{1336}{4 + 2,1} \approx \underline{219} \frac{J}{sK} \quad (4.34)$$

### 4.6.3 Diskusjon og konklusjon

Til tross for at pådraget til reguleringsventilen har vært konstant på under hele forsøket, så svinger kjølevæsketemperaturene en del mellom loggeintervallene. Differansen mellom  $T_{kv}$  og  $T_{kv\_inn}$  er nærmest konstant under hele eksperimentet. Vi gikk derfor ut i fra at disse svingningene mest sannsynligvis kom fra selve kjøleaggregatet, og ikke fra måleoppsettet vårt. Kjøleaggregatet slår inn og ut i intervall for å holde kjølevæska kald og det er mest trolig det vi ser på grafene våre her, men også med mulige innslag av andre tanker som krever nedkjøling samtidig.

Snittet av de tre målingene av  $hA$  tilsvarer at parameteren vil ligge på omtrentlig  $hA \approx \mathbf{179}$ .

## 4.7 Modellering av gjæringsprosessen

Som man ser av figur 4.5 har vi to energimengder som det foregår dynamikk mellom i dette systemet, nemlig energien i kjølevæska og energien i ølet, henholdsvis  $E_{kv}$  og  $E_{ol}$ . Modellen vår vil derfor bestå av to differensialligninger som beskriver disse energiene.

### 4.7.1 Differensialligning for kjølevæsketemperatur

I henhold til figur 4.5 ser vi at kjølevæska vil ta til seg energien som tapes fra ølet gjennom kjølekappene. Vi setter dermed opp følgende differensialligning for endringer i energien i kjølevæska:

$$\frac{dE_{kv}(t)}{dt} = Q_{inn}(t) - Q_{ut}(t) + Q_t(t) \quad (4.35)$$

Ved å da sette inn for energistrømningene, slik som de står i kapittel 4.5.1, og løse for  $T_{kv}(t)$  får vi følgende:

$$\frac{dT_{kv}(t)}{dt} = \frac{1}{m_{kv}c_{p,kv}} \left( \omega(t)c_{p,kv}T_{inn\_kv}(t) - \omega(t)c_{p,kv}T_{kv}(t) + hA(T_{ol} - T_{kv}(t)) \right) \quad (4.36)$$

Hvor massestrøm av kjølevæske  $\omega(t)$  kan modelleres som:

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \rho_{kv}q(t) \\ &= \rho_{kv}f(u(t))K_v\sqrt{\frac{\Delta p_v}{G}}\frac{1}{3600} \end{aligned} \quad (4.37)$$

Her er  $\rho_{kv}$  kjølevæskas tetthet.

Når vi så bytter ut  $\omega(t)$  med uttrykket i ligning 4.37 og trekker sammen blir differensialligningen som følger:

$$\begin{aligned} \frac{dT_{kv}(t)}{dt} &= g\left(f(u(t)), T_{inn\_kv}(t), T_{kv}(t), T_{ol}(t)\right) \\ &= \alpha \cdot f(u(t))\left(T_{inn\_kv}(t) - T_{kv}(t)\right) + \beta\left(T_{ol}(t) - T_{kv}(t)\right) \end{aligned} \quad (4.38)$$

Hvor:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\rho_{kv}K_v\sqrt{\frac{\Delta p_v}{G}}\frac{1}{3600}}{m_{kv}} \\ \beta &= \frac{hA}{m_{kv}c_{p,kv}} \end{aligned}$$



### 4.7.2 Differensialligning for temperatur i ølet

For å nå sette opp et uttrykk som beskriver endringene i ølets temperatur ser vi igjen tilbake til figur 4.5. Ølets energi vil bestemmes av varmemstrømmen som produseres av gjærens metabolyse og tapet til kjølevæska gjennom kjølekappene. Vi setter opp differensialligningen vist i 4.39.

$$\frac{dE_{\text{ol}}(t)}{dt} = Q_{\text{r}}(t) - Q_{\text{t}}(t) \quad (4.39)$$

Ved å sette inn ligningene 4.9 og 4.15 og løse for  $T_{\text{ol}}(t)$  får vi følgende differensialligning vist i 4.41.

$$m_{\text{ol}} \cdot c_{\text{p,ol}} \cdot \frac{dT_{\text{ol}}(t)}{dt} = Q_{\text{r}}(t) - hA(T_{\text{ol}}(t) - T_{\text{kv}}(t)) \quad (4.40)$$

$$\frac{dT_{\text{ol}}(t)}{dt} = \lambda \cdot Q_{\text{r}}(t) - \nu \cdot T_{\text{ol}}(t) + \nu \cdot T_{\text{kv}}(t) \quad (4.41)$$

Hvor:

$$\lambda = \frac{1}{m_{\text{ol}} \cdot c_{\text{p,ol}}}$$
$$\nu = \frac{hA}{m_{\text{ol}} \cdot c_{\text{p,ol}}}$$

### 4.7.3 Oppsummert ulineær modell

Vi har en ulineær modell bestående av følgende to differensialligninger.

$$\frac{dT_{\text{kv}}(t)}{dt} = \alpha \cdot f(u(t)) \left( T_{\text{inn\_kv}}(t) - T_{\text{kv}}(t) \right) + \beta \left( T_{\text{ol}}(t) - T_{\text{kv}}(t) \right) \quad (4.42)$$

$$\frac{dT_{\text{ol}}(t)}{dt} = \lambda \cdot Q_{\text{r}}(t) - \nu \cdot T_{\text{ol}}(t) + \nu \cdot T_{\text{kv}}(t) \quad (4.43)$$

## 4.8 Implementering og verifikasjon av ulineær modell i Simulink

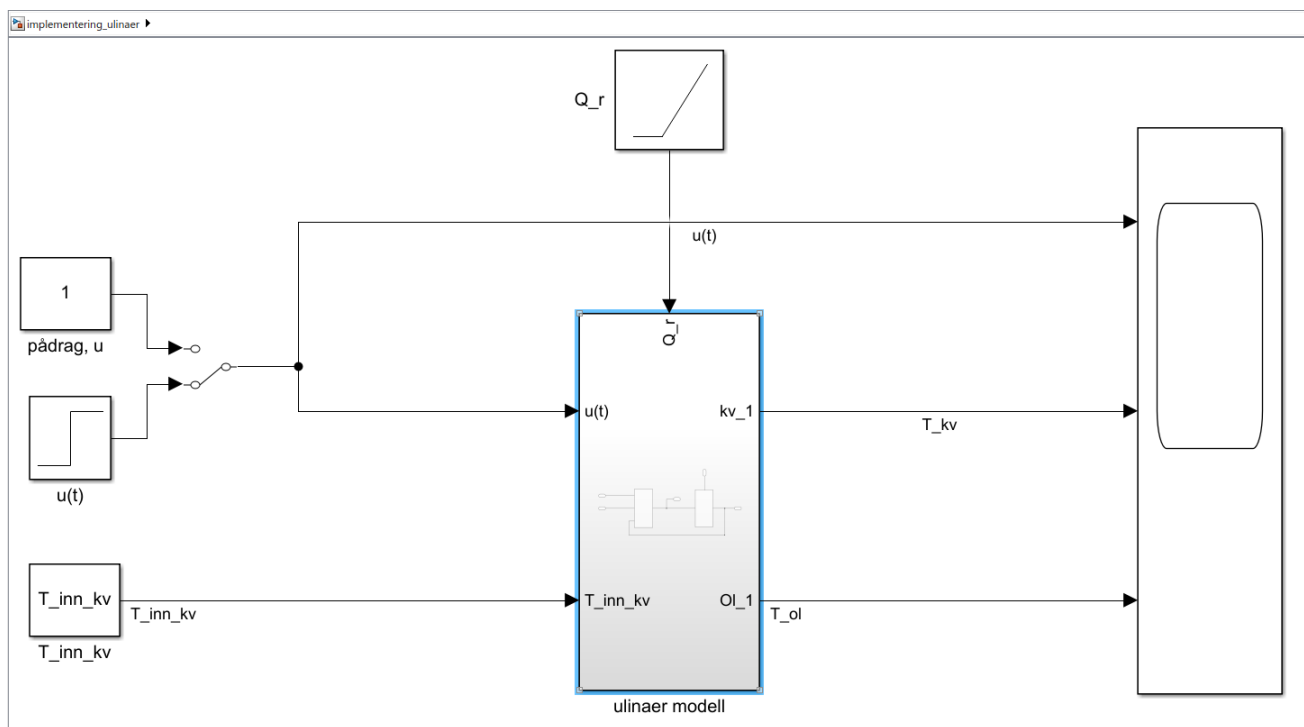
### 4.8.1 Implementering i Simulink

Filene for Matlab og Simulink er lagt ved i tillegg B. Matlabfilen ved navn *modellering\_implementering\_ulinaer.m* er et skript som blir bygget videre på seinere i dette kapitlet. I dette delkapitlet vil vi beskrive og verifisere den simuleringa som er å finne i simulinkfila *implementering\_ulinaer.slx*.

Som vist i figur 4.10 har vi laget en modell med to inngangsvariabler og en inngangsparameter. Her har vi da pådraget,  $u(t)$ ; temperatur for kjølevæska inn i kappene,  $T_{inn\_kv}$ ; og forstyrrelsen fra gjærens metabolyse,  $Q_r(t)$ .

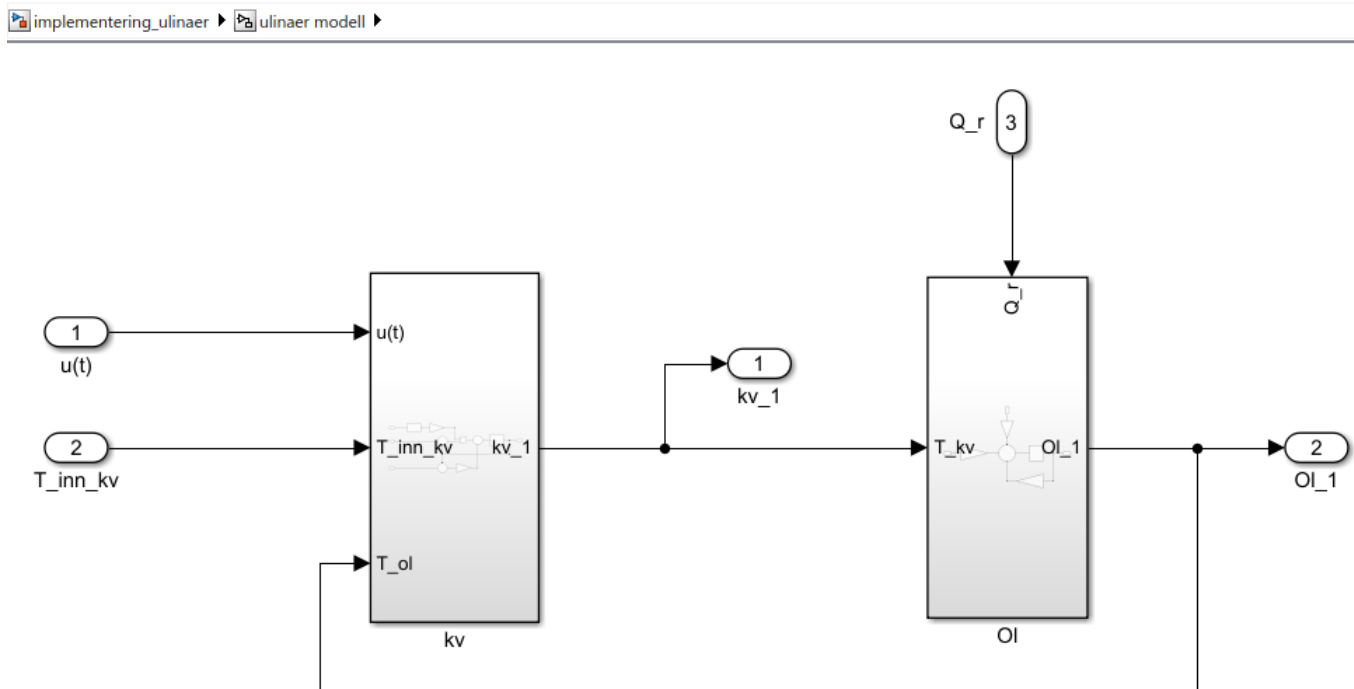
Pådraget kan man velge om skal være en valgt konstant verdi eller et sprang. Til slutt kan man tilpasse om forstyrrelsen skal være enten en lineær økning, slik som i figuren, eller gjøres om til f.eks. et sprang.

Utgangene fra modellen inn i skopet er de modellerte verdiene for kjølevæska ut av kappene og temperaturen i ølet. I tillegg er også pådraget rutet inn til skopet.



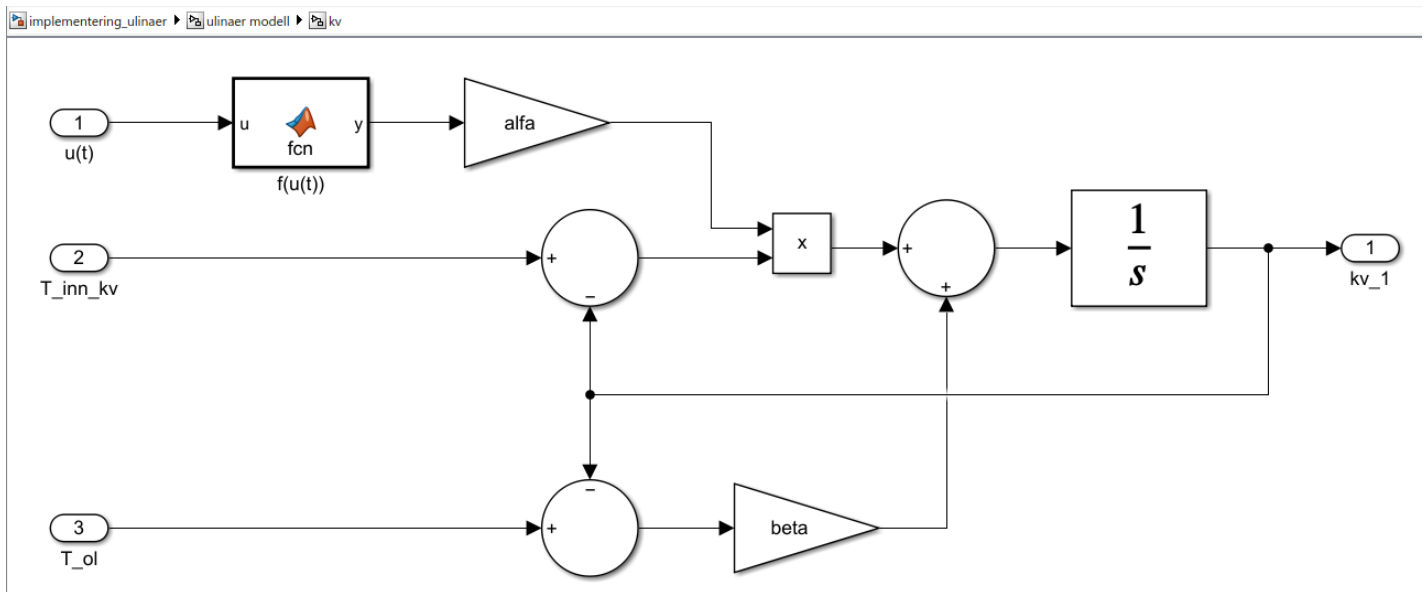
Figur 4.10: Skjermsnutt fra simulinkfila *implementering\_ulinaer.slx*

Klikker man inn i subsystemet *ulinaer modell* vil man finne, som vist i figur 4.11, to nye subsystemer for hver av differensialligningene, jamfør kapittel 4.7.3, i den ulineære modellen. Her kan man se hvordan differensialligningene er anordnet med sine inngangs- og utgangsvariabler.



Figur 4.11: Subsystem for den ulineære modellen. Skjermsnutt fra simulinkfila *implementering\_ulinaer.slx*

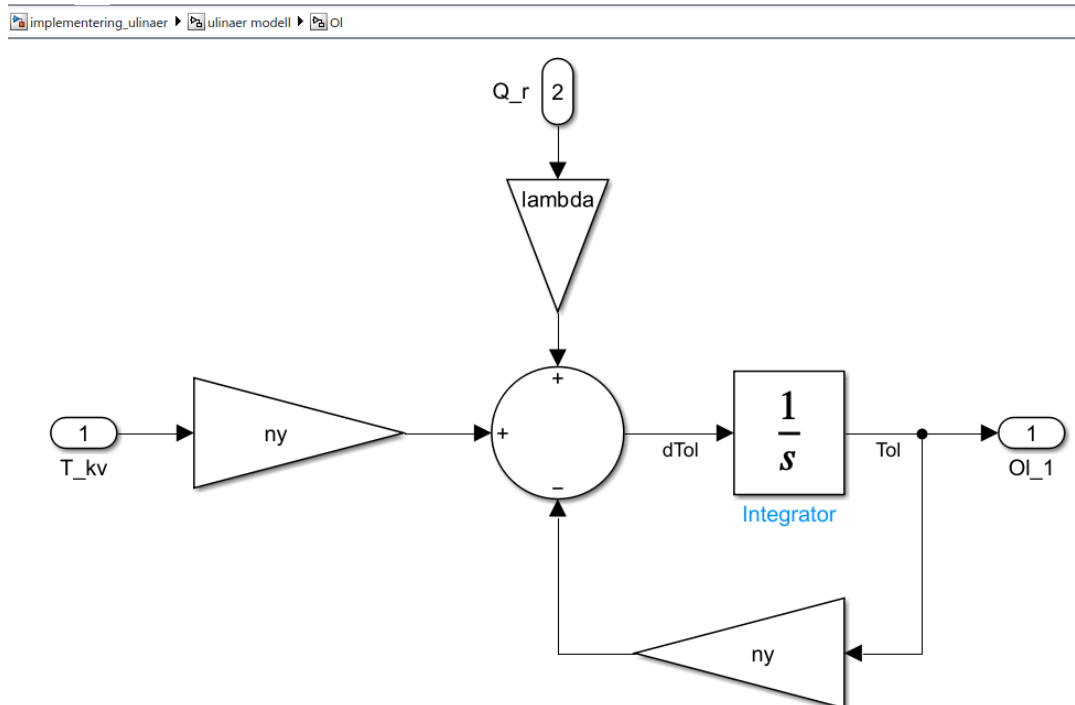
Ved å klikke videre inn i subsystemet *kv* vil man kunne se hvordan differensialligningen for kjølevæska er implementert, som vist i figur 4.12. For sammenligning er denne differensialligningen gjengitt i ligning 4.44. Parameterene  $\alpha$  og  $\beta$  er definert i skriptfila *modellering\_implementation\_ulinaer.m* som beskrevet i kapittel 4.7.



Figur 4.12: Subsystemet som modellerer temperaturen for kjølevæska. Skjermsnutt fra simulinkfila *implementering\_ulinaer.slx*

$$\frac{dT_{kv}(t)}{dt} = \alpha \cdot f(u(t)) \left( T_{inn\_kv}(t) - T_{kv}(t) \right) + \beta \left( T_{ol}(t) - T_{kv}(t) \right) \quad (4.44)$$

Likedan vil man i subsystemet *Ol* kunne se hvordan differensialligningen for ølets temperatur er implementert, som vist i figur 4.13. For sammenligning er denne differensialligningen gjengitt i ligning 4.45. Parameterene  $\lambda$  og  $\nu$  er da definert i skriptfila *modellering\_implementation\_ulinaer.m* som beskrevet i kapittel 4.7.



Figur 4.13: Subsystemet som modellerer temperaturen for ølet. Skjermsnutt fra simulinkfila *implementering\_ulinaer.slx*

$$\frac{dT_{ol}(t)}{dt} = \lambda \cdot Q_r(t) - \nu \cdot T_{ol}(t) + \nu \cdot T_{kv}(t) \quad (4.45)$$

#### 4.8.2 Verifikasjon av ulineær modell ved sammenligning mot måledata

For å verifisere at den lineære modellen stemmer med virkeligheten har vi simulert modellen slik som beskrevet i kapittel 4.8.1 og deretter sammenlignet resultatet med loggede verdier fra bryggeriet.

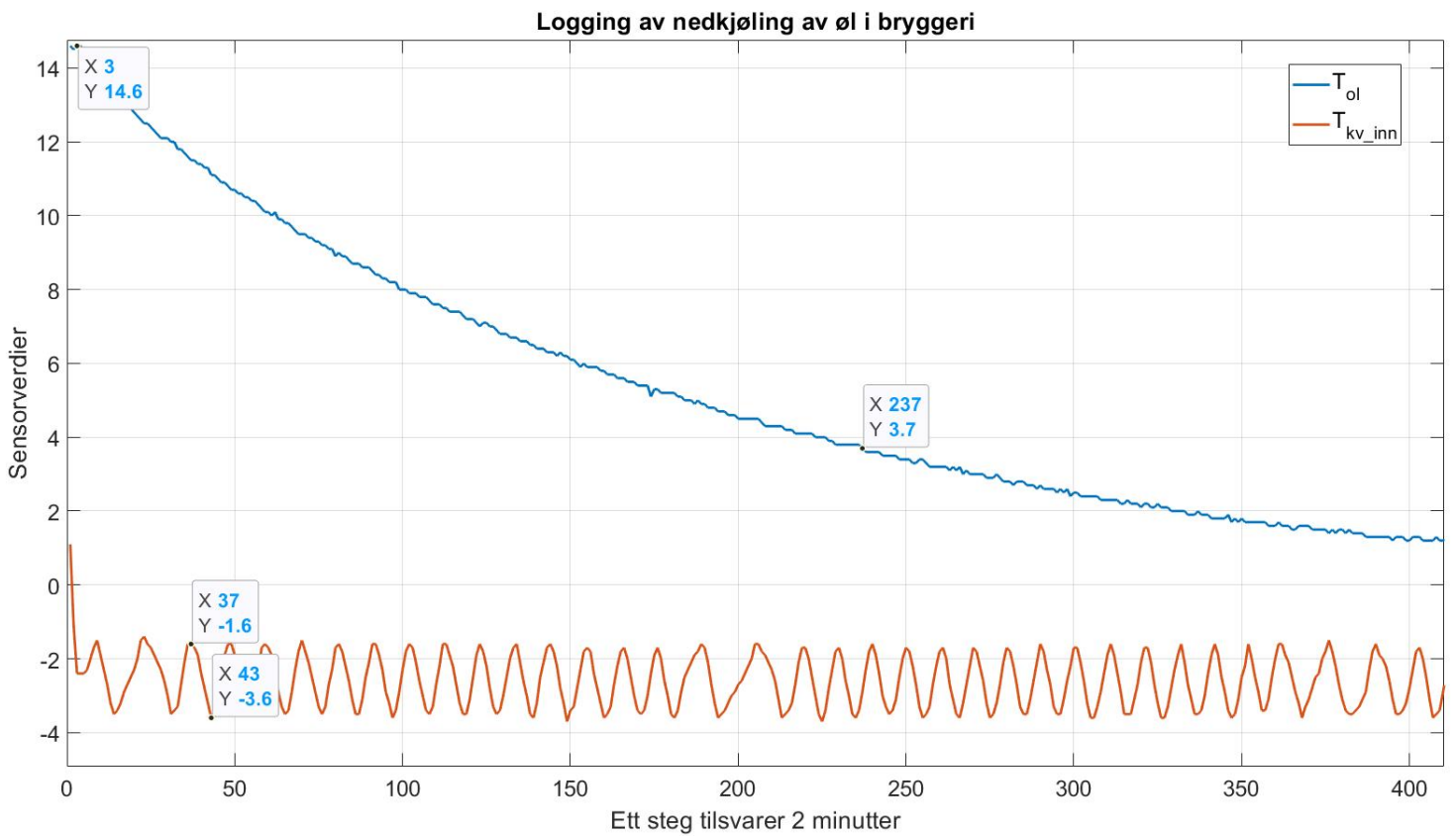
De loggede verdiene er fra en såkalt *cold crash*, hvor ølet allerede er ferdig gjæret og skal kjøles ned til  $2^{\circ}C$  for karbonering og tapping. Tidskonstanten er tiden det tar for å kjøle ned ølet til 63% av sluttemperatur. For verifikasjon sammenlignet vi tidskonstanten for loggede verdier og for simulerte verdier.

De loggede verdiene kan sees i figur 4.14, og utregningene for tidskonstant vises i ligning 4.46 og 4.47.

$$\begin{aligned}
 T_{63\%} &= T_{\text{start}} - \left( T_{\text{start}} + \overline{T_{\text{inn\_kv}}} \right) \cdot 0,63 \\
 &= 14,6 - \left( 14,6 + \frac{1,6 + 3,6}{2} \right) \cdot 0,63 = \underline{3,76^\circ\text{C}}
 \end{aligned}
 \tag{4.46}$$

$$T_{r,\text{logget}} = (t_{\text{slutt}} - t_{\text{start}}) \cdot \frac{2}{60} = (237 - 3) \cdot \frac{2}{60} = \underline{7,8 \text{ timer}}
 \tag{4.47}$$

Hvor  $\frac{2}{60}$  regner om tidsskrittene til timer, ettersom PLS-en lagrer en ny loggeverdi hvert andre minutt.



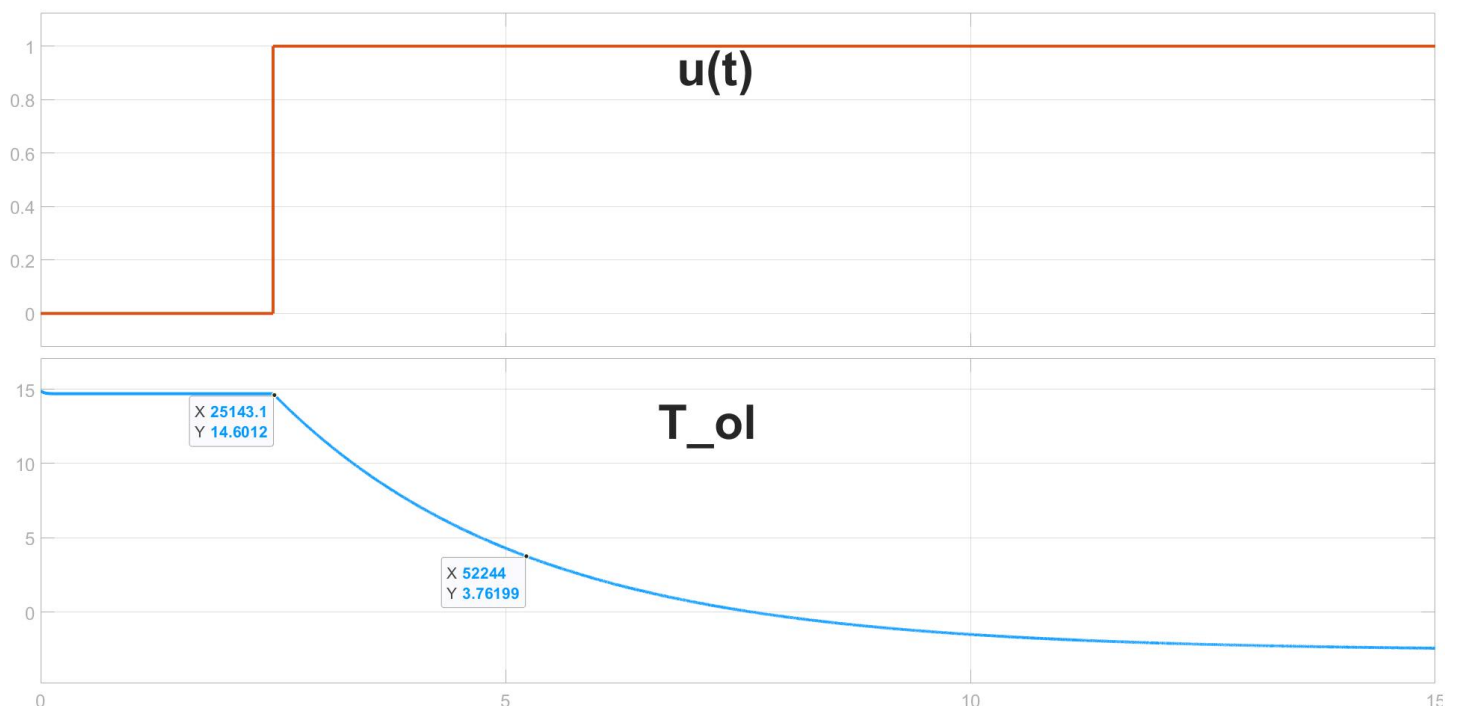
Figur 4.14: Loggede verdier for nedkjøling av et øl i bryggeriet.

For å verifisere modellen simulerte vi den med like betingelser som for de loggede verdiene. Starttemperaturen for nedkjølinga satt til  $T_{ol} = 14,6^\circ\text{C}$  og sluttemperatur er satt til snittemperaturen for kjølevæska inn i kappene, altså  $T_{\text{inn\_kv}} = -2,6^\circ\text{C}$ . Den seinere tappinga av ølet avslørte dessuten at det var 1150 liter øl i tanken, dette er derfor lagt inn som volum i skriptfila. De loggede resultatene kan sees i figur 4.15, og utregningene for tidskonstant vises i ligning 4.48 og 4.49.

$$\begin{aligned}
T_{63\%} &= T_{\text{start}} - \left( T_{\text{start}} + \overline{T_{\text{inn\_kv}}} \right) \cdot 0,63 \\
&= 14,6 - \left( 14,6 + \frac{1,6 + 3,6}{2} \right) \cdot 0,63 = \underline{3,76^\circ\text{C}}
\end{aligned}
\tag{4.48}$$

$$T_{r,\text{simulert}} = (t_{\text{slutt}} - t_{\text{start}}) \cdot \frac{1}{3600} = (52244 - 25143) \cdot \frac{1}{3600} = \underline{7,5 \text{ timer}}
\tag{4.49}$$

Hvor  $\frac{1}{3600}$  regner om tidsskrittene til timer.



Figur 4.15: Simulerte verdier for nedkjøling av et øl.

### 4.8.3 Diskusjon og konklusjon

Tidskonstanten for de loggede verdiene i bryggeriet ble regnet ut til å være  $T_{r,\text{logget}} = 7,8[h]$ , mens den simulerte modellen ga  $T_{r,\text{simulert}} = 7,5[h]$ . Disse tidskonstantene utgjør en forskjell på 18 minutter, eller 3,8%, og vi anser den ulineære modellen som verifisert med gode marginer.

Modellen forutsetter ideell røring og temperaturfordeling både for ølet og kjølevæska i tankens kapper. For ølet sin del anser vi dette som en realistisk tilnærming ettersom gjærens metabolyse vil skape en kraftig konveksjon av energi i væska, som beskrevet i kapittel 2.4. Etersom volumet av kjølekappene ikke utgjør mer enn omtrent

15 liter, forutsetter vi at eventuell inhomogen temperaturfordeling i kjølevæska er neglisjerbar sammenlignet med ølets 1000 liter.

Andre feilkilder vil være presisjonen i estimatetene av ølets tetthet fra kapittel 4.5. Tettheten vil variere litt fra brygg til brygg. Eksempelvis vil et svært sterkt øl ha en tetthet opp mot  $\rho = \frac{OG+FG}{2} = \frac{1,090+1,025}{2} = 1,0575 \frac{kg}{L}$ , mens et svakere øl for butikkmarkedet typisk vil være  $\rho = 1,029$ , som vist i ligning 4.16. Forskjellene her utgjør kun hundredeler, og vil dermed trolig ikke være et avvik av stor betydning.

Spesifikk varmekapasitet for ølet er et estimat hentet fra Fred Scheer [16]. I likhet med tettheten er også dette en snittverdi for flere øltyper. Likevel vil vann være den største bestanddelen av ølet, og usikkerheten i dette estimatet vil sannsynligvis være av samme størrelsesorden som for tettheten. Vi anerkjenner Scheer sin lange erfaring fra bryggeribransjen, men han er dessverre ikke så flink til å oppgi kilder til verdiene han legger fram.

Derimot vil estimeringen av varmeoverføringstallet mellom kjølevæska og ølet ha en vesentlig større betydning for presisjonen i modellen. Dersom man på et senere tidspunkt ønsker en enda større presisjon i modellen vil nok denne parameteren være verdt å gjøre flere forsøk på.

## 4.9 Linearisering og overføringsfunksjon

Dette kapittelet beskriver hvordan vi fant en overføringsfunksjon fra pådrag til øltemperatur. Denne overføringsfunksjonen legger grunnlaget for regulatorparameterene som har blitt programmert inn i PLSen. Vi valgte å finne overføringsfunksjonen ved å linearisere modellen, sette den på tilstandsromform og deretter beregne den ved hjelp av matrisemanipulering.

Den ulineære modellen er gjengitt i ligning 4.50 og 4.51. Sistnevnte allerede lineær, mens 4.50 må lineariseres omkring et generelt arbeidspunkt.

$$\frac{dT_{kv}(t)}{dt} = \alpha \cdot f(u(t)) \left( T_{inn\_kv}(t) - T_{kv}(t) \right) + \beta \left( T_{ol}(t) - T_{kv}(t) \right) \quad (4.50)$$

$$\frac{dT_{ol}(t)}{dt} = \lambda \cdot Q_r(t) - \nu \cdot T_{ol}(t) + \nu \cdot T_{kv}(t) \quad (4.51)$$

### 4.9.1 Linearisering av differensialligning for kjølevæsketemperatur:

Linearisering av ligning 4.50 gir følgende:

$$\Delta \dot{T}_{kv}(t) = \gamma \cdot \Delta u(t) + \epsilon \cdot \Delta T_{inn\_kv}(t) - \eta \cdot \Delta T_{kv}(t) + \kappa \cdot \Delta T_{ol}(t) \quad (4.52)$$



Hvor:

$$\begin{aligned}\gamma &= \left. \frac{\partial g}{\partial f} \frac{\partial f}{\partial u} \right|_A = \alpha (T_{\text{inn\_kv}_A} - T_{\text{kv}_A}) \cdot \dot{f}(u(t)) \\ \epsilon &= \left. \frac{\partial g}{\partial T_{\text{inn\_kv}}} \right|_A = \alpha f_A \\ \eta &= \left. \frac{\partial g}{\partial T_{\text{kv}}} \right|_A = \alpha f_A + \beta \\ \kappa &= \left. \frac{\partial g}{\partial T_{\text{ol}}} \right|_A = \beta\end{aligned}$$

Ligning 4.52 beskriver endringen i kjølevæskas temperatur ut av kappene omkring et generelt arbeidspunkt, A.

#### 4.9.2 Tilstandsrommodell og overføringsfunksjon

Fremgangsmetoden som er benyttet i dette delkapittelet er som beskrevet på side 84 i Finn Haugens *Dynamiske systemer*[11].

De to lineære ligningene, 4.53 og 4.54, kan nå skrives som tilstandsrommodellen i ligning 4.55.

$$\Delta \dot{T}_{\text{kv}}(t) = \gamma \cdot \Delta u(t) + \epsilon \cdot \Delta T_{\text{inn\_kv}}(t) - \eta \cdot \Delta T_{\text{kv}}(t) + \kappa \cdot \Delta T_{\text{ol}}(t) \quad (4.53)$$

$$\Delta \dot{T}_{\text{ol}}(t) = \lambda \cdot \Delta Q_r(t) - \nu \cdot \Delta T_{\text{ol}}(t) + \nu \cdot \Delta T_{\text{kv}}(t) \quad (4.54)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{T}_{\text{ol}}(t) \\ \Delta \dot{T}_{\text{kv}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\nu & \nu \\ \kappa & -\eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_{\text{ol}}(t) \\ \Delta T_{\text{kv}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \gamma \end{bmatrix} \cdot \Delta u(t) \quad (4.55)$$

Hvor:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} -\nu & \nu \\ \kappa & -\eta \end{bmatrix} &= A \\ \begin{bmatrix} 0 \\ \gamma \end{bmatrix} &= B\end{aligned}$$

Vi henter deretter ut målinger av ølets temperatur til utgangen  $y(t) = \Delta T_{\text{ol}}(t)$  ved hjelp av ligning 4.56

$$y(t) = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \Delta T_{\text{ol}}(t) \\ \Delta T_{\text{kv}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \Delta u(t) \quad (4.56)$$

Hvor:

$$\begin{aligned} [1 \quad 0] &= C \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} &= D \end{aligned}$$

Transferfunksjonen,  $H_{ol}$ , kan nå kalkuleres ved hjelp av formel 4.57 fra side 85 i *Dynamiske systemer*[11]. Beregningene ble gjort i matlabfila *tilstandsrommodell.m* fra tillegg B. Resultatet er vist i ligning 4.58.

$$H(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (4.57)$$

$$\implies H_p(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{\frac{\gamma\nu}{\eta\nu - \kappa\nu}}{\left(\frac{s}{\sqrt{\eta\nu - \kappa\nu}}\right)^2 + \frac{\nu + \eta}{\eta\nu - \kappa\nu} \cdot s + 1} \quad (4.58)$$

## 4.10 Verifisering av overføringsfunksjon

For å verifisere overføringsfunksjonen i ligning 4.58 har vi simulert den i parallell med den ulineære modellen fra kapittel 4.8.2 og sammenlignet resultatene.

Simuleringen ble gjort i Simulink og denne fila, *verifikasjon\_linaer\_mot\_ulinaer*, er lagt ved i tillegg B sammen med tilhørende skript, *modellering\_verifikasjon\_linaer.m*, fra Matlab.

### 4.10.1 Arbeidspunkt

Den lineære modellen er kun gyldig omkring et arbeidspunkt. Vi valgte oss verdier for ølets temperatur og kjølevæske inn/ut av kappene, vist i ligning 4.60-4.61. Videre brukte vi den ulineære modellen, gjengitt i ligning 4.62 og 4.63, til å analytisk bestemme stasjonære verdier  $Q_{r,A}$  og  $u_A$ , som vist i ligning 4.64 og 4.66.

$$T_{ol,A} = 19^{\circ}C \quad (4.59)$$

$$T_{inn\_kv,A} = -2,6^{\circ}C \quad (4.60)$$

$$T_{kv,A} = -1,6^{\circ}C \quad (4.61)$$

$$\frac{dT_{kv}(t)}{dt} = \alpha \cdot f(u(t)) \left( T_{inn\_kv}(t) - T_{kv}(t) \right) + \beta \left( T_{ol}(t) - T_{kv}(t) \right) \quad (4.62)$$

$$\frac{dT_{ol}(t)}{dt} = \lambda \cdot Q_r(t) - \nu \cdot T_{ol}(t) + \nu \cdot T_{kv}(t) \quad (4.63)$$

$$Q_{r,A} = \frac{\nu(T_{ol,A} - T_{inn\_kv,A})}{\lambda} = \underline{3,6874 \cdot 10^3} \quad (4.64)$$

$$f(u_A) = -\frac{\beta(T_{ol,A} - T_{inn\_kv,A})}{(T_{inn,A} - T_{kv,A})} = 0,1253 \quad (4.65)$$

$$u_A = f(u_A)^{-1} = \underline{0,5980} \quad (4.66)$$

Arbeidspunktet består dermed av de stasjonære verdiene:

$$T_{ol,A} = 19^{\circ}C$$

$$T_{inn\_kv,A} = -2,6^{\circ}C$$

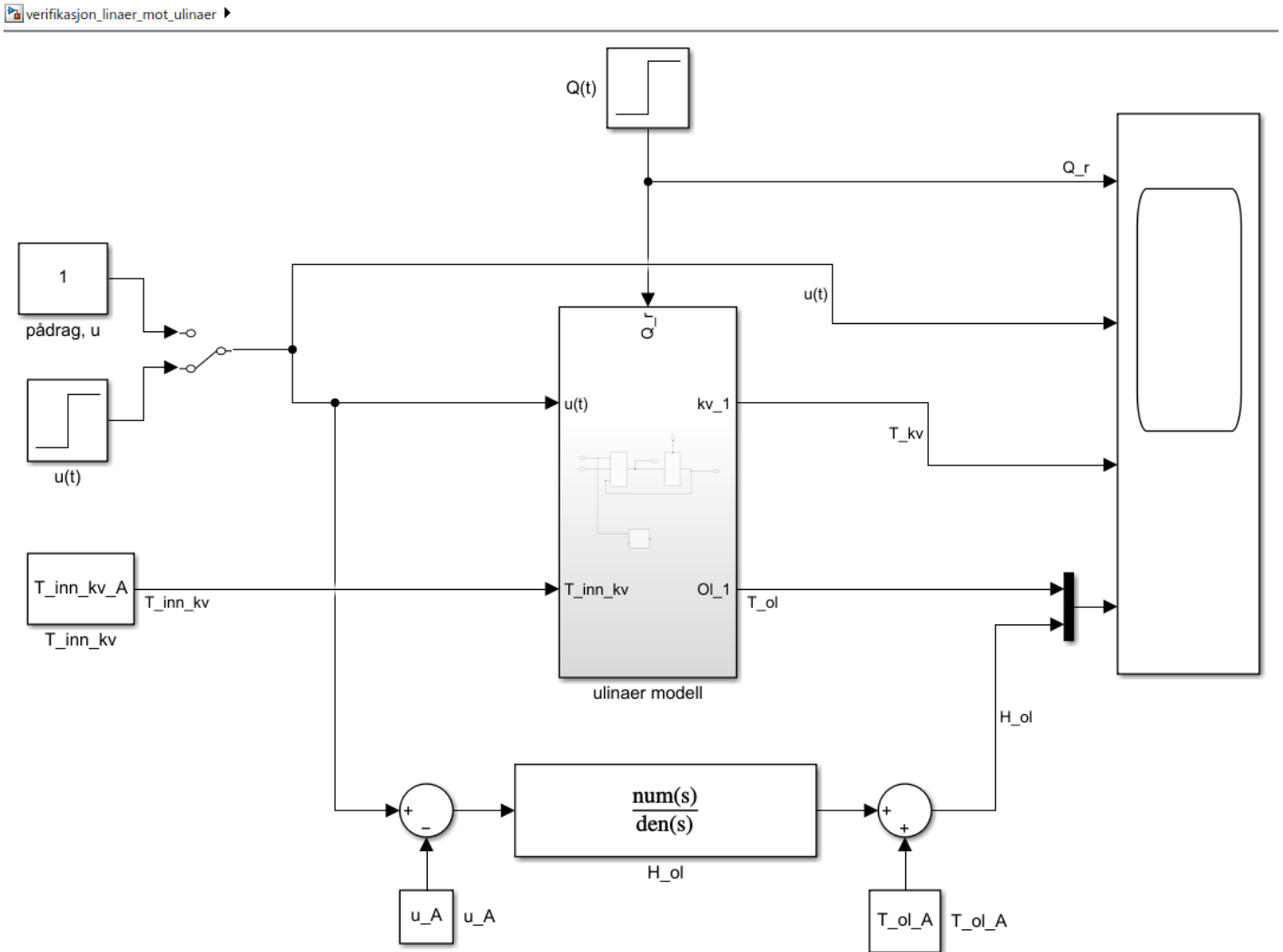
$$T_{kv,A} = -1,6^{\circ}C$$

$$Q_{r,A} = 3,6874 \cdot 10^3 \frac{J}{s}$$

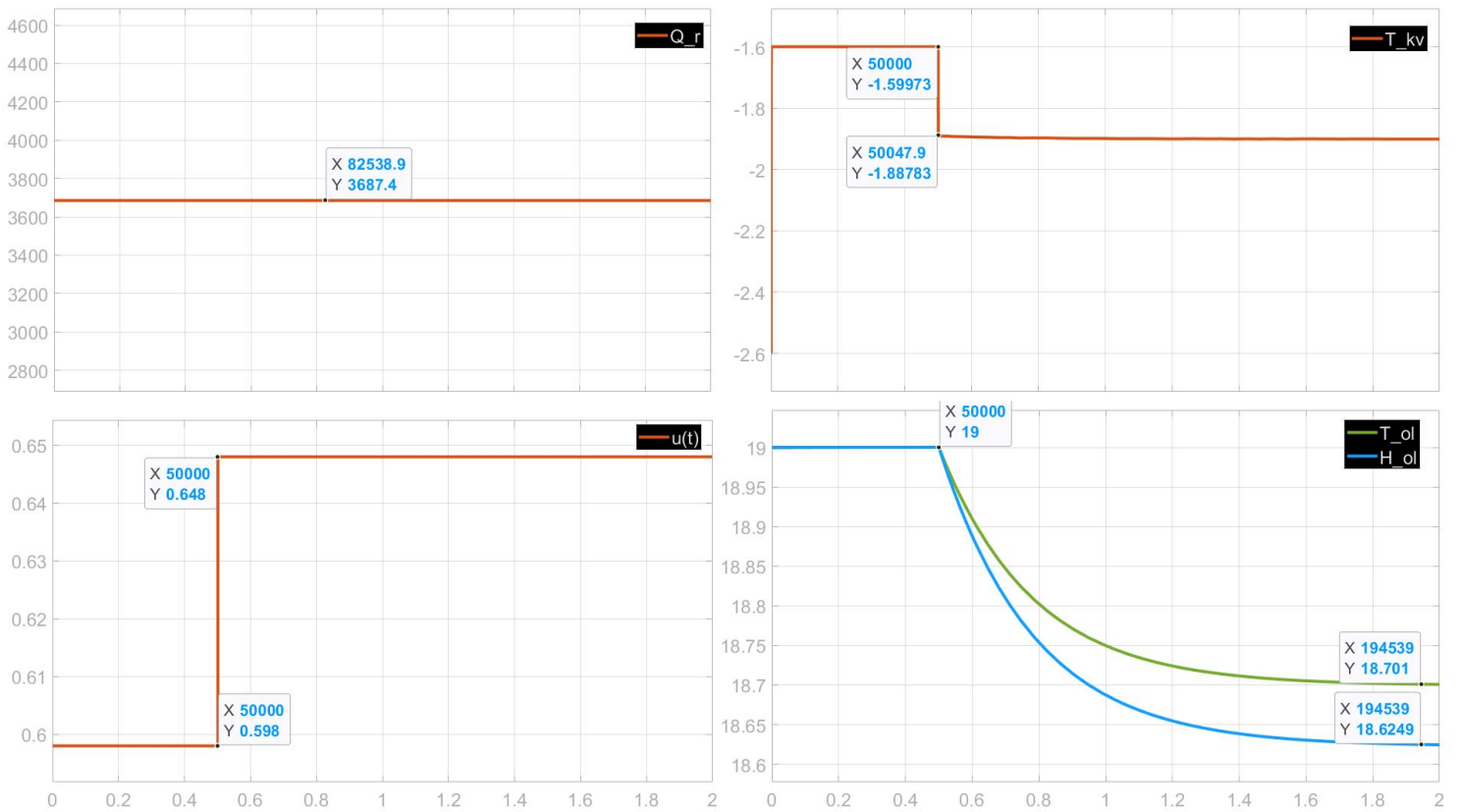
$$u_A = 0,5980$$

#### 4.10.2 Simulering av $H_p$

$H_p$  ble implementert i Simulink som vist i figur 4.16. Arbeidspunktet for pådraget blir trukket vekk foran blokka for overføringsfunksjonen, slik at kun spranget blir lest av i skopet. Resultat for simuleringen vises i figur 4.17.



Figur 4.16: Skjermsnutt fra Simulink-fila *verifikasjon\_linaer\_mot\_ulinaer*. Implementering av  $H_p$  er gjort i egen blokka under den ulineære modellen.



Figur 4.17: Simulering av  $H_p$  og sammenligning med ulineær modell  $T_{ol}$

### 4.10.3 Diskusjon og konklusjon

Differansen mellom den ulineære og lineære modellen for  $T_{ol}$  er på det meste  $\approx 0,08^\circ C$ . Overføringsfunksjonen,  $H_p$ , gir altså en god representasjon av temperaturen i ølet.  $H_p$  har nå blitt verifisert mot den ulineære modellen, som igjen har blitt verifisert mot loggede verdier i kapittel 4.8.2.

## 4.11 Analyse av overføringsfunksjonen

### 4.11.1 Poler og karakterisering

Ved inspeksjon av teller og nevner i overføringsfunksjonen, gjengitt i ligning 4.67, kan vi finne koeffisientene for forsterkning, udempet resonansfrekvens og dempningsfaktor som vist i ligning 4.68-4.70.

$$H_p(s) = \frac{T_{ol}(s)}{u(s)} = \frac{\frac{\gamma\nu}{\eta\nu - \kappa\nu}}{\left(\frac{s}{\sqrt{\eta\nu - \kappa\nu}}\right)^2 + \frac{\nu + \eta}{\eta\nu - \kappa\nu} \cdot s + 1} \quad (4.67)$$

$$\text{Forsterkning: } K = \frac{\gamma\nu}{\eta\nu - \kappa\nu} = -7,5 \quad (4.68)$$

$$\text{Udempet resonansfrekvens: } \omega_0 = \sqrt{\eta\nu - \kappa\nu} = 0,0015 \quad (4.69)$$

$$\text{Relativ dempningsfaktor: } \zeta = \frac{\nu + \eta}{2(\eta\nu - \kappa\nu)} \cdot \omega_0 = 21 \quad (4.70)$$

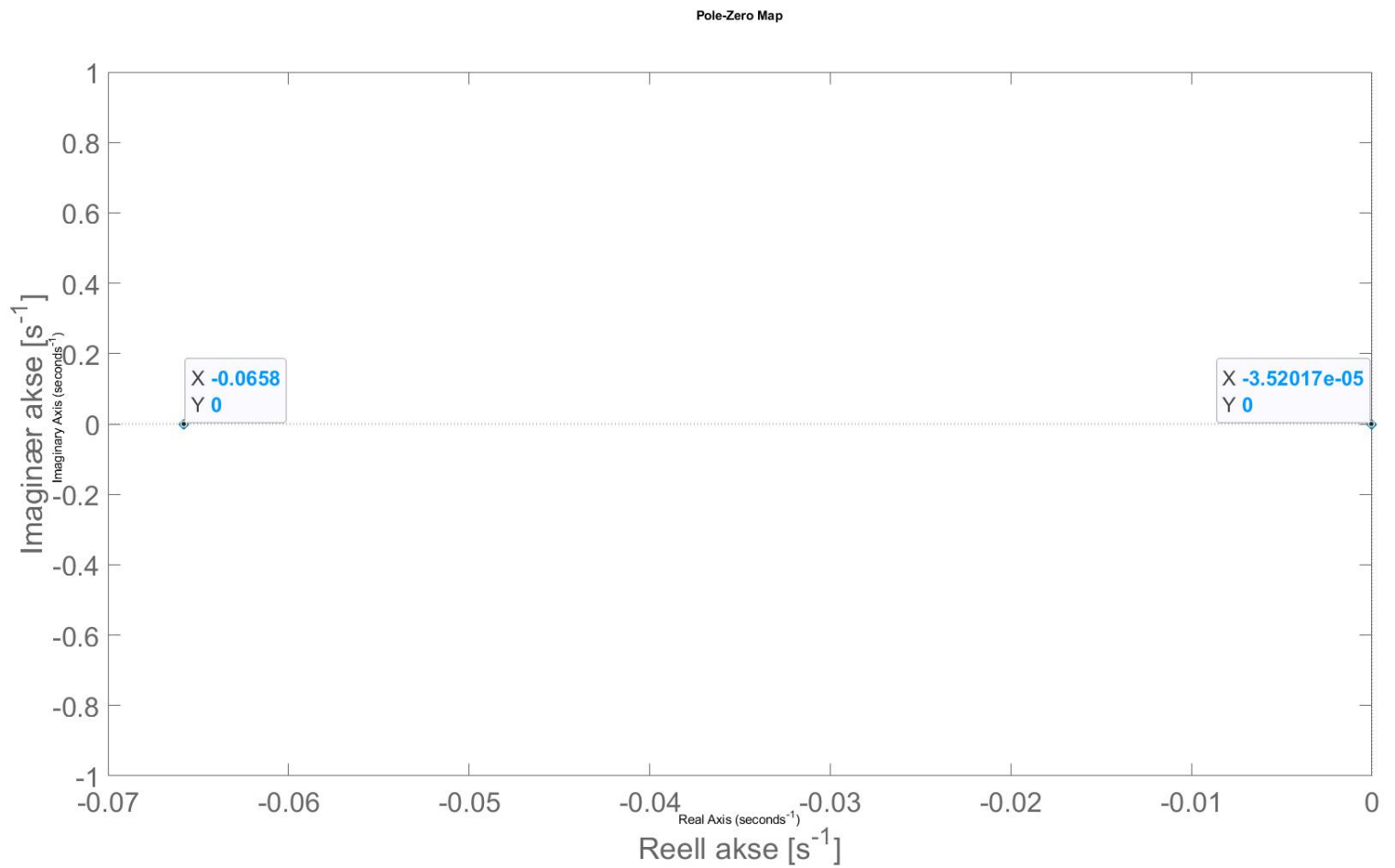
En verdi for  $\zeta$  som er større enn 1, tyder på at vi har et underdempet system. Noe vi får videre bekreftet ved å studere polene som vist i figur 4.18. Her ser vi at polene er både reelle og multiple, som er karakteristisk for et underdempet system.

Basert på polene,  $p_1$  og  $p_2$ , kan vi kalkulere tidsresponsene,  $T_1$  og  $T_2$ , som vist i ligning 4.71 og 4.72. Videre kan vi så skrive om  $H_p$  som vist i ligning 4.73.

$$T_1 = -\frac{1}{p_1} = 2,8408 \cdot 10^4 [s] = 7,9 [h] \quad (4.71)$$

$$T_2 = -\frac{1}{p_2} = 15 [s] \quad (4.72)$$

$$H_{p,2} = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (4.73)$$



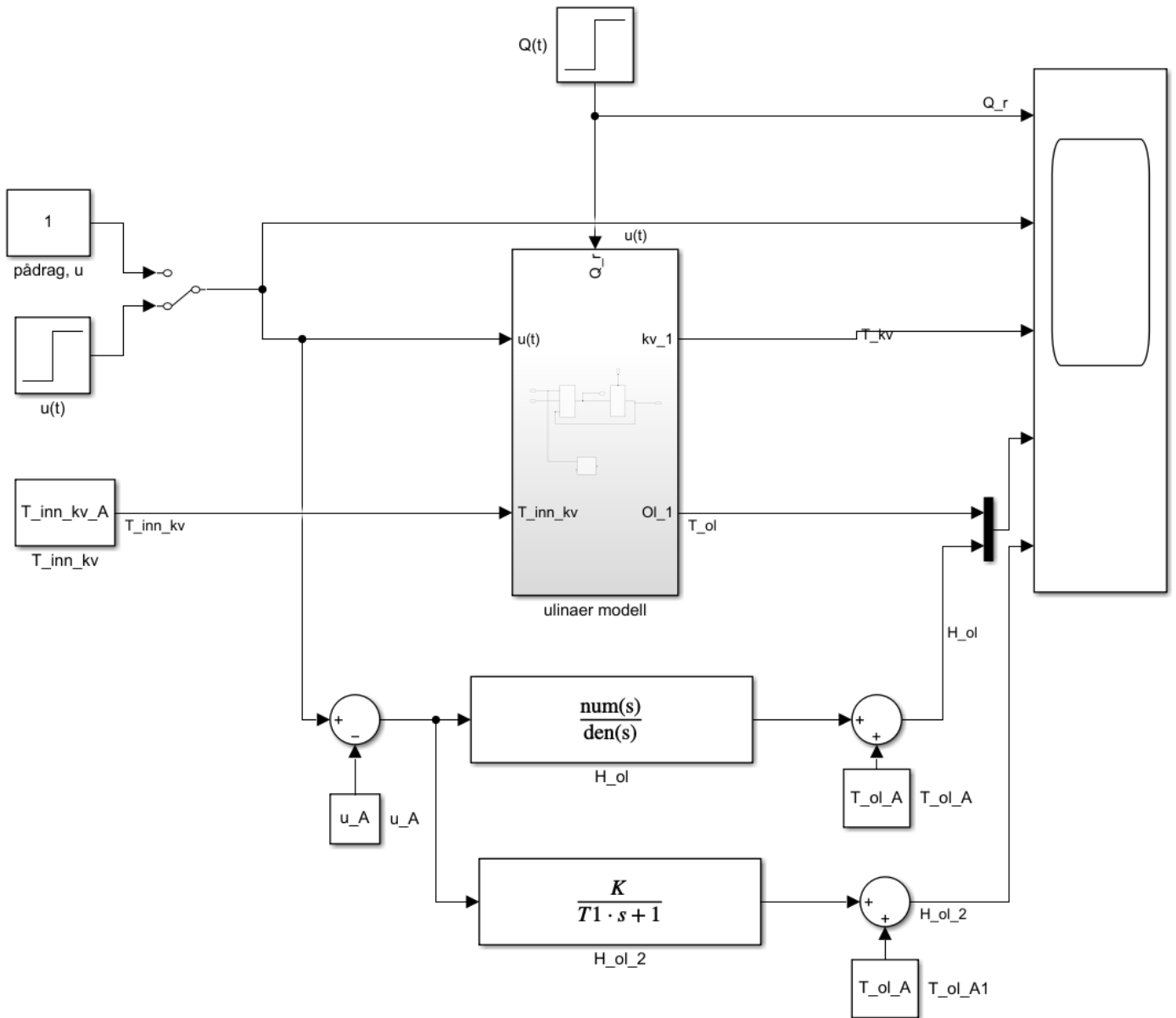
Figur 4.18: Simulering av  $H_p$

#### 4.11.2 Forenkling av $H_p$

Fra ligning 4.71 og 4.72 ser vi at  $T_1$  er vesentlig større enn  $T_2$ . Disse responsene tilsvarer da henholdsvis tidsresponsen for temperaturen i ølet og kjølevæska, hvor kjølevæska er av betydelig mindre volum enn selve ølet. Vi kan dermed med god nøyaktighet tilnærme  $H_p$  til et førsteordenssystem, som vist i ligning 4.74.

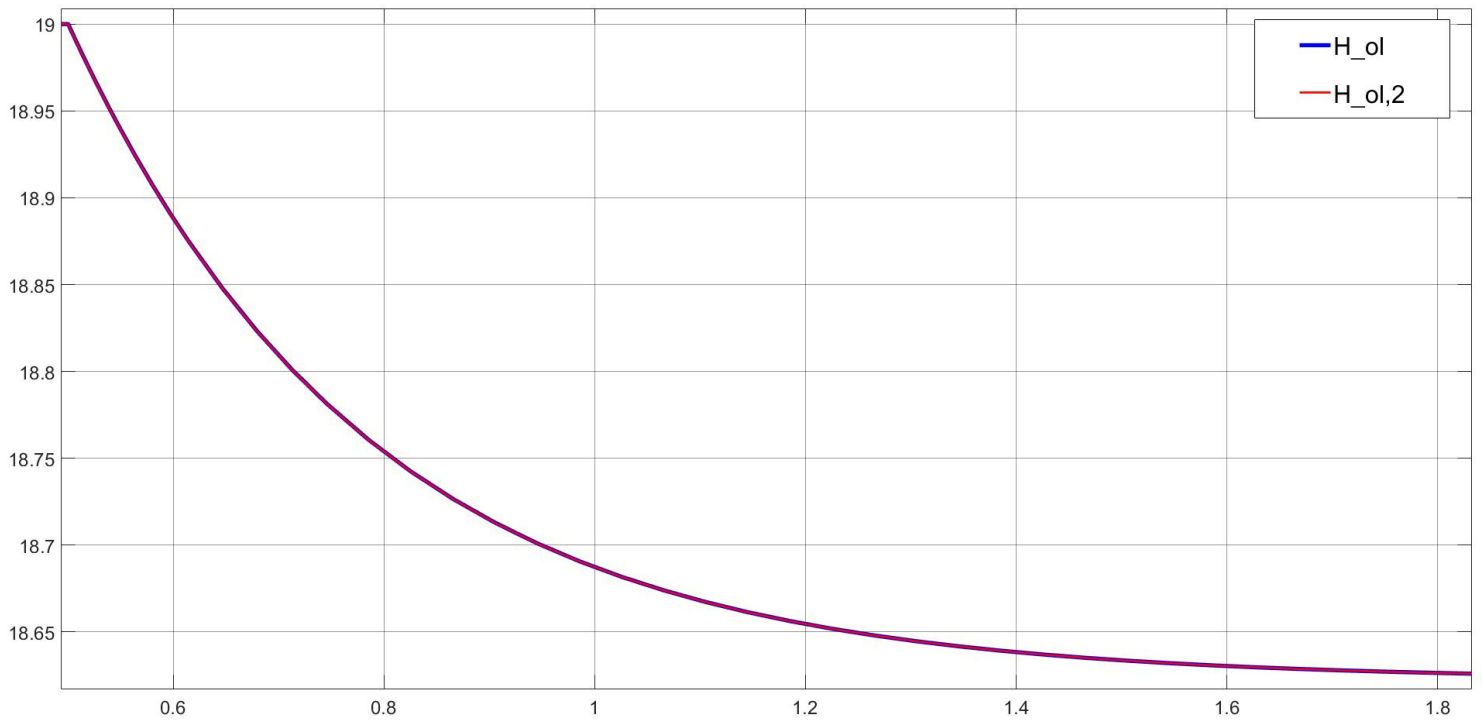
$$H_{p,2} = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \approx \frac{K}{T_1s + 1} \quad (4.74)$$

Figur 4.19 og 4.20 viser henholdsvis Simulink-fil og simulert graf som sammenligner  $H_p$  og  $H_{p,2}$ . I sistnevnte kan man såvidt se at de to grafene ligger oppå hverandre.



Figur 4.19: Skjermsnutt fra Simulink-fila *verifikasjon\_linaer\_1\_orden*





Figur 4.20: Simulering av  $H_p$  og  $H_{p,2}$ . De to kurvene ligger nesten helt oppå hverandre.

Figur 4.20 bekrefter altså at dynamikken i kjølevæska er neglisjerbar sammenlignet med ølet. Dette er en forutsetning som ble gjort i flere tidligere eksperiment, og ble da omtalt i den avsluttende diskusjonen.

## Kapittel 5

# Regulatorparametere

### 5.1 Skogestads metode

Som beskrevet på side 225 i *Praktisk reguleringssteknikk* av Finn Haugen[12], vil et førsteordens system uten tidsforsinkelse ha PID-parametere som vist i ligning 5.1 - 5.3.

$$K_p = \frac{T}{K \cdot T_C} \quad (5.1)$$

$$T_i = k_1 \cdot T_C \quad (5.2)$$

$$T_d = 0 \quad (5.3)$$

Hvor  $T_C$  er reguleringsystemets tidskonstant. Vi valgte en  $T_C = 10[\text{min}] = 600[\text{s}]$  og brukte standardvalget  $k_1 = 4$ . Ved hjelp av matlabskriptet *modellering\_1orden\_PID.m*, se tillegg B, regnet vi ut følgende parametere:

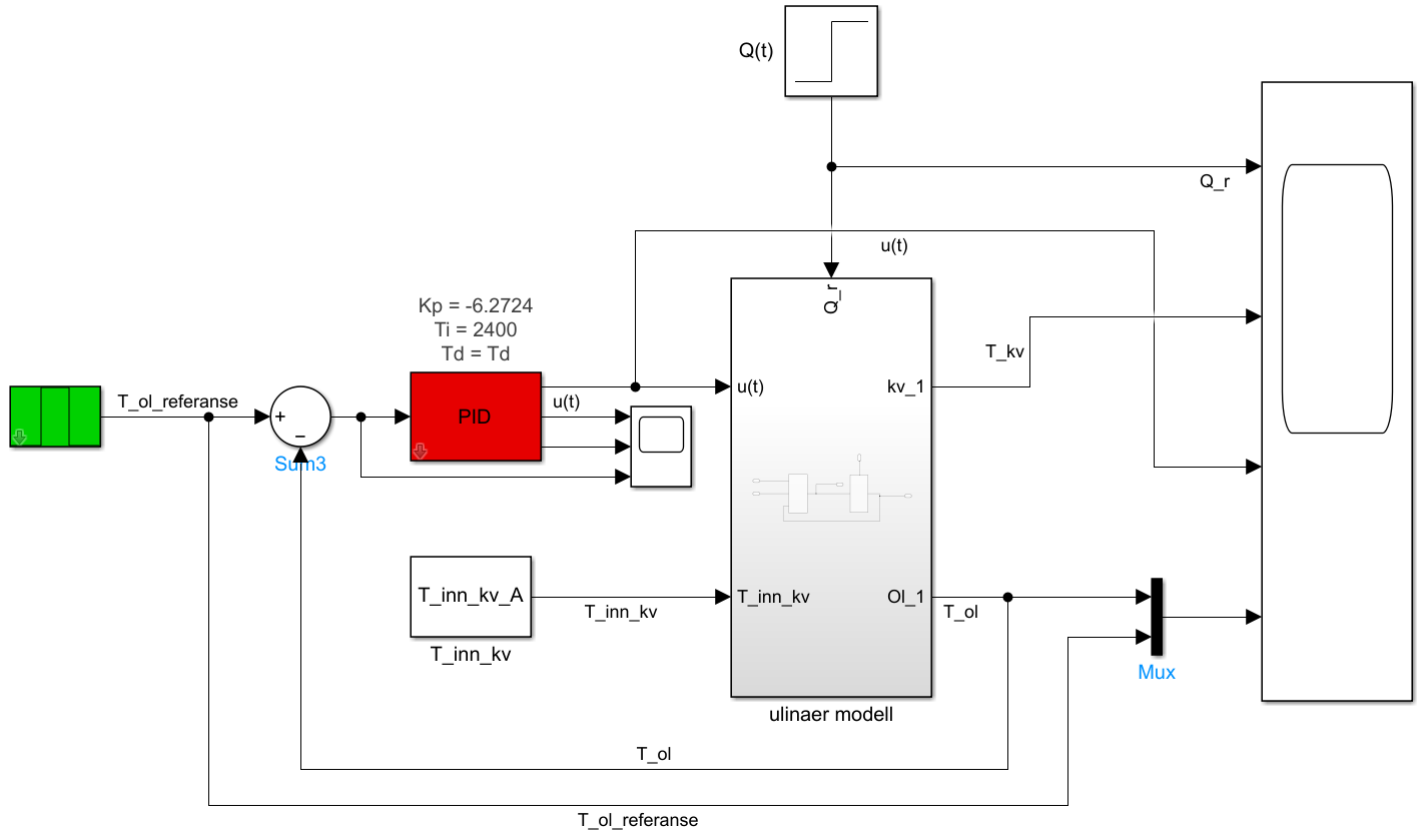
$$K_p = -6.2724 \quad (5.4)$$

$$T_i = 2400 \quad (5.5)$$

$$T_d = 0 \quad (5.6)$$

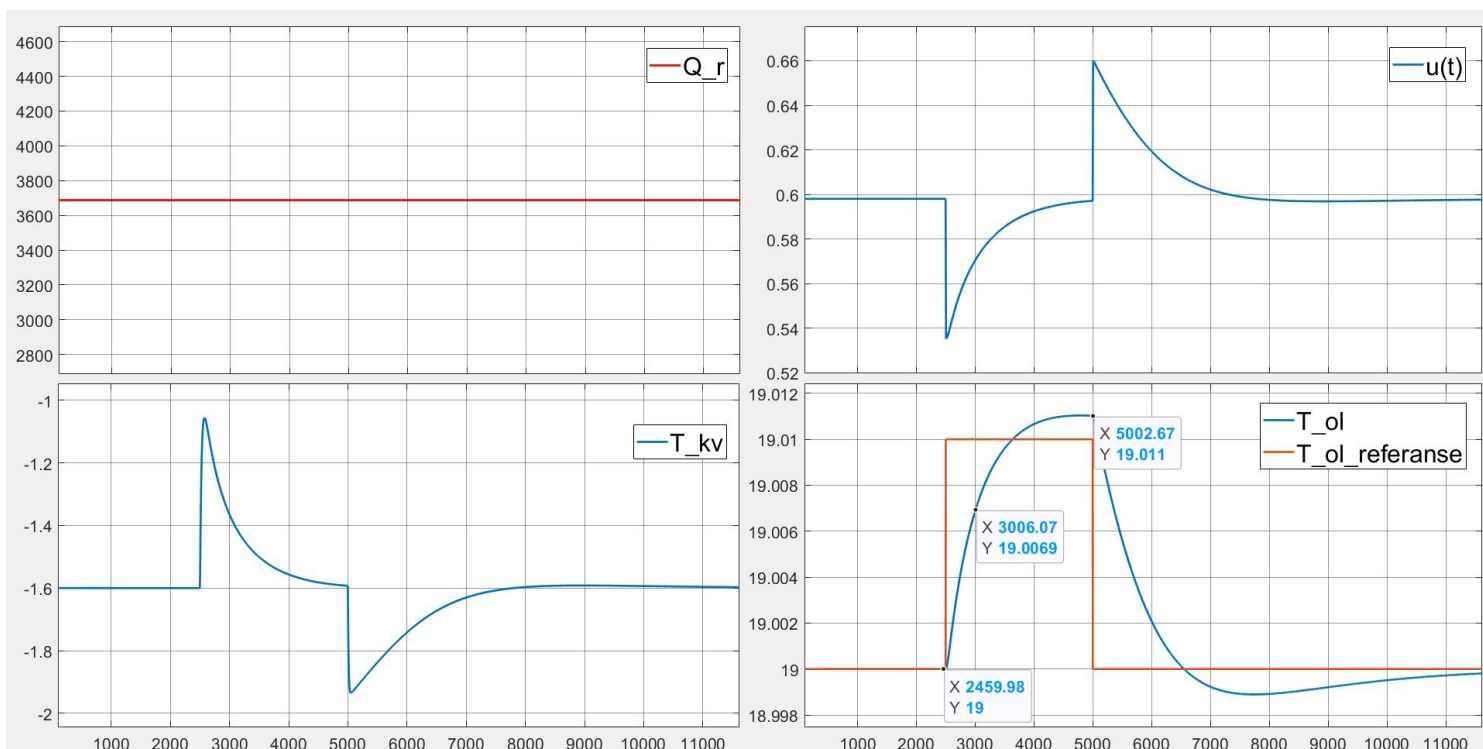
### 5.2 Simulering med regulatorparametere

Vi implementerte regulatorparameterene fra kapittel 5.1 i Simulink som vist i figur 5.1. Denne simulinkfila og tilhørende matlabskript er lagt ved i tillegg B, henholdsvis *modellering\_1orden\_PID.slx* og *verifikasjon\_1orden\_PID.m*.



Figur 5.1: Skjermsnutt av fil fra Simulink med implementert P- og I-ledd.

Inni PID-blokka er det da lagt inn en øvre og nedre grense for integratorleddet, såkalt *anti windup*, på henholdsvis 1 og 0. Det samme er gjort for summen av P- og I-leddet, ettersom aktuatorene våre ikke er i stand til å gi pådrag større enn 1 eller mindre enn 0. Som man kan se i figur 5.2 klarer denne regulatoren å svinge seg inn til riktig temperatur uten å gå i metning i verken øvre eller nedre grense. De markerte datapunktene verifiserer dessuten vår valgte  $T_C = 600$  [s] og kan fra plottet regnes ut til  $T_C \approx 546$  [s].



Figur 5.2: Simulering med PI-regulering. Markerte datapunkt for  $T_{ol}$  verifiserer valgt  $T_C$ . Oversvinget til  $T_{ol}$  svinger seg inn mot settpunkt på samme vis som det påfølgende undersvinget. For å gjøre grafene mer kompakte vises kun én av innsvingningene her.

### 5.2.1 Diskusjon og konklusjon

Som man kan se fra resultatene i figur 5.2 gjør de valgte PID-parameterene at regulatoren er i stand til å følge referanseverdiene.

Verdt å merke seg er størrelsen på verdien  $T_i = 2400$ . Et så stort I-ledd gjør at integreringen vil gå sakte, og potensielt ikke klare å henge med den virkelige forstyrrelsen. Valg av  $k_1$  vil derfor spille en viktig rolle for denne regulatoren.

På grunn av dette bør man vurdere å benytte en annen reguleringsmetode, for eksempel en ren P-regulator eller av/på-reguleringen fra kapittel 3.9, i situasjoner hvor man ønsker å hurtig kjøle ned et øl. Dette kan for eksempel være aktuelt ved *cold crash* som beskrevet i kapittel 2.3.4. Da vil man slippe den lange forsinkelsen i pådrag på grunn av treig integrering.

### 5.3 Implementering av PID-algoritme i PLS

Det er implementert en PID-regulator i PLSen, basert på Finn Haugens diskretisering av en PID-regulator i boken *Praktisk reguleringssteknikk* [12]. En PID-regulator på kontinuerlig form kan uttrykkes som:

$$u(t) = u_0 + \underbrace{K_p e(t)}_{U_p} + \underbrace{\frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) d\tau}_{U_i} + \underbrace{K_p T_D \dot{e}(t)}_{U_d} \quad (5.7)$$

Den kontinuerlige funksjonen 5.7 kan ikke direkte implementeres i en PLS, men presenteres i ligningene 5.8 - 5.10 på diskret form.

$$u_p(t_k) = K_p e(t_k) \quad (5.8)$$

$$u_i(t_k) = u_i(t_k - 1) + \frac{T_s K_p}{T_i} e(t_k) \quad (5.9)$$

$$u_d(t_k) = K_p T_d \frac{e(t_k) - e(t_k - 1)}{T_s} \quad (5.10)$$

Det totale pådraget,  $u(t_k)$ , beregnes så ved hjelp av ligning 5.11.

$$u(t_k) = u_0 + u_p(t_k) + u_i(t_k) + u_d(t_k) \quad (5.11)$$

```

1 t1_up:= T1_Kp* T1_Avvik;
2
3 % if-statement, saa den ikke fortsetter aa integrere naar ...
  modus=pid, start=0
4 IF T1_start = TRUE THEN
5     t1_ui:= t1_ui_forrige * ((Ts*T1_Kp)/T1_Ti)*T1_Avvik;
6 ELSE
7     t1_ui:= 0,0;
8     t1_ui_forrige:= 0,0;
9 END_IF;
10
11 t1_ud:= T1_Kp * T1_Td*(T1_Avvik-T1_Avvik_forrige/Ts);
12 % resulterende paadrag
13 t1_u := t1_up + t1_ui + t1_ud;
14
15 t1_ui_forrige := t1_ui;
16
17
18 % integratorbegrensning
19 IF t1_u > 100,0 THEN
20
21     t1_ui:= t1_ui_forrige + ((Ts*T1_Kp)/T1_Ti)*T1_Avvik;
22     t1_u:= t1_up+t1_ui+t1_ud;
23 ELSIF t1_u < 0,0 THEN
24
25     t1_ui:= t1_ui_forrige + ((Ts*T1_Kp)/T1_Ti)*T1_Avvik;

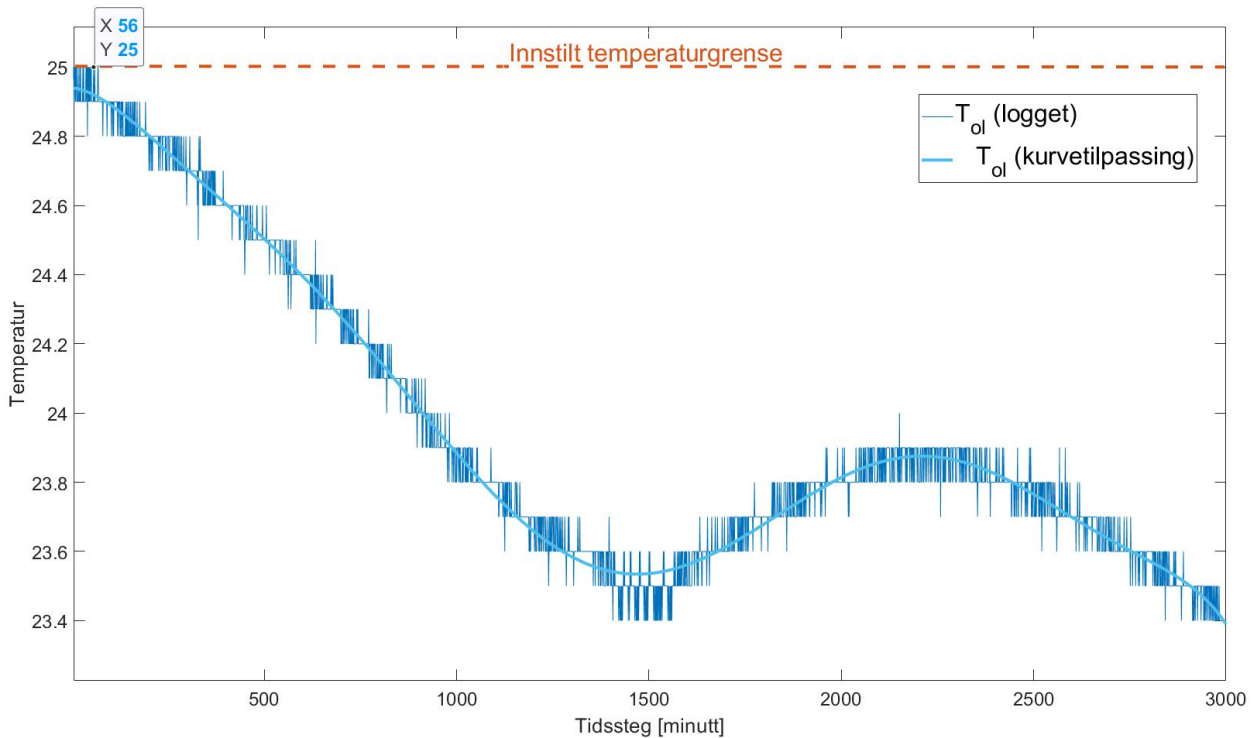
```

```
26     t1_u:= t1_up+t1_ui+t1_ud;  
27 END_IF;
```

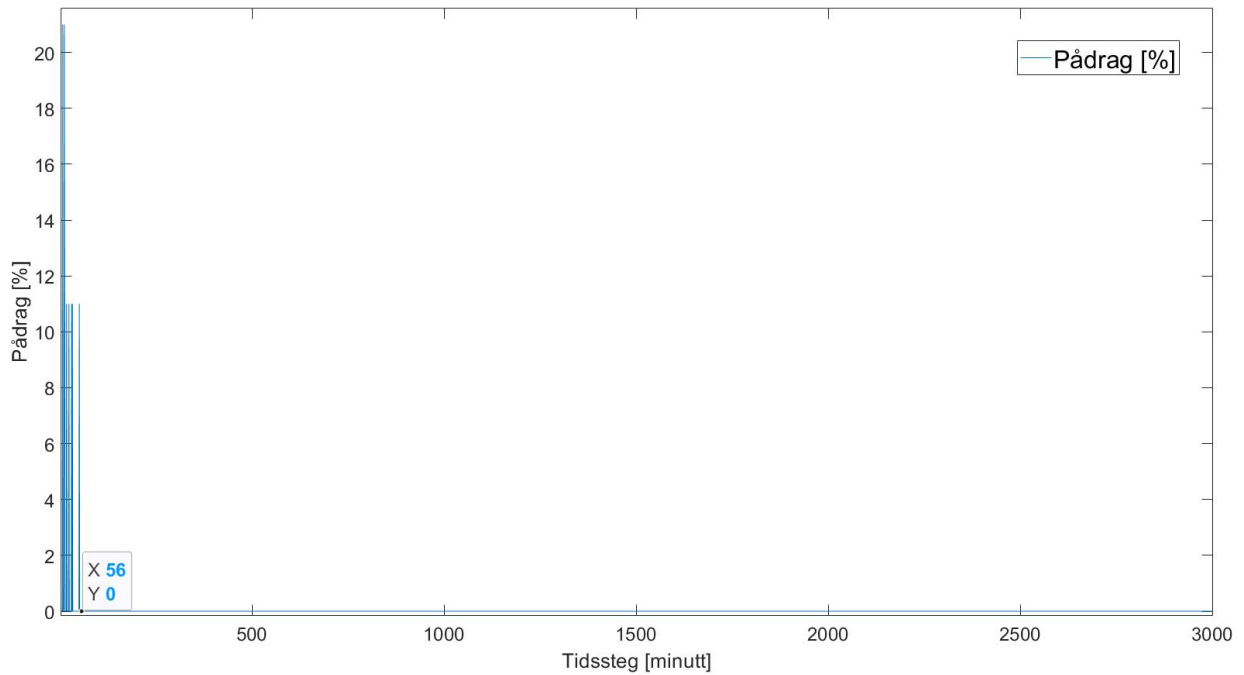
Listing 5.1: PID-regulator implementert i PLSen med integratorbegrensning

## 5.4 Verifikasjon av PI-regulator i bryggeriet med moderne tanktype

Figur 5.3 og 5.4 viser forsøket på bruk av PI-regulatoren i bryggeriet. Som man kan se i det øverste plottet er temperaturen i ølet etter tidsskritt 56 aldri over innstilt temperatur på 25°C. Til tross for at pådraget alltid er null etter nevnte tidsskritt, fortsetter temperaturen i ølet å rase nedover. Til og med etter tidsskritt 1500, når gjæren begynner å generere varme, ender øltemperaturen opp med å til slutt synke igjen. Innledningsvis konkluderte vi med at ventilen hadde fryst seg fast, men videre undersøkelser avslørte at det mest sannsynlig skyldes kavitasjon og konstant lekkasje.



Figur 5.3: Logging av øltemperatur med PI-regulator.



Figur 5.4: Logging av ventilpådrag med PI-regulator

## 5.5 Diskusjon og konklusjon

Dessverre var det slik at virkeligheten byr på uventet problematikk, og i vårt tilfellet var det en ventilsvikt som ikke lot seg fikse uten et fullstendig ventilbytte. Den praktiske verifiseringen ble derfor mislykket i dette tilfellet.

## Kapittel 6

# Avsluttende diskusjon og konklusjon

### 6.1 Diskusjon og konklusjon

Oppgaven gikk ut på å konstruere et styresystem for temperaturregulering av gjæringsprosessen ved Jåttå gårdsbryggeri AS. Løsningen vår ble å bruke reguleringsventiler til å begrense gjennomstrømmingen av kjølevæske i kjølekappene, og på det viset bestemme temperaturen i ølet. Den matematiske modellen for prosessen ble simulert og verifisert på flere stadier under utviklinga og legger dermed et godt grunnlag for regulatorparameterne, som ble funnet ved hjelp av Skogestads metode. Vi mener at resultatene som er lagt fram i denne rapporten tyder på at modellen beskriver virkelig prosess i bryggeriet på en god måte.

Til tross for at vi fikk problemer med lekkasje i ventilene ligger alt til rette for enkel og rask implementering når bryggeriet bestemmer seg for å investere i nye og velfungerende ventiler. Til tross for at det ble gjort tiltak for å avdekke årsaken til lekkasjene, ble det til slutt konkludert med at ventilene var permanent skadet av sannsynligvis kavitasjon.

En vesentlig bolk av oppgaven gikk ut på å dimensjonere, bygge og dokumentere styreskapet til reguleringsystemet. Mye av dette, spesielt dokumentasjonen, er lagt ved som tillegg til denne rapporten. Grensesnittene som ble benyttet var 0-10 V for styring av ventilregulatorene og 4-20 mA for overvåking av temperatursensorene.

Eksperimentene som ble utført i forbindelse med oppgaven har dessuten gitt bryggeriet verdifull informasjon om anlegget sitt. De har blant annet fått gode data på ventilkarakteristikk, væskeflyt, konsekvensen for kjølekapasiteten når flere tanker kjøler samtidig og tallfestet varmeoverføring mellom øl og kjølevæske. Dette er viktig informasjon for bryggeriet når de i fremtiden skal oppgradere, bytte ut eller gjøre sorvis på deler av fermenteringsanlegget.



I samarbeid med bryggeriet og deres ønsker ble det dessuten utviklet et skjermprogram for monitorering og styring av systemet. Resultatet ble både brukervennlig og funksjonelt.

# Bibliografi

- [1] Autek AS. *Temperaturkatalog*. URL: [https://autek.no/wp-content/uploads/temperaturkatalog\\_Rev2\\_22.05.19.pdf](https://autek.no/wp-content/uploads/temperaturkatalog_Rev2_22.05.19.pdf). (accessed: 14.01.2021).
- [2] iNOR AS. *Digital 2-wire transmitter for Pt100 and Pt1000 with wireless communication, APAQ C130*.  
Filnavn: transmitter\_hodemontert\_datablad\_APAQ-C130.pdf.
- [3] iNOR AS. *Digital 2-wire transmitter for Pt100 and Pt1000 with wireless communication, APAQ R130*.  
Filnavn: transmitter\_skinnemontert\_brukermanual\_APAQ\_R130\_EN.pdf.
- [4] iNOR AS. *USER INSTRUCTIONS, Programmable 2-wire Transmitter for Pt100 and Pt1000 Input, APAQ R130*.  
Filnavn: transmitter\_skinnemontert\_brukermanual\_-\_APAQ\_R130\_EN.pdf.
- [5] Omron AS. *HMI NS5 produktside*. URL: <https://industrial.omron.eu/en/products/NS5-SQ11B-V2#datasheet>. (accessed: 14.01.2021).
- [6] Tac AS. *Ställdon för mindre ventiler*.  
Filnavn: ventilaktuator\_M52L\_EM52L\_Stalldon\_for\_mindre\_ventiler\_[SV]\_000302263.pdf.
- [7] Tac AS. *V354*.  
Filnavn: ventil\_v354\_datablad.pdf.
- [8] Christopher Boulton. *Encyclopaedia of Brewing*. Hoboken: John Wiley Sons, Incorporated, 2013. ISBN: 9781118598115.
- [9] Ray Daniels. *Designing Great Beers*. Brewers Publications, 2018. ISBN: 9780984075614.
- [10] Michael P Doyle og Larry R. Beuchat. *Food Microbiology - Fundamentals and Frontiers*. Third edition. ASM Press, 2007. ISBN: 9781555814076.
- [11] Finn Haugen. *Dynamiske systemer*. 3. utgave. Tapir forlag, 2012. ISBN: 978-82-519-2260-9.
- [12] Finn Haugen. *Praktisk reguleringsteknikk*. 2. utgave. Tapir forlag, 2009. ISBN: 978-82-519-1887-9.
- [13] ST Microelectronics. *L7815CV*.  
Filnavn: spenningsregulator\_L7815C\_datasheet.pdf.
- [14] Odd Arild Olsen. *Instrumenteringsteknikk*. Tapir forlag, 1992. ISBN: 8251909260.
- [15] John Palmer. *How to brew*. 4th edition. Brewers Publications, 2017. ISBN: 9781938469350.

- [16] Frank Scheer. *Thermal Process Engineering for Brewers*. URL: <https://www.mbaa.com/districts/NorthernCalifornia/Documents/2014%5C%20Joint%5C%20Technical%5C%20Conference%203-3%5C%20F%5C%20Scheer%5C%20Thermodynamics%5C%20for%5C%20Brewers.pdf>. (accessed: 23.02.2021).
- [17] Univar. *Dowcal 200*.  
Filnavn: Glykol\_kjølevæske\_Dowcal+200+Brosjyre+SE\_20131024\_130758.pdf.

## Tillegg A

# Alle datablad

Filarkivet **Alle\_datablad.rar** ([lenke](#)) inneholder alle relevante datablad for utstyr brukt i denne oppgaven.

.

### Filnavn:

forsyning\_SPD240W.pdf  
forsyning\_tr60.pdf  
Glykol\_kjølevæske\_Dowcal+200+Brosjyre+SE\_20131024\_130758.pdf  
HMI\_ns\_series\_hmi\_datasheet\_en.pdf  
kabling\_anlegg\_LiYCY.pdf  
kabling\_anlegg\_LiYCY\_2\_x\_0\_50.pdf  
kabling\_internt\_FDVDok\_1002500+(2).pdf  
Kapsling\_veggskap\_Spacial\_NSYS3D6525P\_document.pdf  
koblingsboks\_T160.pdf  
nippel\_Trelleborg.pdf  
PLS\_analogkort\_MAD42\_fdv\_CSM\_CJ1W-AD\_DA\_MAD\_DS\_E\_4\_1.pdf  
PLS\_digitalkort\_OD212\_fdv\_CSM\_CJ1W-OUTPUT\_DS\_E\_8\_1.pdf  
rekkeklemmer\_fdv.pdf  
sensor\_innsats\_autetek\_temperaturkatalog\_Rev2\_22.05.19.pdf  
sensor\_overflate\_datablad\_MG20D-OV14-001550S-1ABB-BUTTERFLY.pdf  
spenningsregulator\_L7815C\_datasheet.pdf  
svitsj\_TL-SG105-108.pdf  
transmitter\_hodemontert\_datablad\_APAQ-C130.pdf  
transmitter\_skinne monterert Brukermanual\_-\_APAQ\_R130\_EN.pdf  
transmitter\_skinne monterert\_datablad\_-\_APAQ\_R130\_EN.pdf  
ventil\_v354\_datablad.pdf  
ventilaktuator\_M52L\_EM52L\_Stalldon\_for\_mindre\_ventiler\_[SV]\_000302263.pdf  
ventilaktuator\_m-em52bruksanv.pdf  
Ventiler\_v354\_Oversikt\_[SV]\_000310542.pdf  
vern\_Acti\_9\_A9F06210\_document.pdf

## Tillegg B

# Programfiler

Filarkivet **Programfiler.rar** ([lenke](#)) inneholder alle programfiler tilknyttet denne oppgaven. Filene er fra programmene CX-Programmer, CX-Designer og Matlab 2019b.

.

**Filnavn:**

Jaattaa\_styreprogram.cxp

Jaattaa\_hmi.IPP

**Implementering og simulering av ulineær modell:**

modellering\_implementering\_ulinaer.m

implementering\_ulinaer.slx

**Lineær modell; tilstandsrom, verifikasjon og forenkling til førsteorden:**

tilstandsrommodell.m

modellering\_verifikasjon\_linaer.m

verifikasjon\_linaer\_mot\_ulinaer.slx

verifikasjon\_linaer\_1\_orden.slx

## Tillegg C

# Utstyrsdeler i styreskap

I dette vedlegget finner man mer utdypende informasjon om de forskjellige utstyrsdelene som inngår i styreskapet.

### C.1 Kapsling

Produksjonssonen i bryggeriet er en sone hvor utstyr utsettes for både vannskvetting, damp og høy luftfuktighet. Kapslingen vi valgte har derfor en IP-grad på 66. I henhold til NEK-400 betyr IP66 at kapslingen er både støvtett og tåler kraftig spyling fra alle kanter. Utskjæring til HMI i skapdøra er derfor fuget igjen for å bevare tettheten i tillegg til at alle kabler er ført inn i skapet via tette gumminipler. Skapet er 600 mm høyt og 50 mm bredt og er dermed romslig nok til alt utstyret samtidig som det er plass til eventuelle utvidelser i framtida.

#### Produktdatablad Karakteristikker

#### NSYS3D6525P Veggskap m/plate 60x50x25



#### Teknisk informasjon

Serie	Spacial
Produktnavn	Spacial S3D
Application	Multi-purpose
Category	Kompakt kabinett
Kabinett nominell høyde	600 mm
Kabinett nominell bredde	500 mm
Kapslingsdybde	250 mm
Porttype	Flat
Monteringsplate beskrivelse	Flat

Figur C.1: Kapsling til styreskap. Kapslingen ble levert av Schneider Electric.

## C.2 Strømforsyning 24VDC

DC-forsyningen er fra den italienske produsenten Carlo Gavazzi og leveres i Norge av Onninen AS. Den er internt sikret mot overspenning og kortslutning og har et justeringshjul for fininnstilling av ut-spenningen. Den kan levere opp til 10 A og har dermed mulighet for å forsyne framtidige utvidelser av systemet.

### Switching Power Supply Type SPD 240W DIN rail mounting



- Universal AC input full range
- Installation on DIN rail 7.5 or 15mm
- Short circuit protection
- PFC as standard
- High efficiency
- Power ready output
- LED indicator for DC power ON
- LED indicator for DC low
- Parallel connection feature
- Compact dimensions
- UL, cUL listed and TUV/CE approved



Figur C.2: 24 VDC forsyning. Bildet er hentet fra forsyningens datablad.

## C.3 Strømforsyning 24 VAC

Reguleringsventilene i krever 24 V vekselspanning til drift av motorene. Denne forsyninga har kapasitet opp til 60 W på sekundærsida og kan dermed drifte opp til 20 av bryggeriets reguleringsventiler som hver krever 3 W.

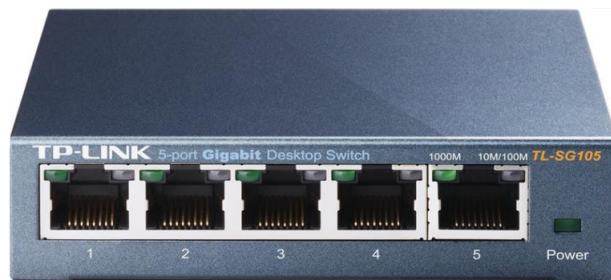


Figur C.3: Forsyning av 24 V vekselspanning

## C.4 Svitsj

Svitsjen er av merket TP-link og har blitt handlet inn fra en lokal elektronikkbutikk. Den fungerer som knutepunkt for datakommunikasjon mellom PLS, HMI og

eventuelle andre eksterne perifermøduler bryggeriet ønsker å koble til i framtida.



Figur C.4: Svitsj

## C.5 Vern

Automatsikring på 10 A for beskyttelse av styreskap og utstyr. Automatsikringen har ikke jordfeilvern da kursen fra hovedtavla allerede har jordfeilbeskyttelse.



### Teknisk informasjon

Applikasjon	Distribusjon
Serie	Acti 9
Produktnavn	Acti 9 iC60
Produkt eller type komponent	Miniatyr sikring
Kortnavn utstyr	IC60H
Antall poler	2P
Antall poler med vern	2
[In] merkestrøm	10 A
Type nettverk	AC DC
Verteknologi	Termisk-magnetisk

Figur C.5

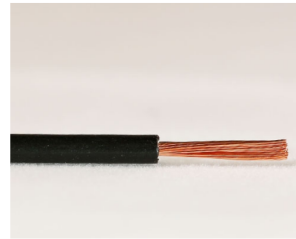
## C.6 Kabling

Styreskapet er kablet internt med en mangetrådet ledningstype med tverrsnitt 0,75 mm<sup>2</sup>. Det er benyttet sort farge for negativ polaritet og rød farge for positiv polaritet.



**H05 V-K 0,75 mm<sup>2</sup> Sort 100m**  
**El.nr. 1002500**

CPR Klasse	Eca
Farge	Sort
Høyde/dia (mm)	2.70
Tverrsnitt	0,75 mm <sup>2</sup>
Vekt (g)	10.50



Figur C.6: Intern kabling for styreskap

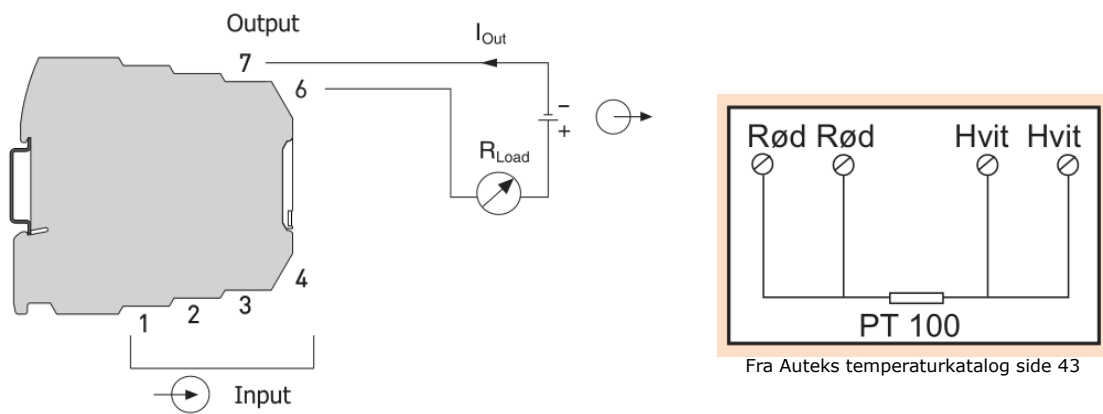
Kabling ut til sensorer og reguleringsventiler er av typen LiYCY, som er en populær kabel i prosessindustrien for signaler. Kabelen er skjermet og har en isolasjon som er egnet for bruk i områder med høy fuktighet og tilstedeværelse av både vann, kjemikalier og olje.



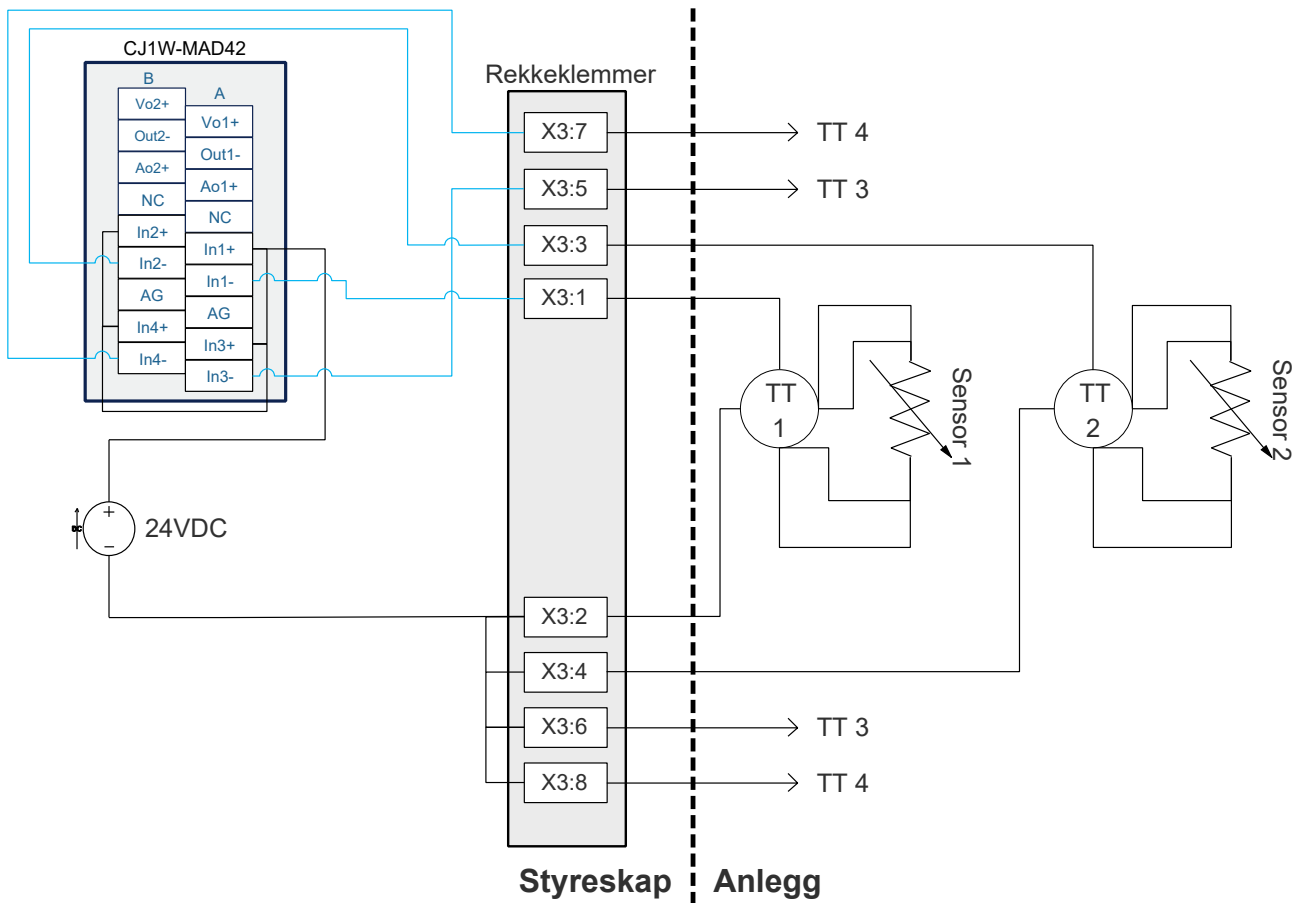
Figur C.7: Kabling for eksterne enheter utenfor styreskap.

# Tillegg D

## Koblingsskjema

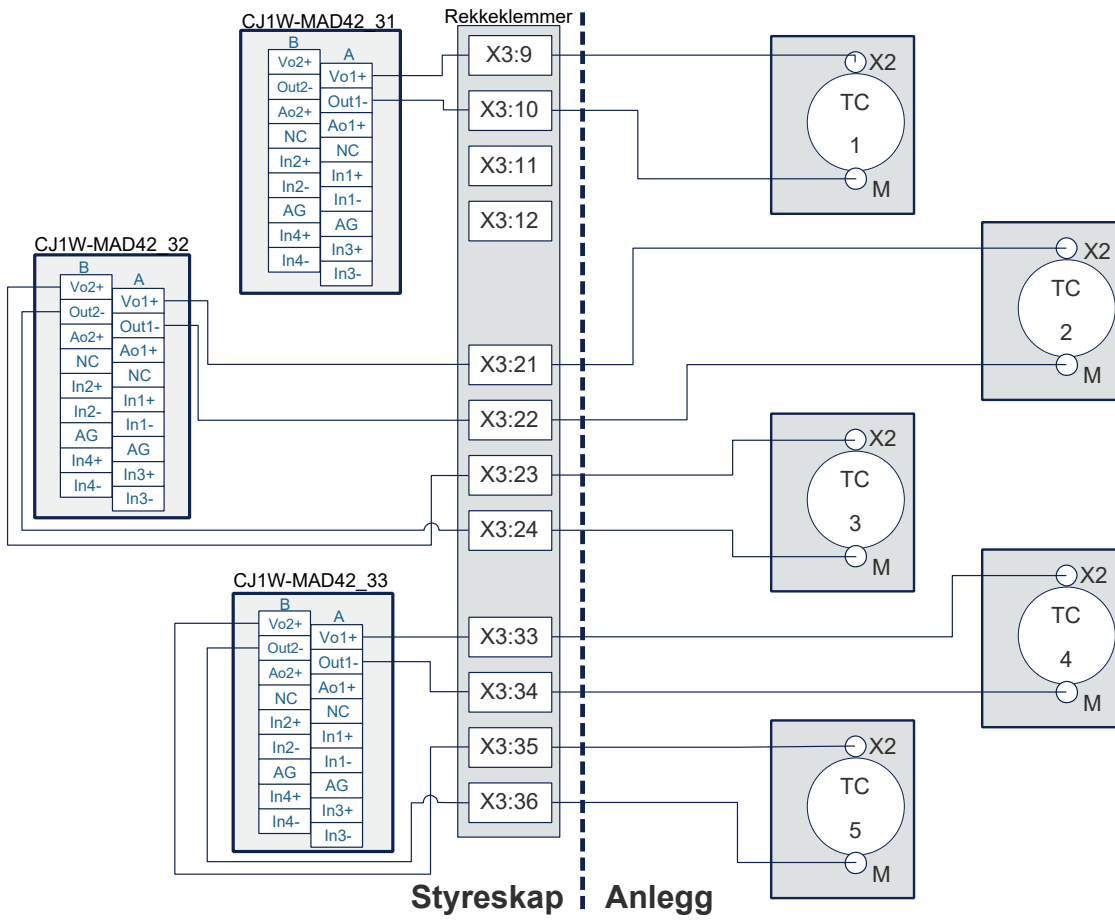


Figur D.1: Oppkobling av transmitter. Hentet fra transmitters bruksanvisning [4], samt Auteks temperaturkatalog [1].

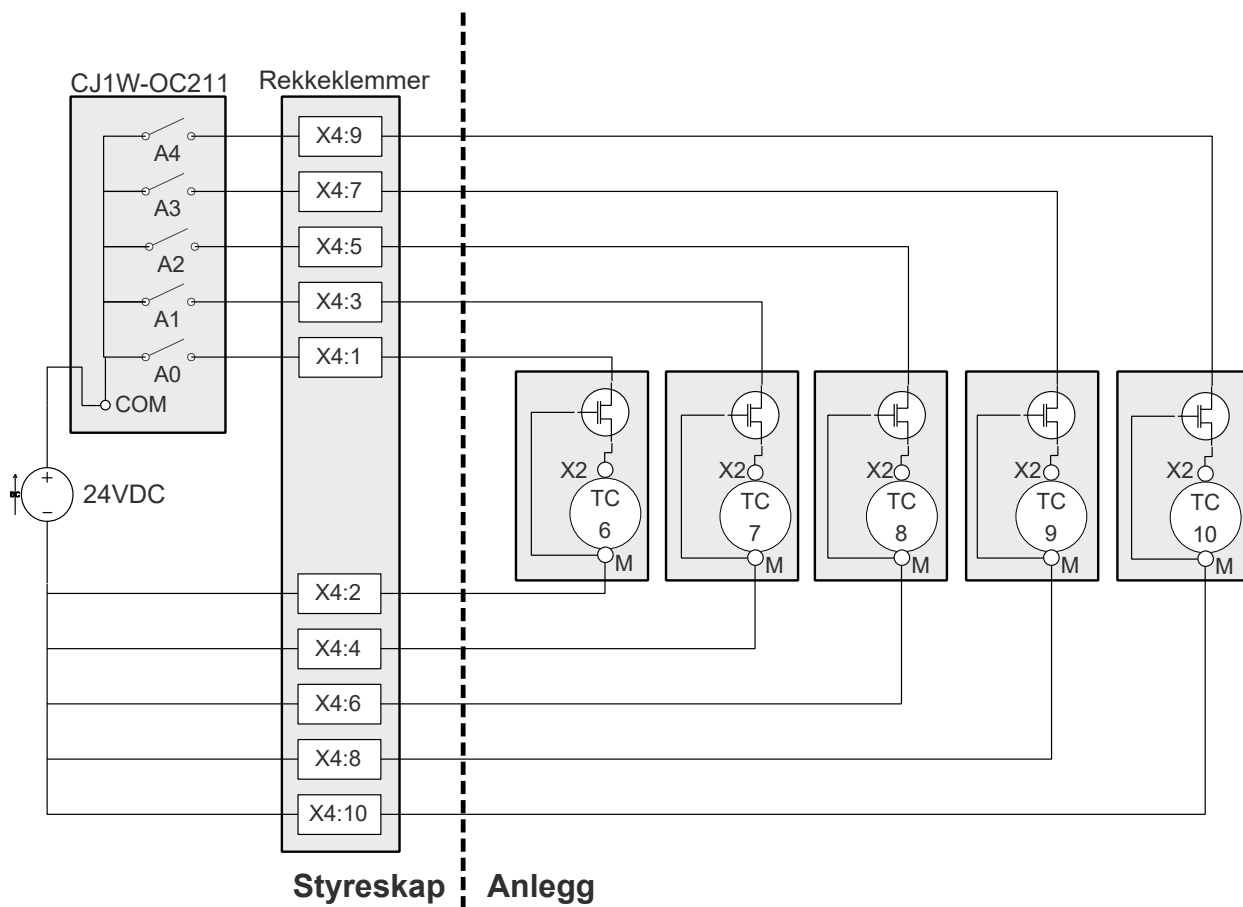


Figur D.2: Kablingsskjema over analoge innganger (MAD42), transmittere og sensorer.

Figur D.3 viser oppkobling av reguleringsventilene for gjæringstank én til fem mot de analoge inngangene. Merk at Vo2+ på MAD42.31 er ledig ettersom denne inngangen er defekt på kortet. Utgangene til MAD42 er *aktive*, det vil med andre ord si at man ikke trenger å forsyne denne kretsen med ekstern strømforsyning.

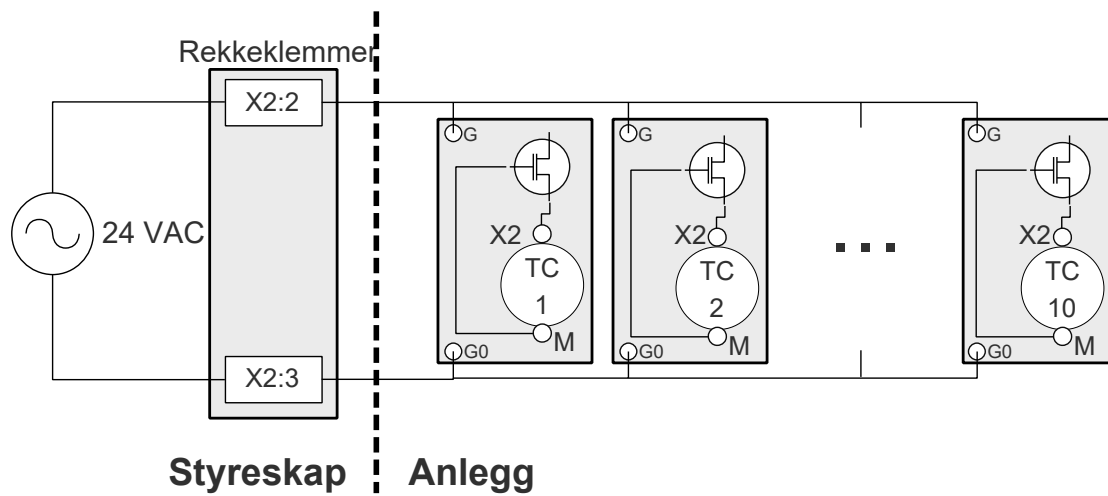


Figur D.3: Kablingsskjema over analoge utganger (MAD42) og aktuatorer.



Figur D.4: Kablingsskjema over digitale utganger (OC211) og aktuatorer.

Figur D.5 viser oppkobling av driftspenningen for aktuatorene. Disse krever 24 V vekselspenning og har, som nevnt i seksjon C.3, egen forsyning for dette. For å unngå AC-støy har vi lagt disse kablene med god avstand til andre styrekabler på kabelbanen i bryggeriet.



Figur D.5: Koblingsskjema over AC-forsyning til aktuatorer.

## Tillegg E

# Rekkeklemmetabell for styreskap

### E.1 Rekkeklemmetabell: Anlegg - internt

Anlegg <i>Utstyr</i>	Anlegg <i>Koblingsboks</i>	Rekkeklemme <i>styreskap</i>	Internt <i>styreskap</i>	Intert <i>styreskap</i>
Sensor 1+	T1	X3:1	MAD42.31.A6 <sub>In1-</sub>	
Sensor 1-	TT2	X3:2	X1:2	SPD24240 -
Sensor 2+	TT2	X3:3	MAD42.31.B6 <sub>In2-</sub>	-
Sensor 2-	TT2	X3:4	X1:2	SPD24240 -
Sensor 3+	TT3	X3:5	MAD42.31.A9 <sub>in3-</sub>	
Sensor 3-	TT3	X3:6	X1:2	SPD24240 -
Sensor 4+	TT4	X3:7	MAD42.31.B9 <sub>in4-</sub>	-
Sensor 4-	TT4	X3:8	X1:2	SPD24240 -
Aktuator 1-X2	TC1	X3:9	MAD42.31.A1 <sub>Vo1+</sub>	
Aktuator 1-M	TC1	X3:10	MAD42.31.A2 <sub>Out1-</sub>	
-	-	X3:11	MAD42.31.B1 <sub>Vo2+</sub>	
-	-	X3:12	MAD42.31.B2 <sub>Out2-</sub>	
Sensor 5+	TT5	X3:13	MAD42.32.A6 <sub>in1-</sub>	-
Sensor 5-	TT5	X3:14	X1:2	SPD24240 -
Sensor 6+	TT6	X3:15	MAD42.32.B6 <sub>in2-</sub>	
Sensor 6-	TT6	X3:16	X1:2	SPD24240 -
Sensor 7+	TT7	X3:17	MAD42.32.A9 <sub>in3-</sub>	-
Sensor 7-	TT7	X3:18	X1:2	SPD24240 -
Sensor 8+	TT8	X3:19	MAD42.32.B9 <sub>in4-</sub>	-
Sensor 8-	TT8	X3:20	X1:2	SPD24240 -

Tabell E.1: Rekkeklemmetabell: en oversikt over hvordan utstyrsdeler er koblet i anlegg og i styreskap. Hver rad følger ledningene koblingspunkt for koblingspunkt bakover i systemet.

<b>Anlegg</b> <i>Utstyr</i>	<b>Anlegg</b> <i>Koblingsboks</i>	<b>Rekkeklemme</b> <i>styreskap</i>	<b>Internt</b> <i>styreskap</i>	<b>Intert</b> <i>styreskap</i>
Aktuator 2-X2	TC2	X3:21	MAD42.32.A1 <sub>Vo1+</sub>	
Aktuator 2-M	TC2	X3:22	MAD42.32.A2 <sub>Out1-</sub>	
Aktuator 3-X2	TC3	X3:23	MAD42.32.A1 <sub>Vo2+</sub>	
Aktuator 3-M	TC3	X3:24	MAD42.32.A2 <sub>Out2-</sub>	
Sensor 9+	TT9	X3:25	MAD42.33.A6 <sub>in1-</sub>	-
Sensor 9-	TT9	X3:26	X1:2	SPD24240 -
Sensor 10+	TT10	X3:27	MAD42.33.B6 <sub>in2-</sub>	
Sensor 10-	TT10	X3:28	X1:2	SPD24240 -
Sensor 11+	ikke montert	X3:29	MAD42.33.A9 <sub>in3-</sub>	-
Sensor 11-	ikke montert	X3:30	X1:2	SPD24240 -
Sensor 12+	ikke montert	X3:31	MAD42.33.B9 <sub>in4-</sub>	-
Sensor 12-	ikke montert	X3:32	X1:2	SPD24240 -
Aktuator 4-X2	TC4	X3:33	MAD42.33.A1 <sub>Vo1+</sub>	
Aktuator 4-M	TC4	X3:34	MAD42.33.A2 <sub>Out1-</sub>	
Aktuator 5-X2	TC5	X3:35	MAD42.33.A1 <sub>Vo2+</sub>	
Aktuator 5-M	TC5	X3:36	MAD42.33.A2 <sub>Out2-</sub>	
Aktuator 6-X2	TC6	X4:1	OC211.A0 <sub>Out0</sub>	
Aktuator 6-M	TC6	X4:2	X1:6	SPD24240 -
Aktuator 7-X2	TC7	X4:3	OC211.A1 <sub>Out1</sub>	
Aktuator 7-M	TC7	X4:4	X1:6	SPD24240 -
Aktuator 8-X2	TC8	X4:5	OC211.A2 <sub>Out2</sub>	
Aktuator 8-M	TC8	X4:6	X1:6	SPD24240 -
Aktuator 9-X2	TC9	X4:7	OC211.A3 <sub>Out3</sub>	
Aktuator 9-M	TC9	X4:8	X1:6	SPD24240 -
Aktuator 10-X2	TC10	X4:9	OC211.A4 <sub>Out4</sub>	
Aktuator 10-M	TC10	X4:10	X1:6	SPD24240 -
Aktuator(alle) G	PS.24VAC	X2:2	tac 24VAC/230VAC	
Aktuator(alle) G0	PS.24VAC	X2:3	tac 24VAC/230VAC	

Tabell E.2: Fortsettelse av tabell.



## E.2 Interntabell: styrestrøm

Utstyrsdel	fra	videre fra
MAD42.31.A5(In1+)	X1:1	SPD24240 +
MAD42.31.B5(In2+)	X1:1	SPD24240 +
MAD42.31.A9(In3+)	X1:1	SPD24240 +
MAD42.31.B9(In4+)	X1:1	SPD24240 +
MAD42.32.A5(In1+)	X1:1	SPD24240 +
MAD42.32.B5(In2+)	X1:1	SPD24240 +
MAD42.32.A9(In3+)	X1:1	SPD24240 +
MAD42.32.B9(In4+)	X1:1	SPD24240 +
MAD42.33.A5(In1+)	X1:1	SPD24240 +
MAD42.33.B5(In2+)	X1:1	SPD24240 +
MAD42.33.A9(In3+)	X1:1	SPD24240 +
MAD42.33.B9(In4+)	X1:1	SPD24240 +
HMI: NS5-SQ11B-V2 +	X1:3	SPD24240 +
HMI: NS5-SQ11B-V2 -	X1:4	SPD24240 -
OC211.COM	X1:5	SPD24240 +

Tabell E.3: Interntabell: oversikt over hvordan styrestrømmen er koblet internt i styreskapet.

## E.3 Interntabell: hovedstrøm

Utstyrsdel	fra	videre fra	videre fra
SPD24240 L	X0:4	F1:1	hovedtavle kurs
SPD24240 N	X0:9	F1:2	hovedtavle kurs
tac 230VAC/24VAC L	X0:5	F1:1	hovedtavle kurs
tac 230VAC/24VAC N	X0:10	F1:2	hovedtavle kurs
PA202 L	X0:6	F1:1	hovedtavle kurs
PA202 N	X0:11	F1:2	hovedtavle kurs
Stikk 1 L	Stikk 2 L	F2:1	hovedtavle kurs
Stikk 1 N	Stikk 2 N	F2:2	Hovedtavle kurs

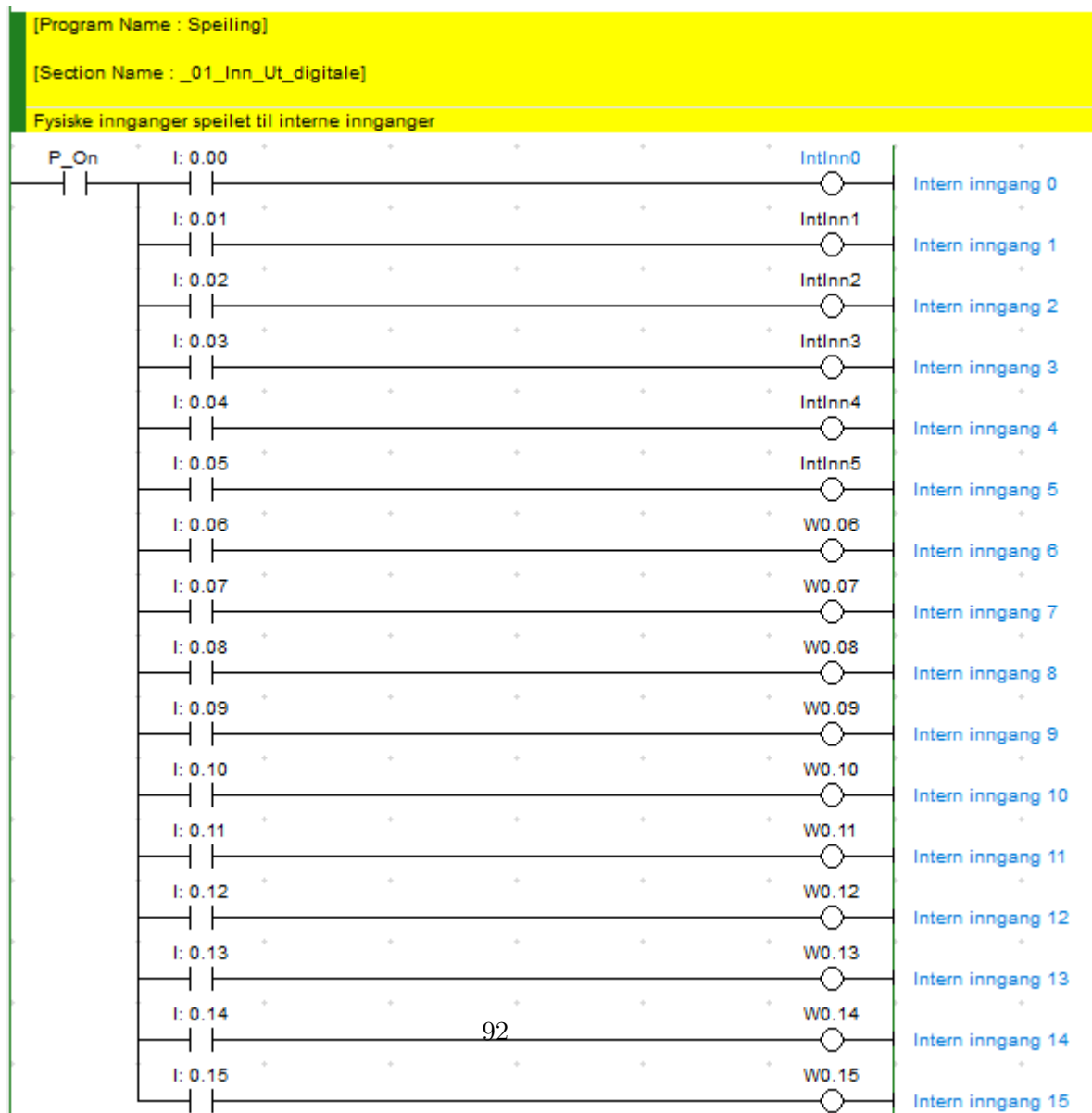
Tabell E.4: Interntabell: oversikt over hvordan hovedstrømmen er koblet internt i styreskapet.



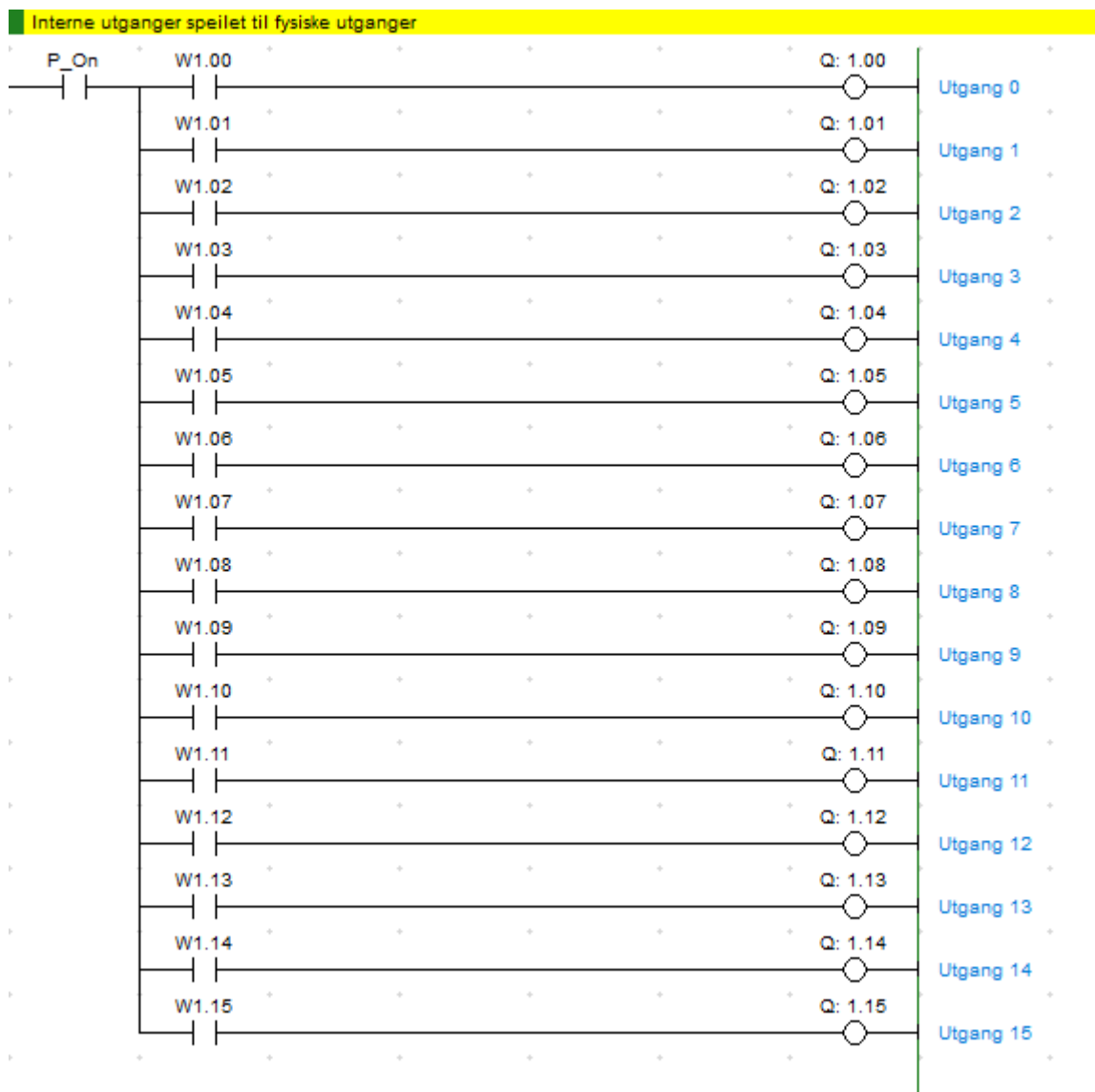
## Tillegg F

# Initialisering av PLS

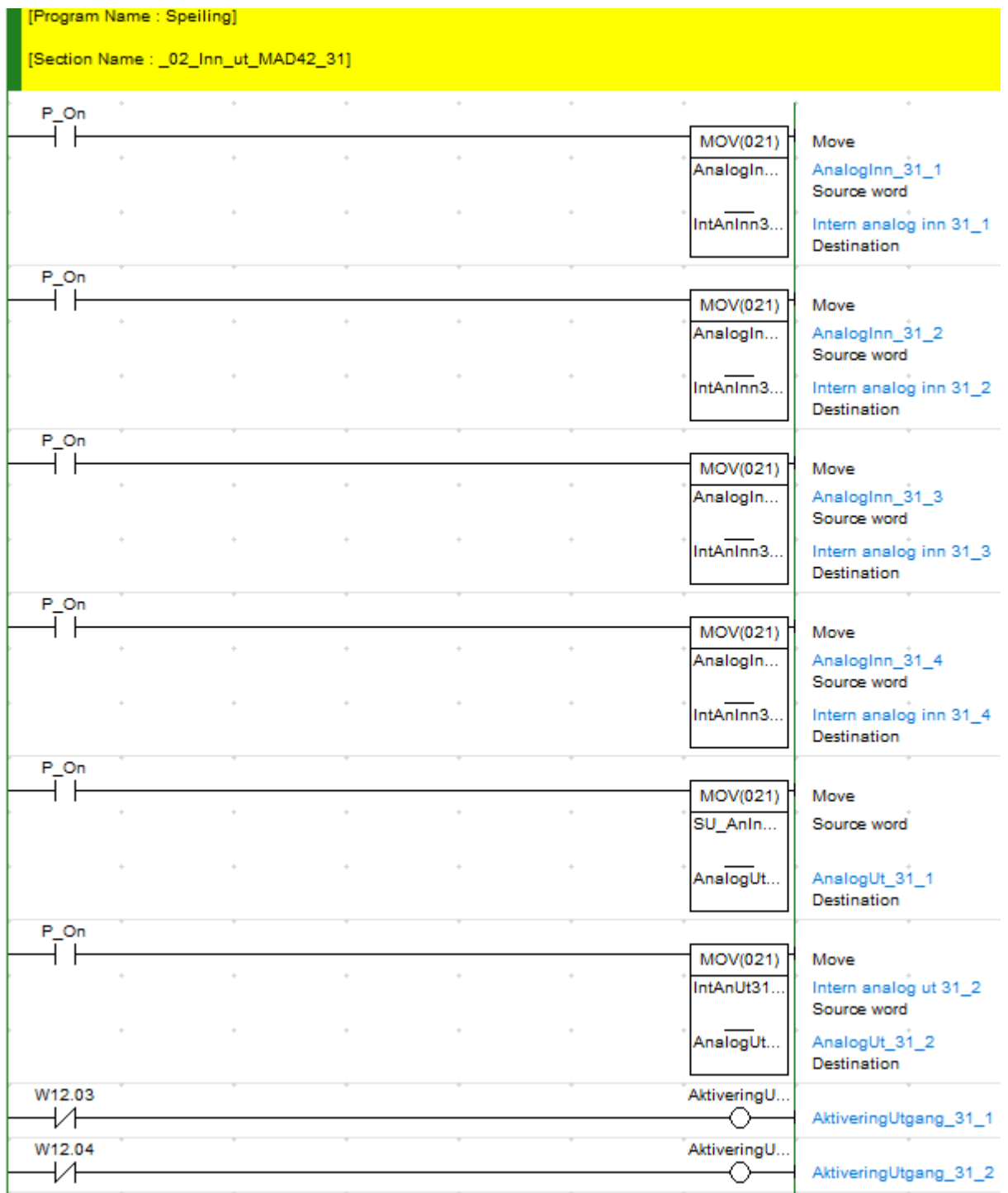
### F.1 Speiling og initialisering av inn-/utganger



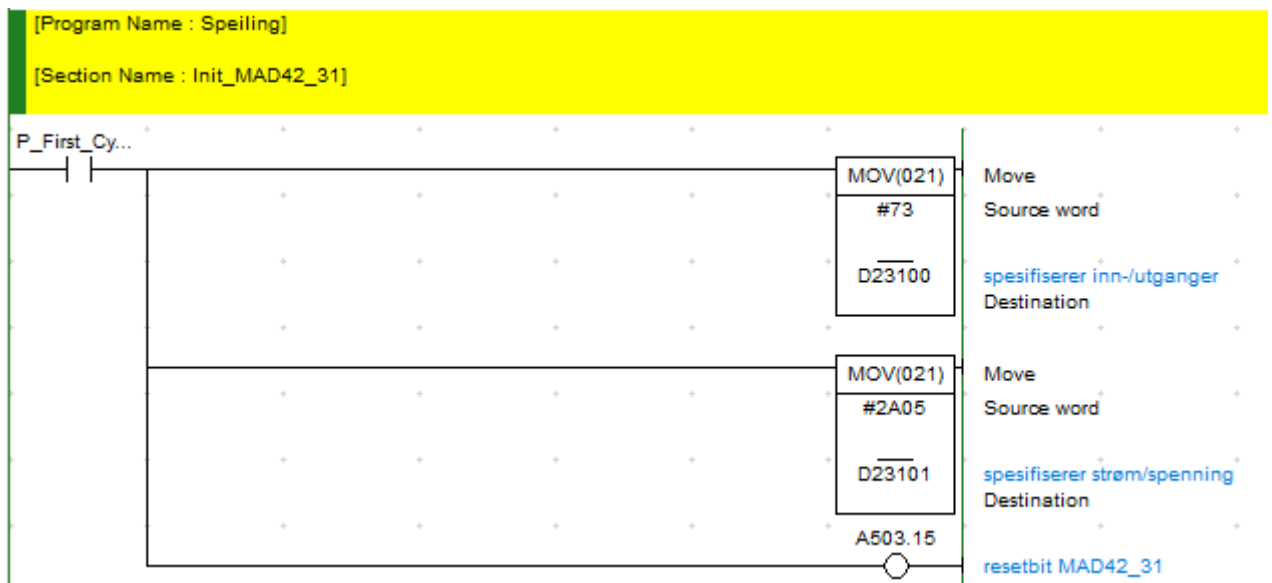
Figur F.1: Speiling av digitale inngangssignaler



Figur F.2: Speiling av digitale utgangssignaler

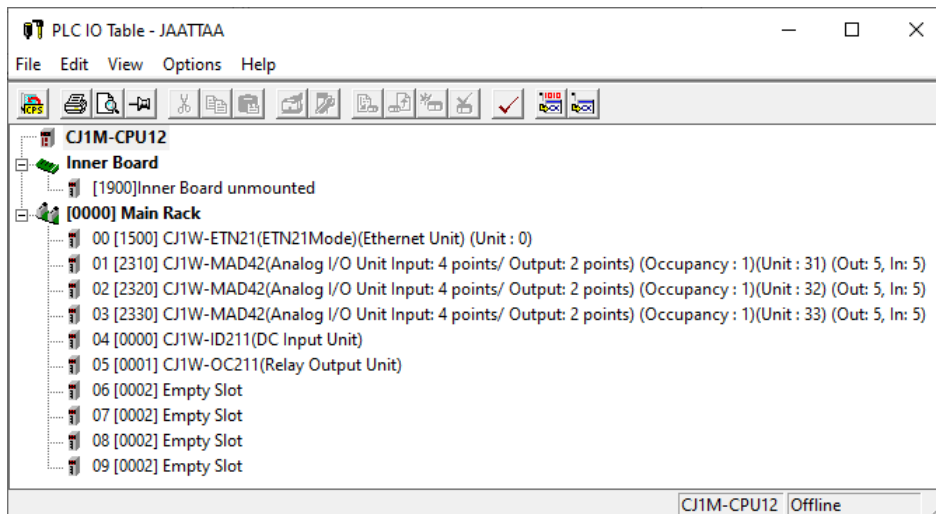


Figur F.3: Spelling av analoge inn- og utgangssignaler

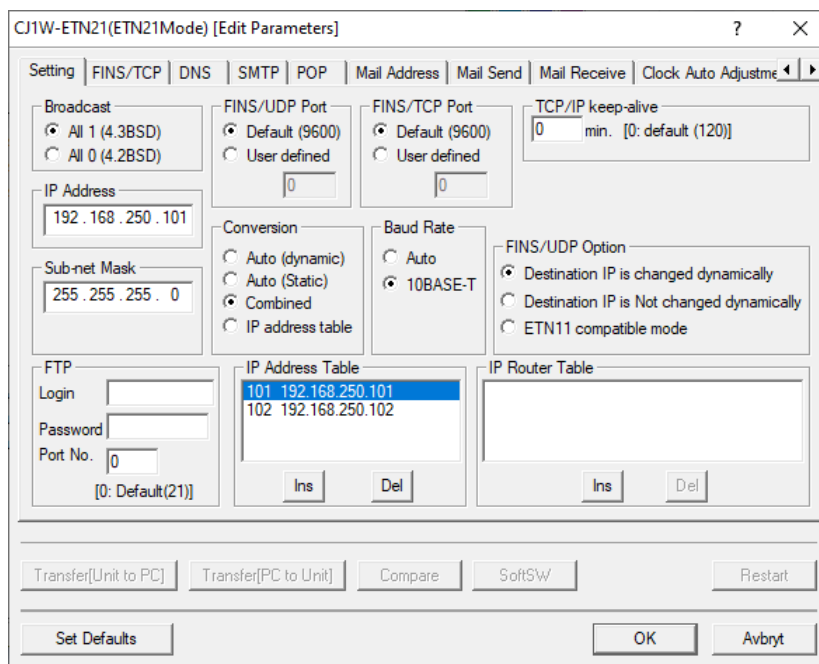


Figur F.4: Initialisering av hvilke inn- og utganger som skal brukes. Spesifisering av type signal - strøm/spenning, 1-5 V/0-10 V/4-20 mA.

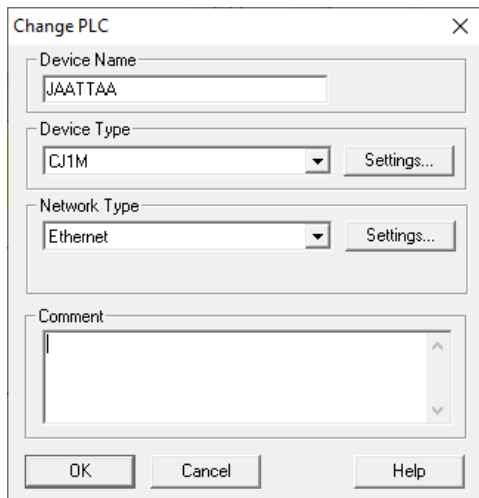
## F.2 PLSens tilkoblingsoppsett



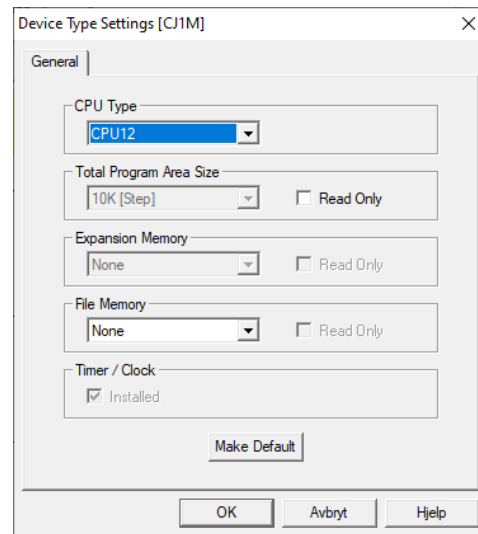
Figur F.5: PLSens IO-tabell.



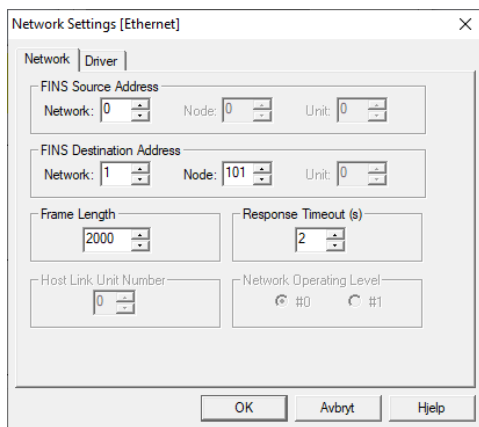
Figur F.6: Nettverksmodulens tilkoblingsoppsett. Her blir PLSens ip-adresse satt.



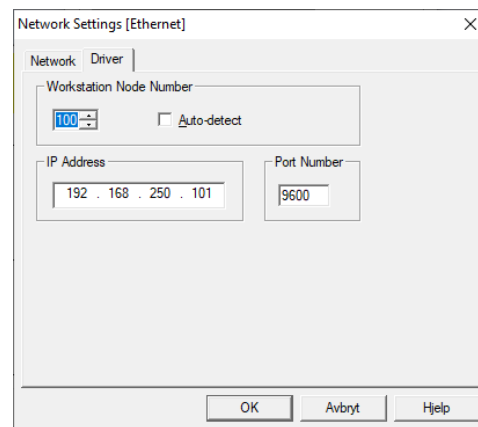
(a) Oversikt over type PLS og hvilken nettverksstandard som er i bruk.



(b) Spesifiserer hvilken CPU type PLS-enheten har.



(c) Spesifiserer aktuelt nivå og PLSens node-nummer.

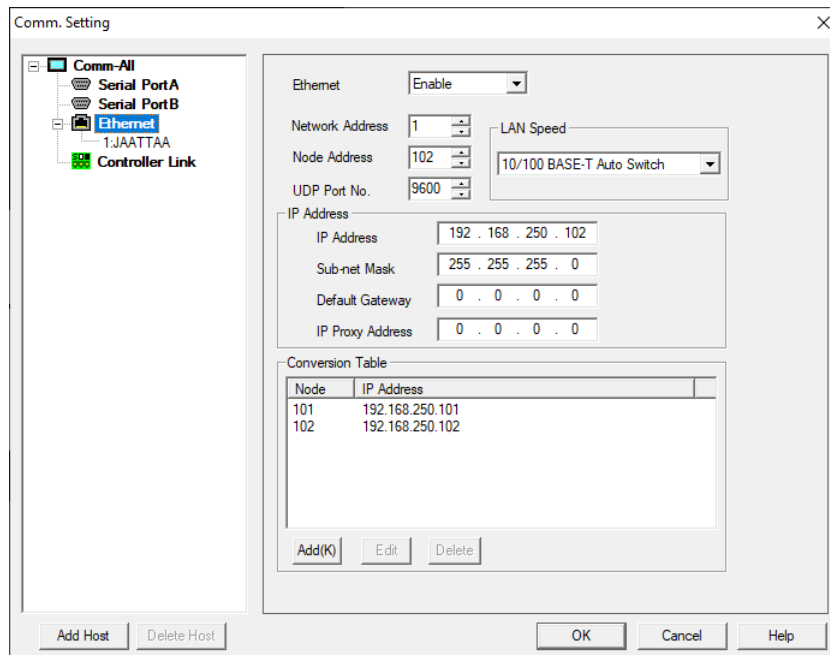


(d) Spesifiserer PCens ip-adresse (Workstation) og PLSens ip-adresse.

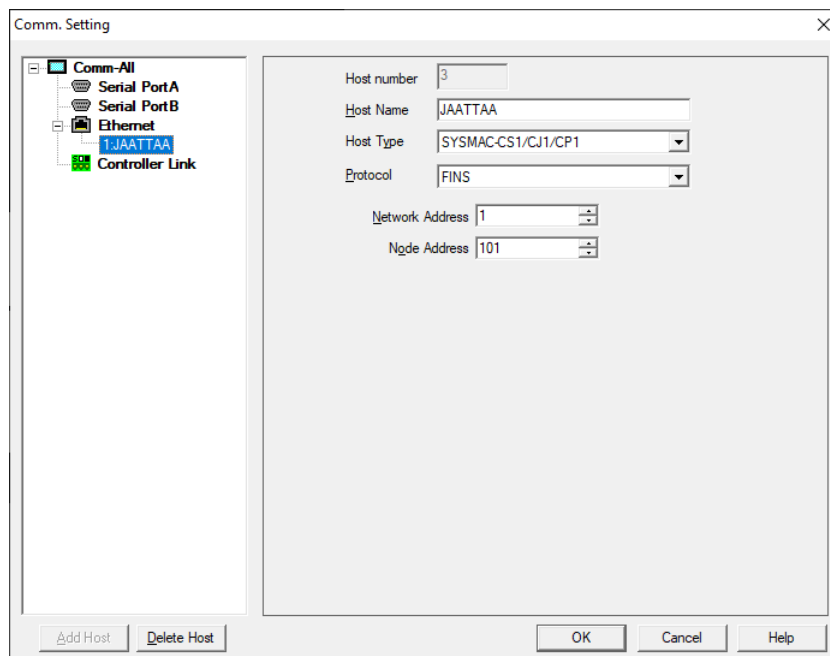
Figur F.7: Tilkobling til HMien via CX-Designer



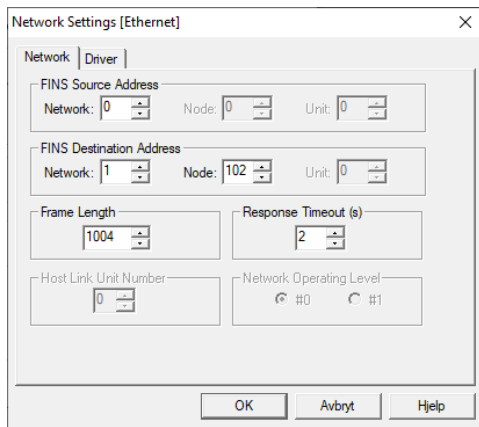
### F.3 HMIens tilkoblingsoppsett



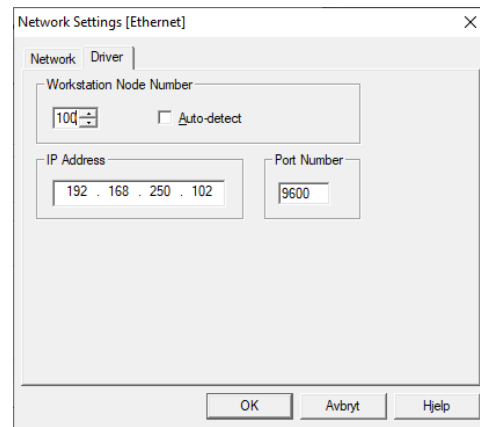
Figur F.8: Nettverkmulens tilkoblingsoppsett. Her blir PLSens ip-adresse satt.



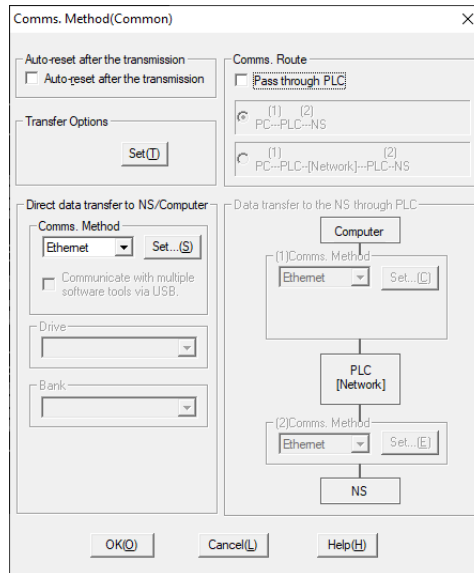
Figur F.9: Nettverkmulens tilkoblingsoppsett. Her blir PLSens ip-adresse satt.



(a) Spesifiserer aktuelt nivå og HMIens node-nummer.



(b) Spesifiserer PCens ip-adresse (Workstation) og HMIens ip-adresse.



(c) Spesifiserer Ethernet som foretrukket overføringsmetode.

Figur F.10: Tilkobling til HMIen via CX-Designer