

REGULERING AF OVNTEMPE- RATUR

Praktisk Regulering og Instrumentering



Nicolai Skjødt

Oksana Kantsyber

Marie Froberg

Sara Tjagvad Madsen

Jonathan Funk Neumann



Aarhus Universitet

Titelblad

Projekttitel:	Regulering af ovntemperatur
Uddannelsessted:	Aarhus Universitet
Uddannelse:	Diplomingeniør inden for Kemi- og Fødevareteknologi
Fag:	Praktisk regulering og instrumentering (10 ECTS)
Semester:	3. semester
Vejleder:	Steffen Gralert Sveegaard
Udarbejdet af:	Jonathan Funk Neumann, 202106429 Nicolai Skjødt, 201703432 Marie Froberg, 202107810 Oksana Kantsyber, 202009392 Sara Tjagvad Madsen, 202105762
Projektets varighed:	1/9 – 2022 – 16/12 – 2023
Sidetæl:	29

Taksigelser

Vi vil takke vores to undervisere på kurset: Steffen Gralert Sveegaard og Anders Thidemann, som har undervist os i kurset ”Praktisk regulering og instrumentering”. Forelæsningerne har givet os viden, som vi har benyttet undervejs i projektet til at udføre forsøgene, og udarbejde rapporten. Vi vil særligt takke vores vejleder Steffen Gralert Sveegaard, som har vejledt og hjulpet os under hele projektforløbet. Vi vil takke ham for at have været til rådighed, når der er opstået problemer, samt en grundig og professionel vejledning.

Vi vil gerne takke Aarhus Universitet for at stille materialer, apparatur og laboratoriet på Hangøvej nr. 2, til rådighed så vi har haft mulighed for at udføre dette projekt.

Abstract

The aim of this project is to modify an oven with analogue dial temperature control to instead use a PLC-based PID-controller to minimize the energy overall energy usage inherent in analogue temperature controllers. In this project, a Negative Temperature Coefficient Thermistor is used to monitor the temperature inside the oven. The sensor is subjected to a step-change in temperature while the resistance is logged to calibrate it. The calibration showed that the sensor behaves as a first order system. Since heating and cooling of the oven is a time-consuming process, it was chosen to simulate the system to find and tune PID-variables. It was necessary to characterize the oven, by subjecting it to a step change in the performance of the heating elements from 0% to 100%. During characterization of the system, the fans in the oven were turned on to ensure homogeneous temperature; the oven also exhibited first order system behavior. These systems were coupled in series, which make the overall system a second order system. PI-variables gathered through trial-and-error tuning in the simulated environment were then used to regulate the oven. Through testing it was determined that PI-control is superior to PID-control in this instance since the contribution from the differential was insignificant to mildly counterproductive.

Indholdsfortegnelse

1. Indledning.....	6
1.1 Problemformulering	6
2. Teori	7
2.1 Reguleringsløjfe	7
2.2 Negative Temperature Coefficient termistor	8
2.3 Programmable Logic Controller	8
2.4 Software.....	9
2.5 Proportional-, Integral- og Derivative-regulering	10
2.6 Tuningsmetoder	11
3. Materialer og metoder	12
3.1 Materialeliste	12
3.2 Kalibreringskurve af sensor.....	13
3.3 Karakterisering af sensor	14
3.4 Karakterisering af ovn	15
3.5 Simulering	15
3.6 Systemopbygning og programmering	17
4. Resultater.....	18
4.1 Kalibreringskurve af sensor.....	18
4.2 Karakterisering af sensor.....	20
4.3 Karakterisering af ovn	21
4.4 Systemopbygning og programmering	22
4.5 Simulering og PI-regulering	26
5. Diskussion	30
6. Konklusion	33
7. Perspektivering	34
8. Referencer	35
9. Procesevaluering.....	37
10. Bilag	38
10.1 Samarbejdsaftale.....	38
10.2 Tidsplan	41
10.3 inputs/outputs på PID-regulator	41
10.4 inputs/outputs på PWM-regulator	42
10.5 Rå-data fra kalibrering af sensor	43
10.6 Rå-data fra karakterisering af sensor	44
10.7 Hele CCW-systemet	46

1. Indledning

Energibesparelse og minimering af miljøpåvirkning er et yderst relevant emne for verdens industrier i dag. Energieffektivitet er nødvendigt, ikke kun for at opfylde EU's klimamål, men også for at reducere forbruget af fossile brændstoffer fra udlandet, og øge brugen af vedvarende energi (EUROPA-KOMMISSIONEN, 2021). Indførsel af energieffektive produkter og teknologier er dermed afgørende for at øge den samlede energieffektivitet af en proces som helhed.

Industrielle og almindelige ovne arbejder for at opretholde den indstillede temperatur under procesarbejde, og vil kompensere for eventuelle varmetab ved at bruge mere energi. De fleste ovne reguleres med ON/OFF-regulering, dog er dette ikke særlig energieffektivt, og dermed er det relevant at undersøge andre former for regulering. ON/OFF-regulering er den simpleste reguleringsmetode, som holder temperaturen inden for et ønsket interval. Det er blandt andet muligt at regulere med PID-, Fuzzy-regulering, Kunstig Intelligens med mere (Xu & Peet, 2021). Disse er mere avancerede metoder, som bruges til at forbedre systemets ydeevne og mindske temperaturudsving (Jiang & Jiang, 2012). I mange industrielle processer, især indenfor regulatorisk kontrol, anvendes PID-styring. Denne kontrolalgoritme er kendt for sin enkelhed og robusthed, og er brugt til at løse over 95% af problemer med regulatorisk kontrol (Ding et al., 2022).

1.1 Problemformulering

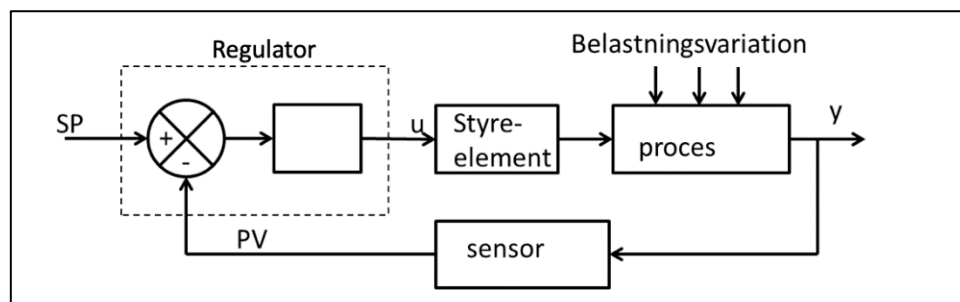
I dette projekt blev der udleveret en ovn med indbygget analog ON/OFF-regulering. Formålet med projektet var at designe et stabilt system, som reguleres hurtigt og effektivt, ved at justere forstærkning, K_p , integraltiden, τ_i , samt differential-tiden, τ_D i en PID-controller. For at automatisere systemregulering anvendes en PLC (Programmable Logic Computer) og computerprogrammet CCW (Connected Components Workbench). NTC (Negative temperature coefficient) termistor anvendes som temperatursensor. Sensoren sender det analoge signal med den aktuelle temperatur til PLC'en, hvor den sammenlignes med sætpunktstemperatur, og efterfølgende bliver outputtet fra PLC'en reguleret af de indførte CCW-parametre.

På baggrund af den teoretiske viden forventes det, at i praksis er det muligt at bygge et system, hvor temperaturen kan reguleres præcist og hurtigt med PID-regulering.

2. Teori

2.1 Reguleringsløjfe

Blokdiagrammer og transferfunktioner bruges til at beskrive en reguleringsløjfe, som er et lukket system, hvor der er en tilbagekobling af procesvariablen (PV). Denne værdi sammenlignes med sætpunktet (SP), hvorefter systemet kompenserer i forhold til fejlen. Reguleringsløjfen består af en regulator, styrelement, proces og sensor (figur 1).



Figur 1: Reguleringsløjfe består af Regulator, styrelement, styrede system eller proces og sensor. Forkortelsens betydning: SP - sætpunkt, PV - procesvariabel, u – inputsignal, y – outputsignal. Blokken beskriver de enkelte dele af systemet, pilene beskriver signaler mellem de forskellige blokke, og signalet løber i et lukket kredsløb (Dale E. Seborg, 2016, p. 128).

Procesvariablen er typisk den systemparameter, der ønskes reguleret, hvilket for ovnen er temperaturen, der måles af sensoren. Sensoren måler procesvariablen og sender et analogt signal i mV eller mA til et styresystem. Regulatoren kan for eksempel være en PID-controller, som på baggrund af den beregnede fejl regulerer udgangssignalet (u). Hvis procesvariablen er en temperatur, som måles til 100°C, og sætpunktet er sat til 120°C, kan regulatoren sørge for at tænde for varmelegemerne for at hæve temperaturen. Når temperaturen er opnået, vil regulatoren regulere outputtet til at opretholde den valgte temperatur. Dette gøres ved at tænde og slukke outputtet ved for eksempel ON/OFF-regulering, PWM-styring med mere. Ved de fleste regulatorer er det muligt at skifte mellem direkte eller invers regulering. Valget mellem direkte eller invers regulering er afgørende for, om reguleringsløjfen kommer til at virke. Opvarmningen af ovnen er invers regulering, hvor fejlen beregnes ligning 1.

$$e(t) = SP - PV(t) \quad (1)$$

Hvis procesvariablen bliver højere end sætpunkt, vil fejlen (e) være negativ, hvorimod den ved direkte reguleringen vil være positiv, hvis procesvariablen bliver højere end sætpunktet. Når temperaturen kommer op over sætpunktet, skal varmelegemerne slukke, eller der skal hives varme ud af systemet.

2.2 Negative Temperature Coefficient termistor

Termistorer er halvledere, som har en elektrisk ledningsevne, der ligger mellem de ledende og de isolerende materialer. Termistorer er lavet af et materiale, som ændrer på modstanden ved ændring af temperaturen. Modstanden af termistorer kan måles med et digitalt multimeter. Efter modstanden er bestemt i et temperaturinterval, kan forholdet mellem termistorens modstand og den tilhørende temperatur bestemmes, og kaldes for kalibreringskurven (Chen, 2009). Modstanden af nogle typer termistorer falder med stigningen i temperatur, disse kaldes negative temperature coefficient (NTC) termistorer. Fordelene ved NTC-termistorer til temperaturmåling er den høje følsomhed, der giver en hurtig og nøjagtig respons på temperaturændringer (Kyoung Mi Moon).

NTC-termistorens ydeevne til temperaturmåling påvirkes af kalibreringskurven, som udtrykker forholdet mellem modstand og temperatur. Dette forhold beskrives ved ligning 2, Steinhart-Hart ligningen, som er en empirisk ligning (White, 2005). Denne ligning skaber et lineær input-output forhold for en mere præcis temperatur kontrol af systemet (Rana et al., 2018).

$$\frac{1}{T} = A + B * \ln(R) + C * \ln(R)^3 \quad (2)$$

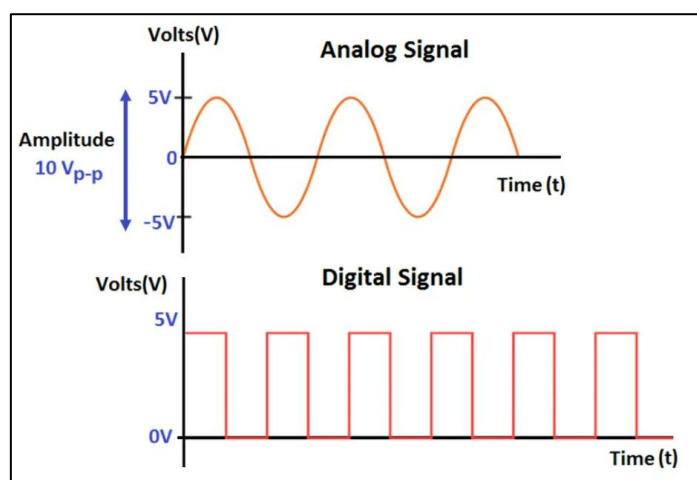
Hvor T er temperatur (Kelvin), R er modstanden (Ohm), A, B og C er Steinhart-Hart koefficienterne, som varierer afhængig af typen af termistor og temperaturspændet. I ligningen er T den afhængige variabel, og $\ln(R)$ er den uafhængig variabel (Chen, 2009).

2.3 Programmable Logic Controller

Programmable Logic Controller (PLC) er særligt anvendelige til at kontrollere en foreskrevet ændring i et lukket reguleringsløjfe kontrolsystem. En PLC bruger programmerbar hukommelse til at gemme instruktioner, og implementere funktioner til at styre processer. PLC'er kan implementere PID-styring, og andre matematiske operationer via specialiseret software. Når programmet er designet på programmeringsenheden, overføres det til PLC'ens hukommelsesenhed.

Et PLC system består typisk af en processorenhed, hukommelse, strømforsyningsenhed, input/output interfacesektion, kommunikation interface og programmeringsenhed. Processorenheden fortolker inputsignalerne og udfører kontrolhandlingerne i forhold til det program, der er gemt i dens hukommelse. Strømforsyningsenheden er nødvendig for at konvertere net spænding til jævnspænding, der er nødvendig for processoren. Programmeringsenheden i PLC bruges til at indtaste det nødvendige

program i processorens hukommelse. Hukommelsesenheden lagrer programmet, der indeholder kontrolhandlingerne. Input- og outputsektionerne er, hvor processoren modtager information fra eksterne enheder, som for eksempel en temperatursensor. Input- og outputenhederne klassificeres som enten analog eller digitale signaler. Analoge signaler er kontinuerlige bølgesignaler som ændrer sig med tidsperioden, og måler uendelige mængder af værdier inden for det interval der overvåges, det vil sige analoge signaler er kontinuerlige i både amplitudeaksen og i tidsaksen (Analogue Signal - an overview | ScienceDirect Topics). Digitale signaler er ikke kontinuerlige, i hverken amplitudeaksen eller tidsaksen, men er i stedet signaler som giver en binær værdi, enten 0 eller 1, og som kan ses som on/off tilstande (figur 2) (Smillie, 1999).



Figur 2: Forskellen på analoge- og digitale signaler(Rao)

2.4 Software

Temperaturregulering i PLC'en kan blandt andet styres ved brugen af blokdiagrammer, der er integreret i Connected Components Workbench (CCW). CCW-software er et sæt af værktøjer, der understøtter Micro800 controllere. Funktionsblokdiagrammerne kan inkludere et feedback-loop for den manipulerede værdi, en PID-blok, en PWM-blok, variabler og en converter (Automation, 2022).

For præcis temperaturkontrol ved PID-regulering udføres computerstyret design og analyse gennem simuleringsprogrammet Simulink, som er en softwarepakke til MATLAB. For at lave simulering af ovnens temperatursystem anvendes funktionsblokke og linjeforbindelser. Blokkene bruges til at generere, ændre, kombinere, udlæse og vise signaler. Linjeforbindelserne bruges til at overføre signaler

fra en blok til en anden. Simulink muliggør hurtig oprettelse af blokdiagrammer baseret på transfer-funktioner svarende til ovnsens temperatursystem, efterfulgt af simulering for et givet inputsignal (Dale E. Seborg, 2016).

2.5 Proportional-, Integral- og Derivative-regulering

Proportional-, Integral- og Derivative- regulering (PID-regulering) er den mest anvendte type til regulering i industrielle sammenhænge, heriblandt regulering af ovntemperatur. Populariteten af PID-controller skyldes dens ydeevne under forskellige driftsforhold, derudover er de hurtige, praktiske og pålidelige (Jiang & Jiang, 2012).

PID-algoritmen består af tre koefficienter: proportional, integral og differential, som varieres for at få optimal respons. Den grundlæggende ide bag en PID-controller er at modtage et signal fra en sensor, og derefter beregne det ønskede output ved beregning af proportional-, integral- og differential-leddene, og summere disse for at få det endelige output (Jiang & Jiang, 2012).

En standard regulatorligning for PID-kontroller er ligning 3 (Kyoung Mi Moon):

$$p(t) = \bar{p} + K_c \left[e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t^*) dt^* + \tau_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3)$$

Hvor $p(t)$ er kontrollerens output, \bar{p} er et konstant offset, K_c er proportionalleddet, e er fejlen, τ_I er integralleddet og τ_D er differential-leddet.

Proportionalleddet afhænger kun af forskellen mellem sætpunktet og procesvariablen, hvor udgangssignalet er proportionalt med fejlen. Den proportionale forstærkning (K_p) bestemmer forholdet mellem outputresponsen og fejlsignalet, hvor en forøgelse af denne vil øge hastigheden af styresystemets reaktion. Dog vil en for stor proportional forstærkning resultere i svingninger, og systemet kan blive ustabil. Integral-leddet summerer fejlen over tiden, hvor denne løbende vil stige over tid, medmindre fejlen er nul. Differential-leddet stabiliserer reguleringssløjfen, idet den får outputtet til at falde, hvis procesvariablen stiger hurtigt. Differential-leddet er proportional med ændringen af procesvariablen. Ved tilføjelse af differential-leddet opnås en dæmpning af reguleringssløjfen, som kan muliggøre en større forstærkning og kraftigere integral-virkning, hvilket gør reguleringen hurtigere til at eliminere afvigelser (Automation, 2022). Udover dæmpningen af systemet, vil differential-leddet også forstærke målestøj, som kan forårsage forstyrrelse i systemet. De enkelte dele af PID-reguleringen kendes som basic control modes, og kan sammensættes på forskellige måder for at regulere en proces.

2.6 Tuningsmetoder

Tuning drejer sig om at finde de optimale parametre i regulatorligningen, og der findes mange metoder til, hvordan en regulator bedst kan indstilles. Ziegler-Nichols- og Tyreus-Luyben-tuning er to tuningsmetoder, hvor fremgangsmåden er den samme, men der anvendes forskellige værdier, der ganges på forstærkningen og svingningstiden. Ziegler-Nichols-metoden er velegnet til at håndtere procesforstyrrelser, men ikke velegnet til sætpunktsændringer. Tyreus-Luyben-metoden er velegnet til at håndtere sætpunktændringer, men ikke velegnet til procesforstyrrelser.

Fremgangsmåden for Ziegler-Nichols-tuning og Tyreus-Luyben-tuning er følgende:

1. Integral-leddet og differential-leddet sættes til 0.
2. Den kritiske forstærkning, K_{c_k} findes ved at analysere ”stående svingninger”.
3. Herefter findes den kritiske svingningstid, T_k , som er afstanden mellem to toppe.
4. De foreslåede værdier for proportional, integrale og differentiale-leddene beregnes ved hjælp af parametrene, som er specifikke for Ziegler-Nichols-tuning og Tyreus-Luyben-tuning.

Trial-and-error er en enkel metode, hvor forskellige parametre afprøves for at se, hvordan regulatoren og processen opfører sig. Ved den systematiske metode minimeres først bidraget fra integral- og differential-leddene ved at sætte leddene til nul. Herefter ændres den proportionale forstærkning, K_c , indtil responsen på sætpunktændringen er tilfredsstillende. Efterfølgende finjusteres responsen ved at ændre bidraget fra integral- og differential-leddene, så svingningerne gradvist reduceres. Når integral- og differential-leddene er indstillet til de ønskede værdier med minimal steady state fejl, øges den afledte forstærkning, indtil systemet reagerer hurtigt på sit sætpunkt (Dale E. Seborg, 2016).

3. Materialer og metoder

3.1 Materialeliste

I dette projekt var fokus at designe en PID-algoritme for at kontrollere temperaturen i en ovn, hvor de anvendte materialer og programmer ses på tabel 1.

Tabel 1: Materialer med informationer og programmer, der er anvendt i projektet.

Materialer	Model/informationer
Miniovn, Wasco (43x31,5x47 cm)	Model: TO-30A-2 220-240 V 50 Hz 30 L kapacitet 1800 W effekt
PLC, Allen-Bradley	Micro820: 2080-LC20-20QBB
Solid state relay x 2	Model: 9225208 Input 3-32 VDC Output 280VAC/25A
Multimeter	52AC3271
Breadboard	400 huller
Modstand	1.5 M Ω \pm 5%
Salling trådløse stegetermometer	ID:42200300330-EA
Rød diode	TLLR5401
Miniature Toggle Switch	3 pin
Ledninger	
Skævbider	
Skruetrækker	
Afisolator	
Internetkabel	
Programmer	
Connected Components Workbench (CCW)	Version 11,0
MATLAB/ Simulink	2022a
Excel	2022
RSlinx	Version 4,0

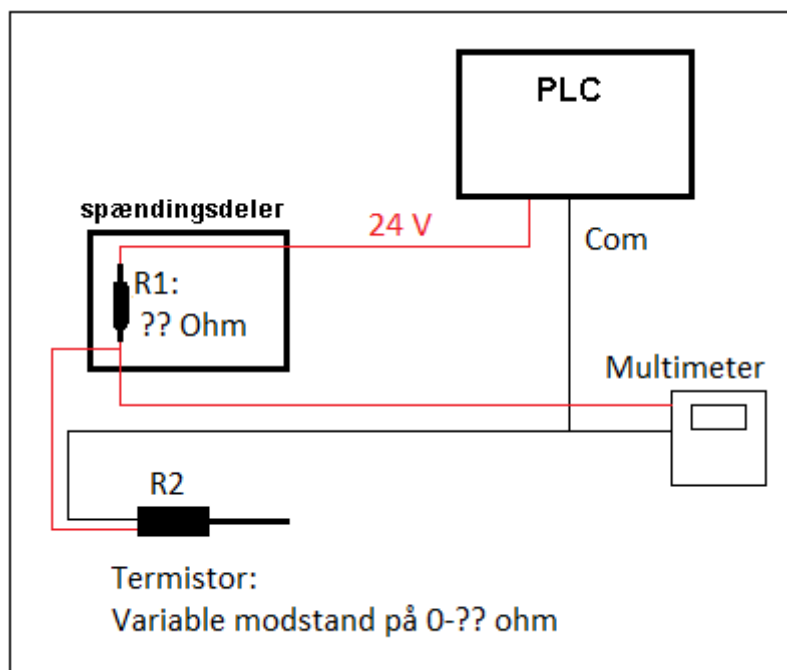
3.2 Kalibreringskurve af sensor

PLC'en kan ikke måle en modstand, men kun en spænding og/eller en strømstyrke. Derfor er det nødvendigt at bygge et system, som kan måle spændingsfaldet over termistoren. Sensorens temperaturområde er 0-250°C, så derfor valgtes dette som måleintervallet, og modstanden i termistoren måles ved 0°C og 250°C. Da sensoren er en NTC-termistor, er modstanden på maksimum ved 0°C, og på minimum ved 250°C, derfor valgtes maksimumsmodstanden som R_2 i ligning 4. Sensoren var en del af et stegetermometer, hvor strømmen leveres af 2 x AA batterier med en spænding på 3V i alt, og derfor antages det at spændingsfaldet over sensoren skal være i samme område, og derfor sættes $U_{out} = 3V$ i ligning 4.

På PLC'en blev en terminal med en udgangsspænding på 24V brugt, og derfor blev $U_{In} = 24V$ i ligning 4. Ud fra de disse værdier og ligning 4, som er formelen for en spændingsdeler, udregnes modstanden, R_1 , på følgende måde (Kyoung Mi Moon):

$$U_{out} = U_{In} * \frac{R_1}{R_2 + R_1} \quad (4)$$

Til kalibrering bruges en sammenhæng mellem spænding og modstand, samt mellem modstand og temperatur. Sensoren udsættes efterfølgende for en temperaturændring i intervallet 0-250°C, hvor temperaturen, den tilhørende modstand, og spænding måles, ved hjælp af en spændingsdeler (figur3), et multimeter og et referencetermometer.



Figur 3: Skemativering af spændingsdeler brugt til at måle modstand, spænding og temperatur

Modstand og spændingen noteres, og efterfølgende beregnes forskriften for sammenhængen, som bruges til at omregne inputtet fra spænding til modstand. Herefter bruges Steinhart-Hart formelen (ligning 2) til at finde en sammenhæng mellem modstand og temperatur.

3.3 Karakterisering af sensor

Sensoren karakteriseres ved at udsætte den for en step-funktion, for at se, hvordan den reagerer på en temperaturændring. Sensoren holdes ved stuetemperatur, hvorefter den hurtigt placeres i kogende vand, samtidig med at data logges i PLC'en. Proceduren gentages tre gange, hvor der ud fra de tre datasæt findes en τ -værdi, og gennemsnittet efterfølgende bestemmes. Data normaliseres i Excel for at få det første punkt til at starte i 0,0. Da sensoren er et 1. ordenssystem beregnes temperaturændringen derefter ved hjælp af følgende analytiske funktion (ligning 5):

$$y(t) = K * M * (1 - \frac{e^{(-t-t_0)}}{\tau}) \quad (5)$$

Hvor K er forstærkningen, M er magnituden, som er størrelsen af stepfunktionen, τ er tidskonstanten, og t angiver tiden.

Formlen fittes over det normaliserede data ved at minimisere variansen. Summen af variansen mellem den målte og beregnede temperatur skal være så lille så mulig (ligning 6).

$$Varians = (m\ddot{a}lt\ temperatur - beregnet\ temperatur)^2 \quad (6)$$

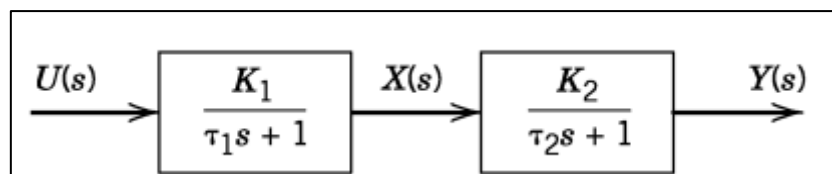
Her bruges Solver-funktionen i Excel, hvor summen af variansen sættes til minimum, ved at der ændres på M- og τ -værdien. Forstærkningen, K, fastholdes på 1, da sensoren er kalibreret. K og τ -værdien for sensoren bruges efterfølgende til at bestemme ovnens karakteristik, da disse fastholdes i ligningen der beskriver ovnen.

3.4 Karakterisering af ovn

Modelparametre for transferfunktioner kan estimeres ved hjælp af ikke-lineær regression og software som Excel og MATLAB. Forholdet mellem τ_2/τ_1 og systemets respons kan findes ved at antage, at ovnen og temperatursensoren er begge to 1. ordens systemer, som seriekobles (figur 4). Når disse to 1. ordens systemer seriekobles, giver det samlet et 2. ordenssystem, hvor $G(s)$ er forholdet mellem output ($Y(s)$) og input ($U(s)$) i ligning 7.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_1 K_2}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (7)$$

$K = K_1 K_2$, er systemets forstærkning.



Figur 4: To 1. ordens systemer som er seriekoblet med input $U(s)$ og output $Y(s)$.

For at bestemme forstærkningen, samt de to τ -værdier af systemet, normaliseres det indsamlede data. Det normaliserede data viser ændringer af temperaturen ($^{\circ}\text{C}$), som er afhængig af tiden (sekunder). Modelforudsigelser, der skal sammenlignes med de målte data beregnes derefter ved hjælp af den analytiske funktion (ligning 8):

$$y(t) = K * M * \left(1 + \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \left(\tau_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} - \tau_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \right) \quad (8)$$

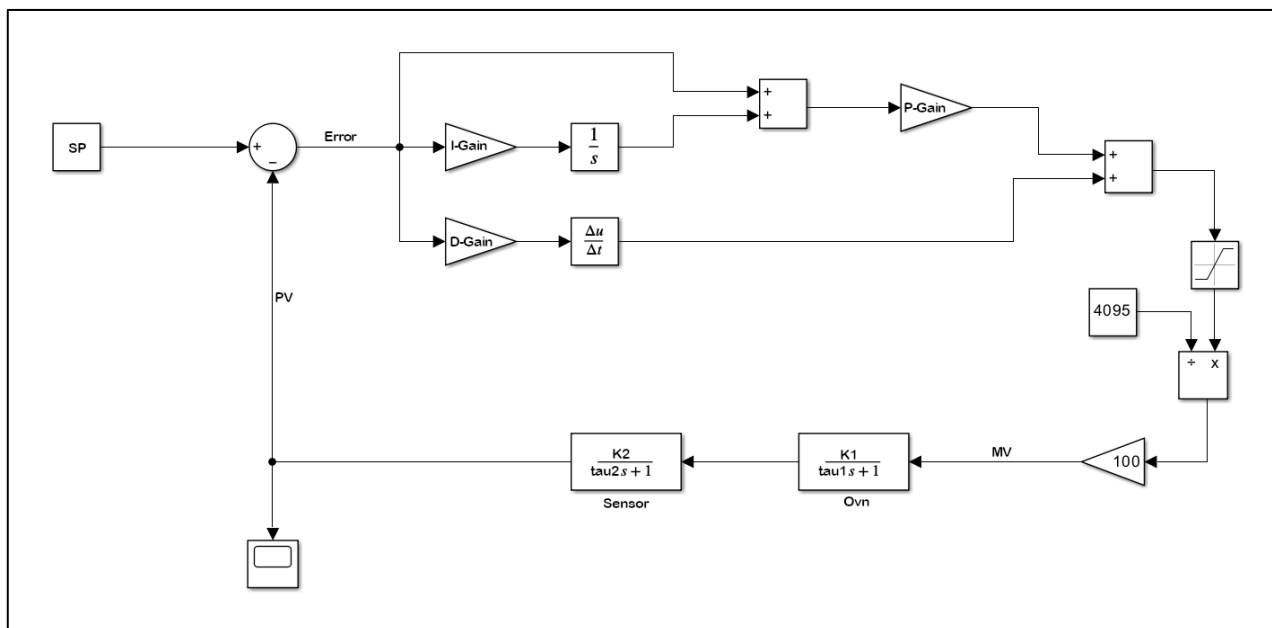
Funktionen bruges til at lave et fit over det normaliserede data for at finde K og τ_2 , ved at holde τ_1 konstant og sætte magnitude, M , til 100, da varmelegemerne kører ved 100% ydeevne under karakteristikken.

3.5 Simulering

Systemet simuleres på baggrund af følgende regulatorligningen, ligning 9, som anvendes i PLC'ens indbyggede PID-controller (CCW):

$$p(t) = K_c \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt \right) + T_d \cdot \frac{de}{dt} \quad (9)$$

Som det ses ud fra ligningen forstærker K_c både proportional- og integral-leddene. På Figur 5 ses det simulerede system.



Figur 5: Diagram over PID-controller og systemet i Simulink.

Konstruktionen af systemet i Simulink følger opbygningen af standard-reguleringssløjfen (Figur 1). I CCW anvendes der PWM (Pulse Width Modulation) for at kunne gøre ovnens brugte effekt mindre i praksis, og derfor efterlignes dette i simuleringen. Da effekten af ovnens varmelegemer ikke kan styres, kan det kun styres, hvor stor en procentdel af tiden der er strøm til dem. Dette kan antages at svare til en procentvis nedsætning af varmelegemernes brugte effekt. Outputtet fra controlleren føres gennem en saturation-blok, som afgrænser signalet. Siden controlleroutput i teorien findes i intervallet $(-\infty, \infty)$, er det nødvendigt at begrænse det, så det stemmer overens med det analoge 12 bit-signal (intervallet $[0, 4095]$). For at simulere PWM signalet til ovnen, omregnes 12 bit-signalet til procent, hvor 100% svarer til en effekt på 1800W. Der anvendes to transferfunktioner for at simulere systemets reaktion på reguleringen (figur 4). Den første transferfunktion efterligner ovnen, den anden efterligner sensoren. Data fra karakteriseringen indsættes i transferfunktionerne, og på den måde omdannes signalet fra styreelementet til en procesværdi, der kan sendes til starten af reguleringssløjfen, hvor fejlen beregnes.

3.6 Systemopbygning og programmering

Et CCW-projekt blev oprettet med følgende controller; (2080-LC20-20QBB(R)). Dette gav en programmerbar PLC, med fire analoge input kanaler, som kan læse et spændingssignal (0-10V) med en opløsning på 12bit, samt syv output kanaler på 24V. Projektet bygges desuden med udvidelsesmodul 2080-IF4, som gav fire yderligere analoge input kanaler, med en opløsning på 16bit. Dette udvidelsesmodul bruges til at aflæse sensorens input, da denne kunne levere et signal med højere opløsning, samt et programmerbar PWM-signal. PLC'en forbindes til en computer gennem RSLinx Classic.

4. Resultater

4.1 Kalibreringskurve af sensor

Ved 0°C måles den maksimale modstand til 281kΩ, som sættes ind i ligning 10.

$$3V = 24V * \frac{281000 \Omega}{R1 + 281000\Omega} \Rightarrow R1 = 1967000\Omega = 1.97 \text{ M}\Omega \quad (10)$$

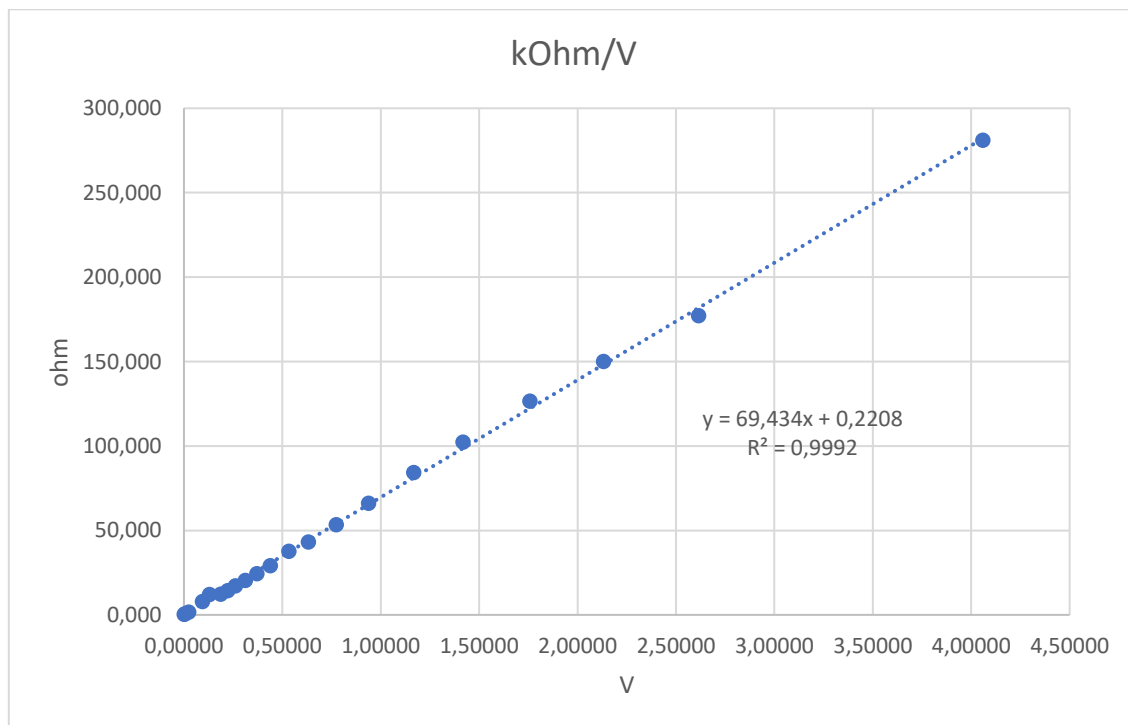
Grundet manglende tilgængelighed, blev en modstand på 1.5 MΩ valgt, som sikrer, at spændingen over modstanden ikke var meget højere end 3V beregnes maksimumsspændingen med den nye modstand i ligning 11.

$$U1_{Max} = 24V * \frac{281000\Omega}{1500000\Omega + 281000\Omega} = 3.79 \text{ V} \quad (11)$$

En maksimal spænding på 3.79V over termistoren anses som acceptabel.

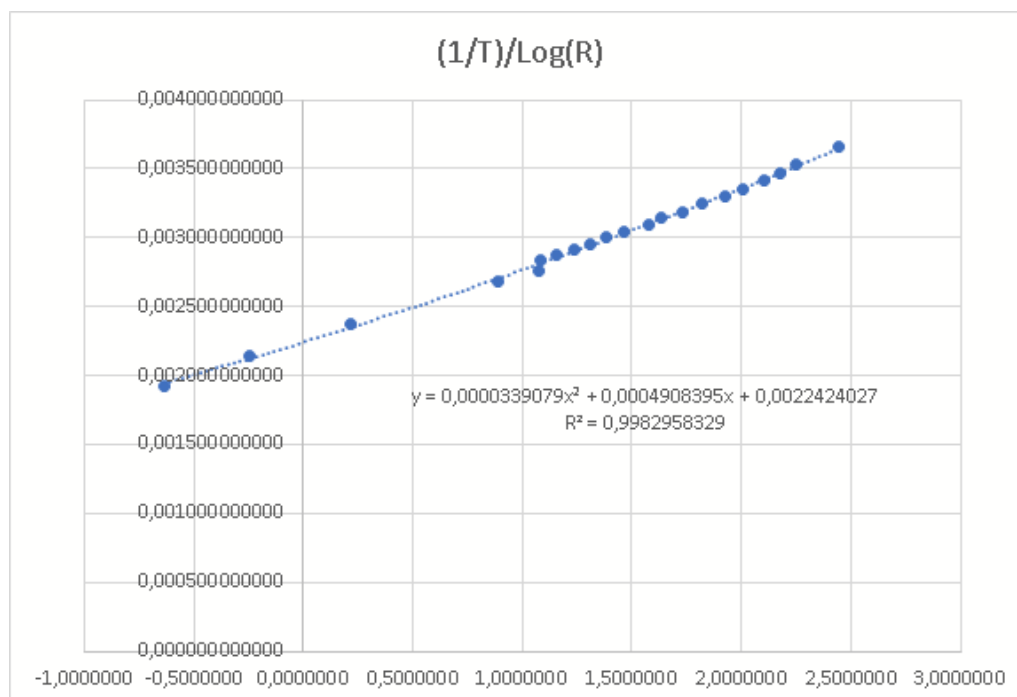
Den lineære regression (Figur 6) fremstilles over de målte data (rå-data ses bilag 10.6) på spændingen og modstanden, og den tilhørende forskrift blev fundet:

$$y(x) = 69,434 * x + 0,2208 \quad (12)$$



Figur 6: Lineær sammenhæng mellem den målte spænding over termistoren, samt den tilhørende modstand.

Temperaturen og modstanden (rå-data ses i bilag 10.6) blev efterfølgende brugt til beregning af koefficienterne i Steinhart–Hart ligningen (Figur 7), hvor den reciprokke værdi af T, blev plottet op af y-aksen, og den logaritmiske værdi af modstanden, ud af x-aksen.



Figur 7: Polynomisk 2. ordens regression med den reciprokke værdi af temperaturen over den logaritmiske værdi af modstanden.

Dette gav en forskrift for et polynomisk 2. ordens system, hvor A, B, og C koefficienter nu er fundet (Ligning 13).

$$y(x) = 0,0000339079x^2 + 0,0004908395x + 0,0022424027 \quad (13)$$

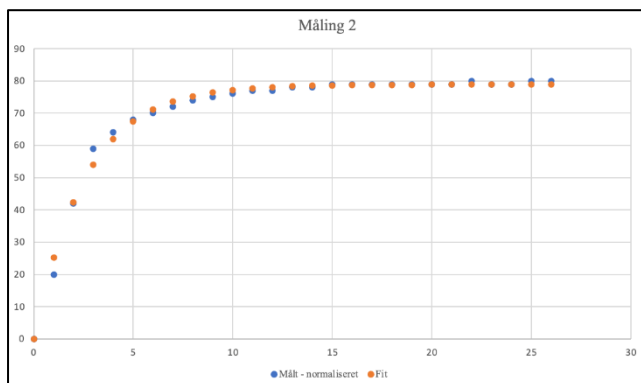
Koefficienterne er følgende: A = 0,0022424027, B = 0,0004908395 og C = 0,0000339079. Disse koefficienter sættes ind i formelen for Steinhart-Hart ligningen, i ligning 14.

$$\frac{1}{T} = 0,0022424027 + 0,0004908395 * \ln(R) + 0,0000339079 * (\ln(R))^3 \quad (14)$$

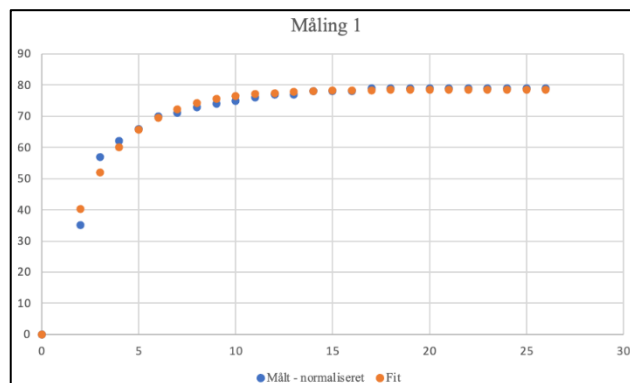
Denne ligning er efterfølgende programmeret ind i PLC'en, for at omregne sensorens signalinput fra en modstand til en temperatur.

4.2 Karakterisering af sensor

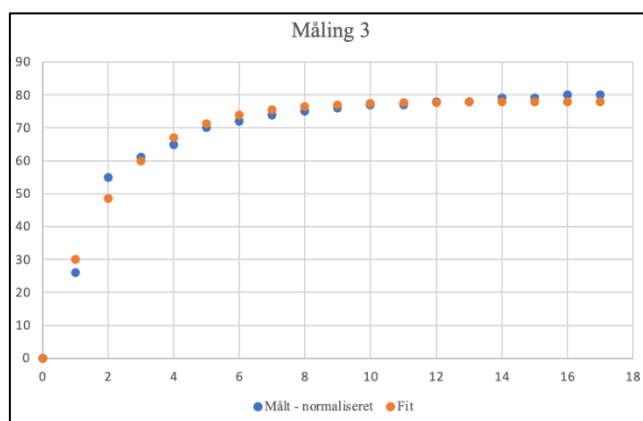
Nedstående er grafer over det normaliserede data, samt det fittet data for karakteriseringen af sensoren (Figur 8, Figur 9 og Figur 10), hvor rå-data kan ses i bilag 10.6:



Figur 9: Data for 2. måling til sensorkarakteristikken, sammen med fittet over 1. ordens systemet på de tre foretagne målinger.



Figur 8: Data for 1. måling til sensorkarakteristikken, sammen med fittet over 1. ordens systemet på de tre foretagne målinger.



Figur 10: Data for 3. måling til sensorkarakteristikken, sammen med fittet over 1. ordens systemet på de tre foretagne målinger.

På grafen angiver de blå punkter det målte data, og de orange punkter er fittet data. Når der ses på målingerne i forhold til fittet, er der en god tilnærmelse mellem punkterne. Tabel 1 angiver de tre τ -værdier udregnet på baggrund af data logget i PLC'en efter, at sensoren er udsat for en stepfunktion:

Tabel 2: Tabel over de tre τ -værdier udregnet på baggrund af data fra en step-funktion logget på PLC'en.

	Måling 1	Måling 2	Måling 3	Gennemsnit
τ	2,77	2,59	2,05	2,47

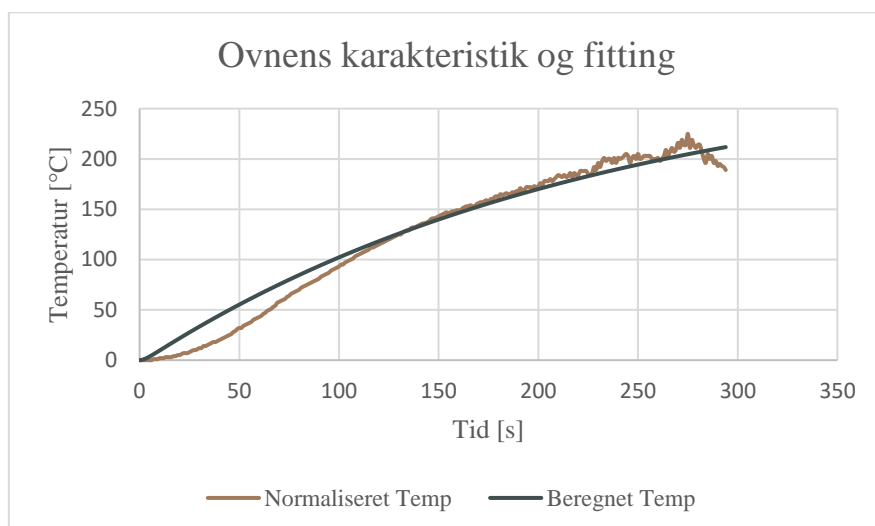
På baggrund af tabellen blev den gennemsnitlige τ -værdi udregnet for de tre målinger ved hjælp af ligning 15:

$$\frac{2,77 + 2,59 + 2,05}{3} = 2,47 \quad (15)$$

τ -værdi for sensoren udregnes til 2,47.

4.3 Karakterisering af ovn

Til karakterisering af ovnen målt temperaturen tre gange i området fra 0 til 250°C i tidsintervallet 0 til 294 sekunder, hvor data logges i PLC'en. Ud fra det normaliserede data fremstilles en graf med tiden i sekunder over temperatur i °C (Figur 11).



Figur 11: Normaliseret data over ovnens temperatur, samt fittings kurve fremstillet af den analytiske ligning for 2. ordens system

Efterfølgende findes værdierne K og τ_1 , ved at holde τ_2 konstant på 2,47, og løse for τ_1 i ligning 6. K -værdien beregnes ved hjælp af Solver-funktionen i Excel, hvor magnituden, M , blev sat til 100. Værdierne for ovnens karakteristik blev dermed: $K = 2,9336$, $\tau_1 = 227,82$ og $\tau_2 = 2,47$. Siden τ_1 , som er tidskonstanten for ovnen, er større end tidskonstanten for sensoren, τ_2 , reagerer sensoren på temperaturændringer hurtigere end ovnen gør. Som resultat fås en s-formet respons, hvor grafen over det normaliserede data på figur 11 afviger fra den beregnede temperatur i starten.

Systemet er ikke kritisk dæmpet, da den anvendte temperatursensor reagerer hurtigere end ovnen, og ved et kritisk dæmpet system er de to τ -værdier identiske, hvilket ikke er tilfældet her. Systemet er

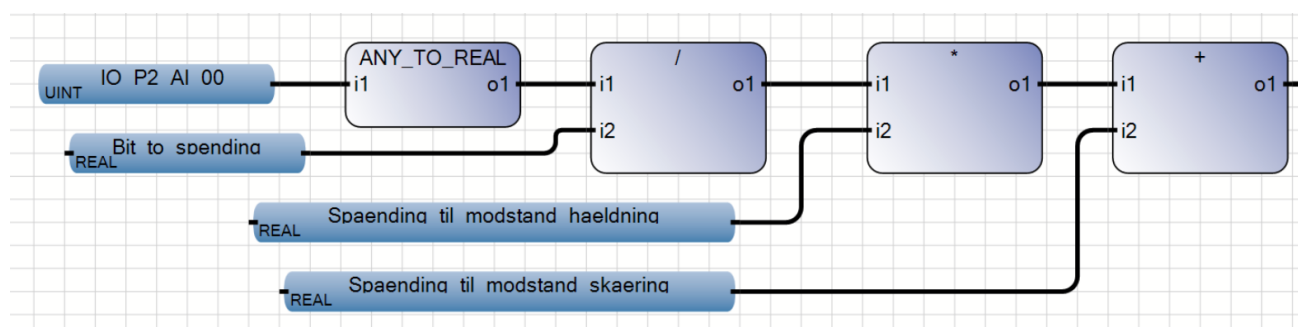
ikke et underdæmpet system, da to 1. orden systemer, som seriekoblet, ikke kan have stående svingninger, hvilket vil være tilfældet, hvis det var et underdæmpet system. Dermed er systemet et overdæmpet 2. ordenssystem.

4.4 Systemopbygning og programmering

IO P1 AI 00 er adressen på den input-kanal, som bruges på udvidelsesmodulet i PLC'en. Udvidelsesmodulet modtager signalet, som et reelt tal mellem 0 – 65535, hvor værdien beskriver opløsningen af inputtet. Inputtet kan maksimalt modtage et spændingssignal på 0 – 10V. På baggrund af det, udregnes en faktor, som signalet divideres med, for at konvertere signalet til en spænding (ligning 16):

$$\text{Omregning fra bits til spænding: } \frac{65535 \text{ bits}}{10V} = 6553,5 \quad (16)$$

Figur 12 er den første del af CCW-programmet, som modtager et signal, og omregner det fra et reelt tal, til en spænding, og efterfølgende til en modstand.



Figur 12: CCW-programmet der omregner inputsignalet fra en opløsning på 0-65535 bits til en spænding på 0-10V og efterfølgende omregnes til en modstand ud fra en formel beregnet på termistorens karakteristisk.

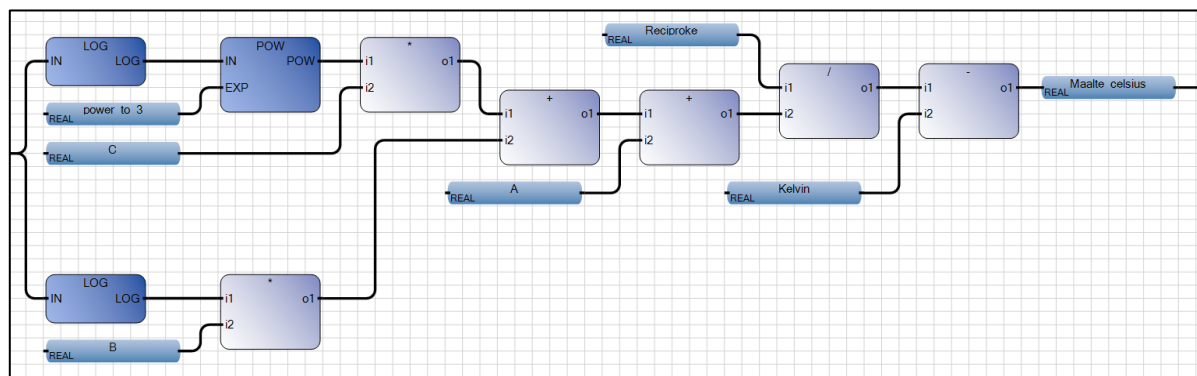
Signalet omregnes til en modstand ud fra kalibreringskurven for sensoren ved ligning 17.

$$R(U) = 69.434 * U + 0.2208 \quad (17)$$

hvor R står for modstand og U for spænding. Omregningen sker ved at signalet ganges med hældningen, og summeres med skæringen. Efterfølgende omregnes signalet til en temperatur ved hjælp af Steinhart-Hart ligningen 18.

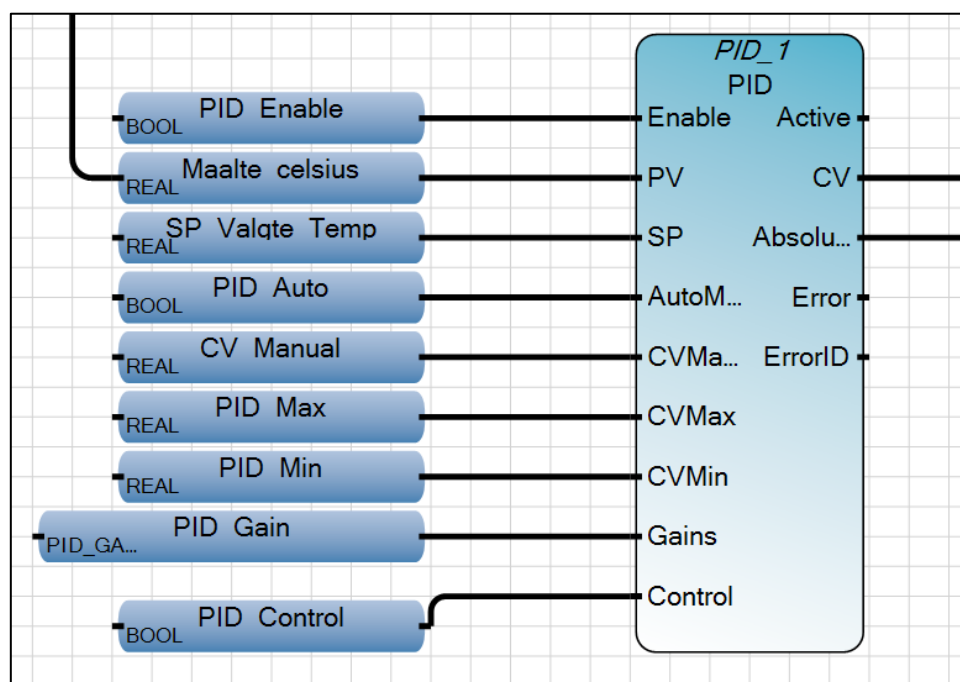
$$\frac{1}{T} = 0,0022424027 + 0,0004908395 * \ln(R) + 0,0000339079 * (\ln(R))^3 \quad (18)$$

Dette system kan ses på figur 13.



Figur 13: CCW-programmet der omregner signalet fra en modstand til en temperatur, ud fra Steinhart-Hart formelen.

Signalet er omregnet til en temperatur i celsius, og bruges som input i PID-controller (figur 14). Denne PID-controller håndterer ni inputs og fem outputs, hvor detaljerne kan ses i bilag 10.3.



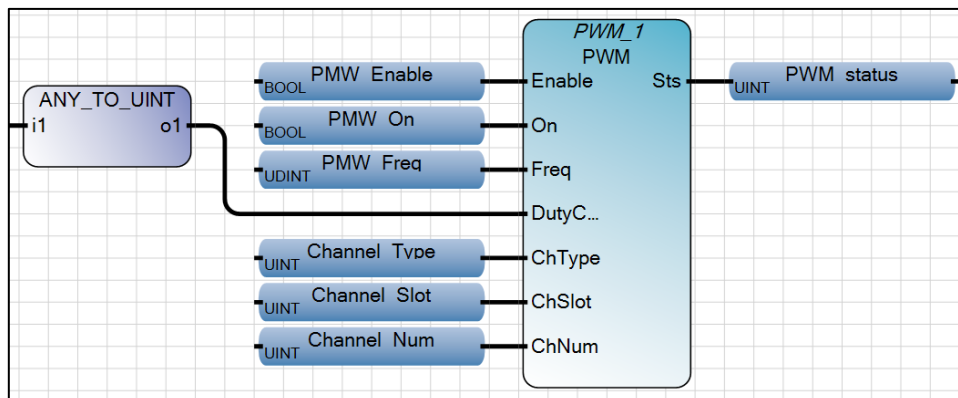
Figur 14: Funktionel blok for PID-controller, samt tilhørende inputs-outputs blokker bygget i CCW.

Ved hjælp af denne PID-controller skrues der op og ned for det varierende output, indenfor et interval, baseret på inputtet fra vores temperatursensor.

Signalet fra PID-regulator føres videre til en PWM-blok (figur 15), som er det endelige signal der styrer ovnen. Denne blok er styret af syv inputs, og har to outputs, hvor detaljerne kan ses i bilag 10.4. PWM-signalet førtes videre til et relæ, som sammen, styrer varmelegemerne i ovnen. PWM-signalet

gør det muligt at regulere temperaturen i ovnen, med et gennemsnitlig mindre brug af strøm, ved hurtigt at skifte mellem en fast spænding og slukket tilstand, og derved reducere den samlede mængde energi, der leveres til ovnen (Barr, 2001).

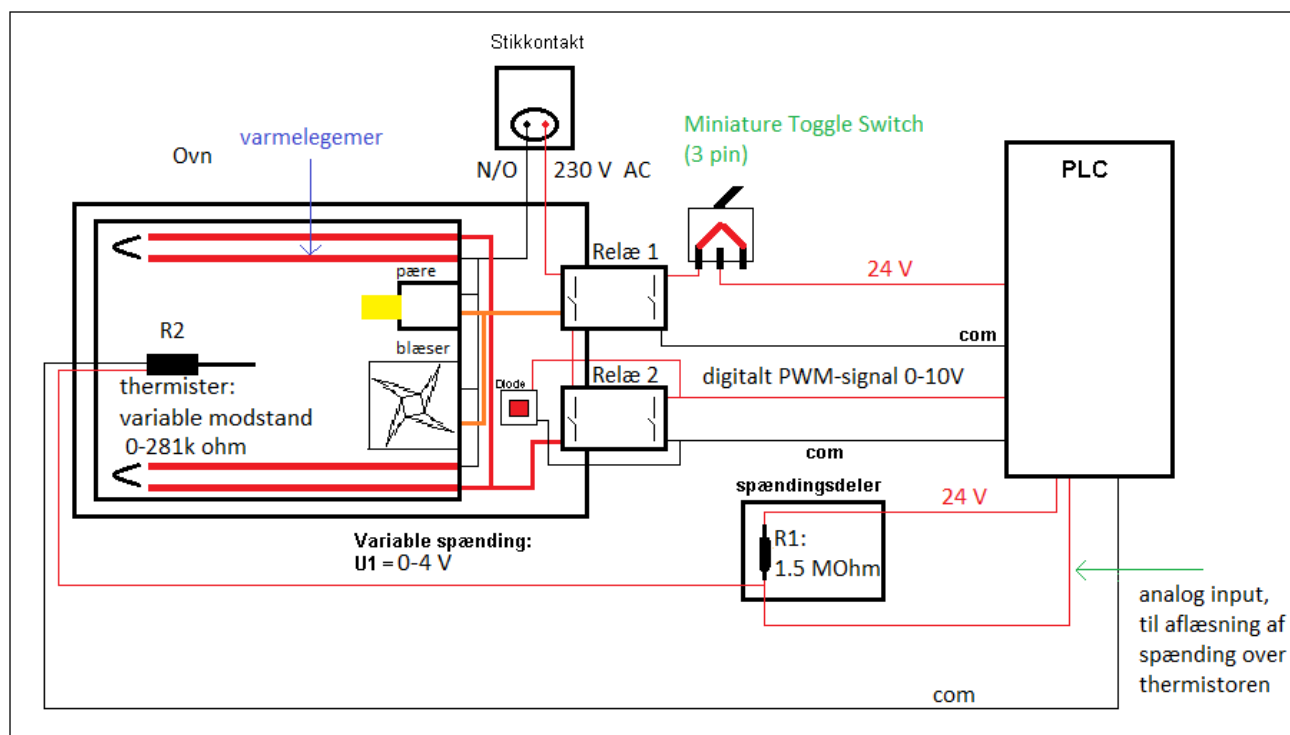
En frekvens på 1 Hz er valgt for at skåne relæet, som ellers godt kan håndtere en frekvens på 11 ms (Pro). Derudover vil en højere frekvens ikke give en markant forskel da systemet er langsomt reagerende.



Figur 15: Funktionel blok for PWM-controller, samt tilhørende inputs-outputs blokker bygget i CCW.

Hele systemet kan ses i bilag 10.7.

Efter programmering i CCW blev systemet skematiseret og bygget færdigt ud fra (Figur 16).

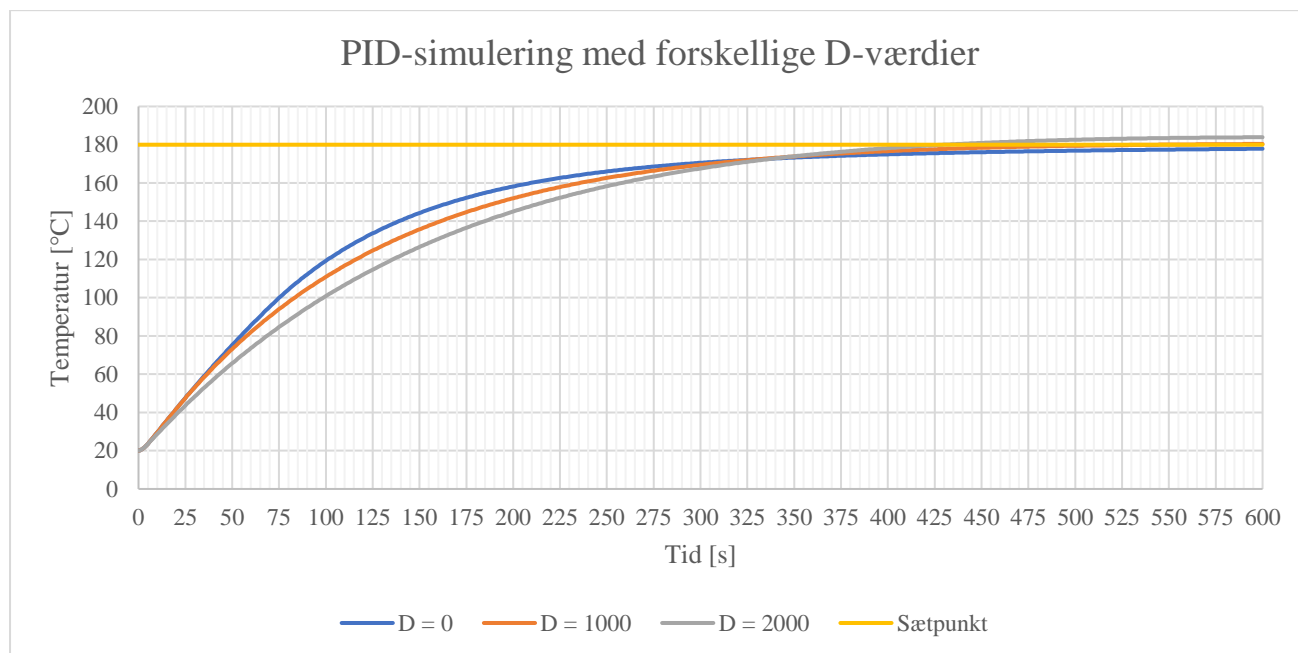


Figur 16: Skematisering af hele systemets opbygning med input og output værdier.

Systemet styres af to solid state relæer, hvor relæ 1 bruges til og tænde og slukke for ovnen, med en vippekontakt. Når ovnen tændes, vil lampen og blæseren tænde med det samme, og være tændt konstant, mens varmelegemernes styring afhænger af relæ 2. Relæ 2 er styret af et udgående digitalt PWM-signal fra PLC'en, der er baseret på det analoge input fra temperatursensor. Spændingen måles hen over termistoren, og modtages af PLC'en som et signal i spænding, der omregnes til modstand, og så en temperatur. Så længe den ønskede temperatur ikke er nået, vil outputtet, der styrer relæ 2, være tændt på 100%. Den lille røde diode, lyser når det varierende signal, der styrer relæ 2, er tændt, og indikerer, at ovnen ikke har nået sin temperatur endnu. Dioden ville blinke når temperaturen er nået, og PLC'en nu blot regulerer temperaturen ud fra det valgte sætpunkt.

4.5 Simulering og PI-regulering

Der er valgt at arbejde med PI-regulering, da det ses i simuleringen, at differential-leddet har en meget lille betydning for regulering, dette ses på figur 17. Differential-leddets bidrag vil i dette tilfælde forlænge grafen og gøre systemet langsommere. Det ses også ved 600 sekunder at den langsommere reaktionstid fører til et større overshoot, uden at give en fordel på andre områder. Det vælges derfor at udelade differential-leddet, og fortsætte med PI-regulering.

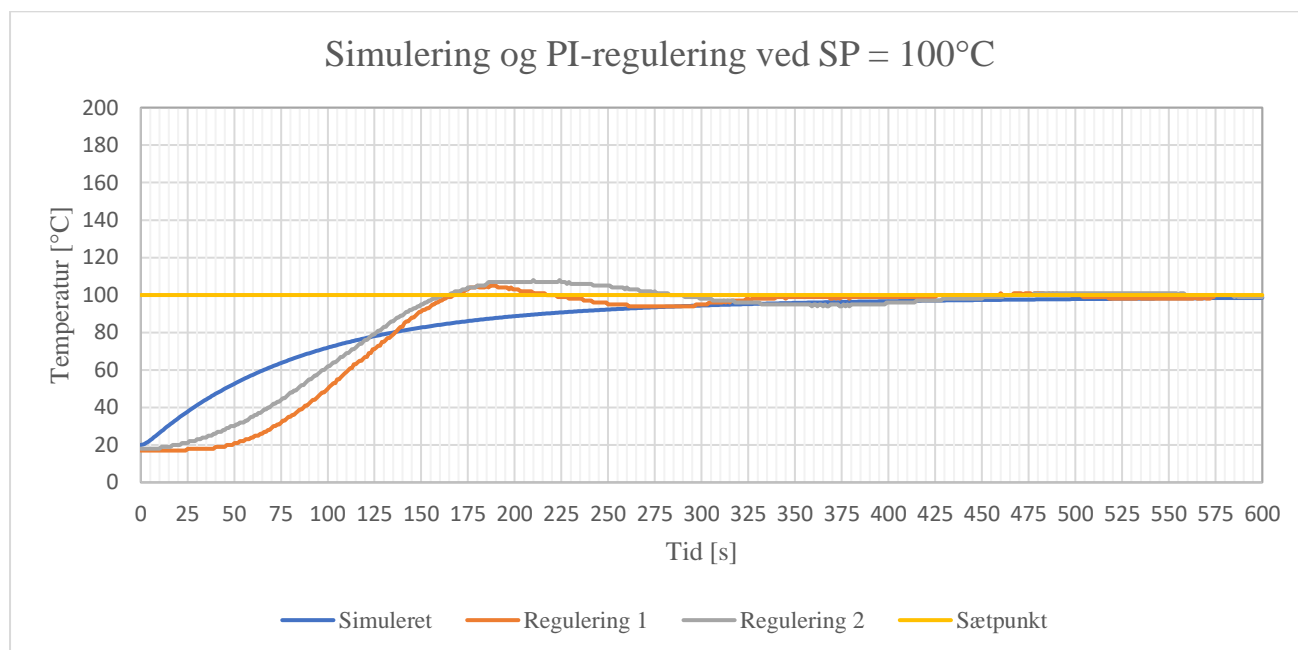


Figur 17: Graf over påvirkning af forskellige D-værdier på den overordnede simulering, hvor $P = 35$ og $I = 280$.

Efter tuning med trial-and-error blev der fundet frem til et proportional-led på 35 og et integral-led på 280. Proportional- og integral-leddene indtastes i tilsvarende variabler i PID-funktions blokken i CCW, og temperatur af ovnen logges i PLC'en og data indsamles. Ud fra det indsamlede data fremstilles tre grafer med forskellige sætpunkter, som var henholdsvis 100°C, 150°C og 180°C.

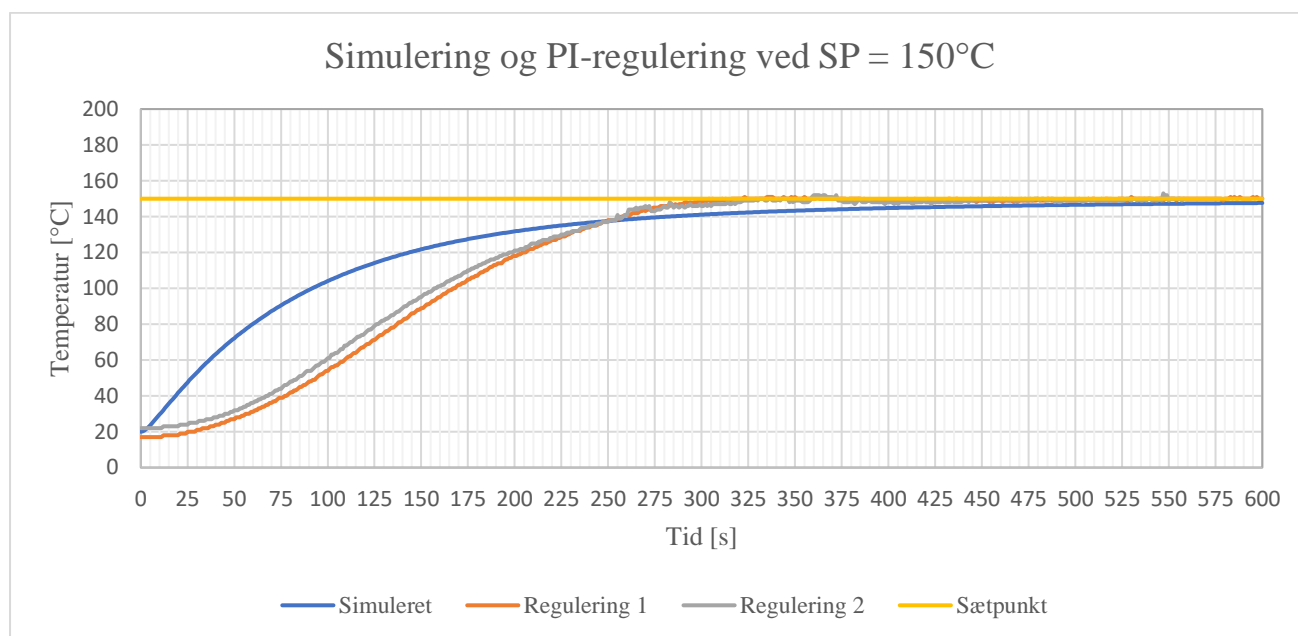
For at validere temperaturforudsigelsen plottes det simuleret data, mod observerede data (Figur 18, Figur 19 og Figur 20). To reguleringer blev lavet ved et sætpunkt på 100°C (Figur 18), ved den første regulering (orange graf) er der en overshoot på 5°C , mens ved regulering 2 (grå graf) er den på 8°C , som ses at være det største overshoot, dog justerer systemet hurtigt ind.

I forhold til simuleringen følger den ikke helt virkeligheden, da det ses at i starten, varmer ovnen langsommere op end simulering. Samtidig kommer temperaturen i ovnen efterfølgende højere op end simuleringen. Det ses dog at alle tre grafer rammer sætpunktet, hvor det tager omkring 400 sekunder før simulering rammer sætpunktet, og omkring 300 sekunder for reguleringen.



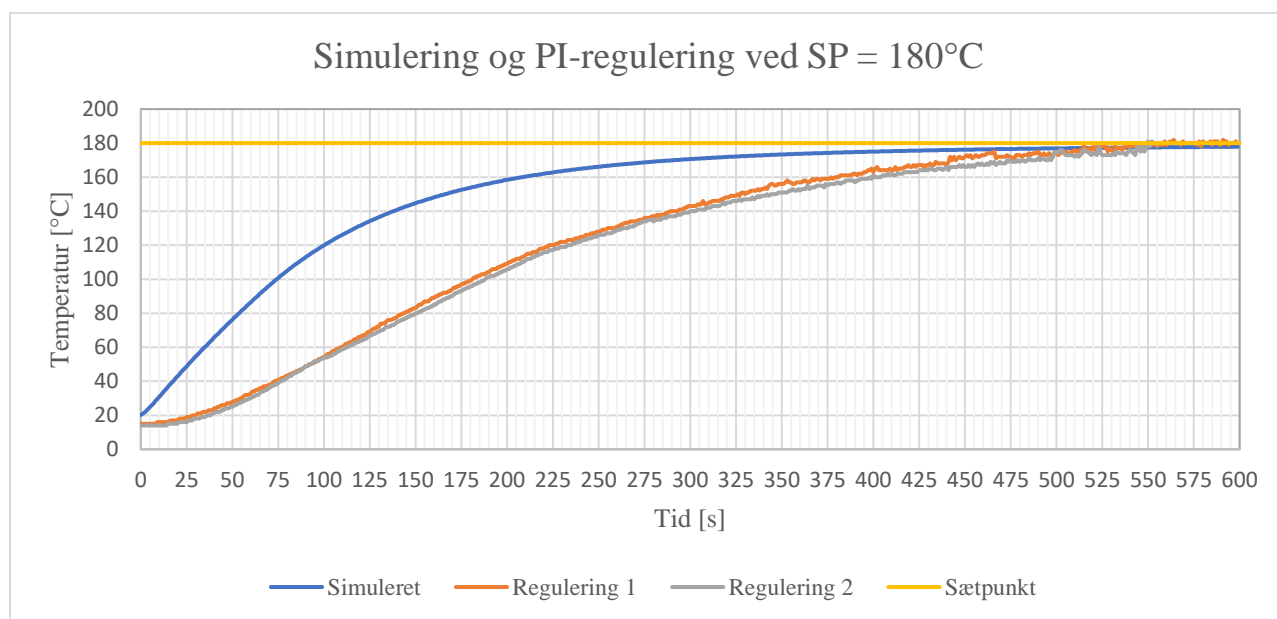
Figur 18: Simulering (blå graf) og de to PI-reguleringer (orange og grå graf) ved sætpunktet = 100°C (gul streg).

På Figur 19 ses regulering og simulering for 150°C, hvor den orange og grå graf viser reguleringen, og den blå graf er simuleringen i Simulink. De to reguleringer ligger pænt op ad hinanden, dog er regulering 1 en smule langsommere i starten af opvarmningen i forhold til regulering 2. De ender begge to på sætpunktet 150°C med et lille overshoot på 1°C ved regulering 1 og på 3°C ved regulering 2. Det ses at både de to reguleringer og simuleringen ender på sætpunktet, hvor simuleringen bruger omkring 500 sekunder inden den rammer sætpunktet, men i forhold til reguleringen tager det kun omkring 300 sekunder, før sætpunktet er nået.



Figur 19: Simulering (blå graf) og PI-regulering (orange og grå graf) ved sætpunktet = 150°C (gul streg).

Figur 20 viser simulering og reguleringen ved et sætpunkt på 180°C , hvor det samme gælder med graferne, orange og grå graf er regulering og blå graf er simuleringen. Her ses det at de to reguleringer stort set ligger oveni hinanden, modsat simuleringen, som i starten ligger over reguleringsgraferne, men de rammer alle tre sætpunktet til sidst. Simuleringsgrafen kommer i dette tilfælde hurtigst op i temperatur, hvor det tager en del længere tid for reguleringen at komme op i temperatur, dog ses det at de to reguleringsgrafer rammer sætpunktet først, hvor der er et overshoot på 2°C ved regulering 1 og 1°C ved regulering 2.



Figur 20: Simulering (blå graf) og PI-regulering (orange og grå graf) ved sætpunktet = 180°C (gul streg).

Generelt for alle grafer gælder det at formen på reguleringsgraferne ligner 2. ordens systemer på grund af den hale eller dødtid, der er i starten af grafen. I modsætning til dette minder formen på simuleringgraferne 1. ordens systemer.

5. Diskussion

I dette projekt var målet at designe et stabilt temperaturkontrollsystem i en ovn ved at finde de optimale værdier for forstærkning, K_p , integraltiden, τ_i , samt differential-tiden, τ_D ved PID-regulering. Gennem en række simuleringer af systemet valgtes det at arbejde med PI-regulering. Grunden til at der arbejdes med PI-regulering fremfor PID-regulering skyldes, at ovnen i forvejen er et langsomt reagerende system. Dermed aftager differential-leddets betydning (Figur 17), da der ikke arbejdes med et system, der skal dæmpes yderligere. Derudover vil differential-leddet også forstærke målestøj på sensorens signal, hvilket vil have en negativ påvirkning på reguleringen. Under alle reguleringer er blæseren i ovnen tilsluttet for at få varmen cirkuleret, med henblik på at mindske dødtiden i systemet, da blæseren giver en homogen temperatur i hele ovnen. Dog på figur 18, 19 og 20 kan den lille hale på reguleringsgraferne være grundet dødtid, hvilket der burde have været taget hensyn til under karakteriseringen af ovnen. Dette kan have indflydelse på at regulerings- og simuleringgraferne ikke stemmer overens.

Ved simulering i Simulink blev proportional-leddet bestemt til 35, og integral-leddet til 280 ved brug af trial-and-error tuning, hvorefter disse værdier bruges i CCW. Ved regulering ses det dog at simulering ikke stemmer overens med virkeligheden, da simulering er lavet på baggrund af karakteriseringen af sensoren og ovnen. Her vides det ikke om sensoren og ovnen opfører sig anderledes i reguleringen i forhold til tolerancen på modstanden (R_1) i spændingsdeleren. Derudover er karakteriseringen af ovnen kun lavet på baggrund af en måling, hvilket ikke er optimalt, disse målinger skulle have lavet tre gange ligesom karakteriseringen af sensoren. Ved karakterisering af ovnen, ses det på Figur 11 at der er en afvigelse fra de målte temperaturer til de beregnede, som kan være dødtid, dog bliver der ikke taget hensyn til det i simulering. Dette kan have en betydning for at reguleringen og simuleringen ikke følger hinanden.

På figur 18 ses reguleringen med sætpunkt på 100°C, hvor der er et større overshoot i virkeligheden end i simuleringen, og ovnen opnår de 100°C hurtigere end simuleringen viser. Dette overshoot kan skyldes at hele systemet er tunet med et sætpunkt på 200°C, og dermed vil simuleringen passe dårligere, jo længere væk det aktuelle sætpunkt kommer fra tuningen. Derudover starter regulering 1 ved 17°C og regulering 2 ved 18°C, hvor der går henholdsvis 46 og 17 sekunder før de rammer 20°C, som simuleringen starter i. Ved reguleringen på 150°C (figur 19) stemmer simuleringen dog bedre overens, end ved reguleringen på 180°C (figur 20), hvilket ikke stemmer med at tuningen af simuleringen er lavet på baggrund af 200°C. Her burde reguleringen ved 180°C passe bedst. Grunden til at

de tre grafer på figur 19 passer godt sammen kan skyldes, at når ovnen tændes, og den er kold, er PWN-signalet på 100%, og varmelegemerne varmer alt det de kan. På den måde stiger temperaturen meget i starten, og kommer dermed relativt hurtig op på de 150°C, ligesom simuleringen viser. Dog kræver det væsentlig mere energi at komme endnu højere op i temperatur, hvilket kan ses på reguleringen ved 180°C (figur 20), hvor simuleringen er hurtigere end reguleringen. Ved simuleringen er starttemperaturen sat til 20°C, hvor starttemperaturen i regulering 1 er 15°C, og for regulering 2 er 14°C, hvor det tager henholdsvis 28 og 36 sekunder før de rammer 20°C. Dette giver en forskydning af reguleringsgrafen. Dette sammenholdt med at det kræver væsentlig mere energi at komme op i de højere temperaturer, gør at det tager længere tid end hvad simuleringen viser. På baggrund af dette, viser det at det er svært at simulere et virkeligt system, dog kan simuleringen give en indikation af, hvordan systemet vil reagere. I simulering og regulering er der ikke taget højde for varmeoverførsel mellem sensoren og bagerist, som sensoren var placeret på eller mellem varmelegemerne og luften. Dette har også en betydning i forhold til forskellen mellem simulering og regulering, dog i mindre grad, da blæseren er tændt.

Det vides dog ikke om værdierne på proportional- og integral-leddet er de optimale i forhold til reguleringen. Her ville et højere proportional-led ikke nødvendigvis have givet en hurtigere respons i systemet, da til trods for en hurtigere opnåelse af sætpunkt ved et større proportionalled, i simulering kan ovnens varmelegeme ikke operer ved højere end 1800W. Et større integral-led kan have reguleret temperaturen lidt hurtigere, men dette synes ikke at være nødvendigt, da systemet i forvejen er langsomt reagerende, men justerede temperaturen hurtigt, da der er få svingninger i temperaturen under reguleringen efter sætpunktet er ramt. Værdierne på proportional- og integral-leddet er dog noget, der kunne have været testet yderligere for eventuelt at få en bedre regulering.

I projektet var der en del uforudsigelige problemstillinger, som ledte til begrænsninger på tiden til at optimere reguleringen. Her er der blandt andet tale om en krybestrøm mellem PLC'en og ovnen, som prægede hele projektet. Denne krybestrøm gav forstyrrelser i signalet sendt til CCW, når sensoren fik forbindelse med metallet i ovnen, som blev løst ved at blot at bytte rundt på ledningen der leverede spænding til termistoren.

Reguleringen ved de tre temperaturer udføres ved samme proportional- og integral-led, for at kunne sammenligne reguleringerne på tværs af temperaturer. Disse værdier er fundet ved tuning efter trial-and-error, da der ikke kunne opnås stående svingninger, hvilket skal bruges for at lave en mere præ-

cis tuning. De stående svingninger kunne ikke opnås, da afkølingen er meget langsommere end opvarmningen, hvilket spiller en væsentlig rolle i forskellen mellem simulering og regulering i virkeligheden.

I dette projekt bevises det, at det er muligt at regulere temperatur af en ovn ved PI-regulering. Dog vil der være mulighed for at optimere endnu mere end der er forsøgt i dette projekt ved at være opmærksom på nogle af de udfordringer og fejlkilder, der har været i projektet. Dette vil kunne resultere i en bedre regulering, som effektiviserer energiforbrug endnu mere.

6. Konklusion

På baggrund af forsøgene udført undervejs i projektet kan det konkluderes, at det er muligt at designe et stabilt temperaturkontrolsystem. Det var muligt at regulere temperaturen af en ovn ved at justere forstærkning, K_p , integraltiden, τ_i , samt differential-tiden, τ_D i en PID-controller. Det kan yderligere konkluderes at PI-regulering gav den bedste regulering, da simuleringen viste, at differential-leddet havde meget lille betydning, og ikke bidrog til bedre regulering af systemet. Trial-and-error viste sig at være den mest anvendelig metode til at tune systemet, da der ikke kunne opnås stående svingninger. Ved Trial-and-error tuning blev der fundet frem til en proportional-værdi på 35, og en integral-værdi på 280 gav en tilfredsstillende regulering. De simulerede grafer afviger fra reguleringen, grundet blandt andet starttemperatur, dødtid og tolerance på modstande. En mere systematisk tuning og flere forsøg, kunne have givet en mere effektiv og præcis regulering af ovnen. Dog kan det konkluderes ud fra resultaterne af dette projekt, at det er muligt at regulere temperaturen forholdsvis præcist og effektivt i en ovn ved brug af PI-regulering, som er tunet ved trial-and-error metode.

7. Perspektivering

Til dette projekt er der arbejdet med PID- eller nærmere PI-regulering. Resultaterne kan fremadrettet bruges til at arbejde videre med, og teste flere forskellige sammensætninger af proportional-, integral- og differential-leddene. På denne måde kan der eventuel opnås en bedre og hurtigere regulering af temperaturen i ovnen. En anden måde, der kan opnås bedre regulering, er at lave en mere præcis karakterisering af ovnen med flere målinger, og en kalibrering af sensoren i et højere temperaturinterval, så den ikke skal ekstrapoleres.

Alternativer til PID-regulering er for eksempel Feed Forward, Fuzzy Logic eller Model predictive control (MPC). Disse teknikker anvendes dog oftest i andre tilfælde end det der arbejdes med i rapporten, her er PID at foretrække på grund af simpliciteten. Fuzzy logic anvendes for eksempel i luksusriskogere (Zojirushi) for at få et ensartet resultat hver gang der koges ris. I fremtidige forsøg kunne det være interessant at undersøge om en af disse typer af regulering ville have fordele over PID.

Temperaturkontrollsystemer spiller i stigende grad en vigtig rolle i industriel produktion, hvor energibesparelse og minimering af miljøpåvirkning er et yderst relevant emne for industrierne. Dette indleder til undersøgelse af, hvordan man kan opnå optimale temperaturregulering ved PID-regulering, hvor temperaturen kan opretholdes i systemet og mindske temperatursvingninger. En forbedring af temperaturstyringen kan gøre systemet mere effektivt, hvilket sparer på energiomkostningerne og muliggør en højere produktivitet. Dog kan nogle processer være vanskelige at regulere med almindelig PID-regulering, hvis systemet har flere udgangssignaler som for eksempel temperatur, tryk, og flow. Disse størrelser skal reguleres i forhold til hver deres sætpunkt, hvilket gør reguleringen mere vanskelig.

8. Referencer

- Automation, R. (2022). Programmable Controllers General Instructions. *General Instructions*, 651.
- Barr, M. (2001). Pulse Width Modulation, . *Embedded Systems Programming*, 103-104.
- CCW. *CCW 11,0 Help: PID-instruction*. In
- Chen, C. (2009). Evaluation of resistance–temperature calibration equations for NTC thermistors. *Measurement*, 42(7), 1103-1111.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2009.04.004>
- Dale E. Seborg, T. F. E., Duncan A. Mellichamp, Francis J. Doyle III. (2016). *Process Dynamics and Control* (4 ed.). Wiley.
- Ding, Y.-X., Cheng, S., Huang, Y.-T., & Hong, D.-Y. (2022). Deep PID Neural Network Controller for Precise Temperature Control in Plastic Injection-moulding Heating System. *IFAC-PapersOnLine*, 55(27), 114-119. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.497>
- EUROPA-KOMMISSIONEN. (2021). *KOMMISSIONENS HENSTILLING (EU) 2021/1749 af 28. september 2021 om energieeffektivitet først: fra principper til praksis — retningslinjer for og eksempler på gennemførelsen af princippet i beslutningstagningen inden for energisektoren og andet* Den Europæiske Unions Tidende, Bruxelles.
- Jiang, W., & Jiang, X. (2012). Design of an Intelligent Temperature Control System Based on the Fuzzy Self-Tuning PID. *Procedia Engineering*, 43, 307-311.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.053>
- Kyoung Mi Moon, E.-B. K., 2 Bonggi Lee,^{3,*} and Choon Young Kim^{4,*}. (2020). Trends in Controlling the Enzymatic Browning of Fruit and Vegetable Products. I. *Molecule*, Jun; 25(12). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7355983/>
- Pro, R. Solid State Relays Datasheet 9225208. In *PDF*.
- Rana, K. P. S., Kumar, V., Dagar, A. K., Chandel, A., & Kataria, A. (2018). FPGA Implementation of Steinhart–Hart Equation for Accurate Thermistor Linearization. *IEEE Sensors Journal*, 18(6), 2260-2267. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2795098>
- Rao, R. J. M. *What are Analog and Digital Signals? Differences, Examples*.
<https://instrumentationtools.com/what-are-analog-and-digital-signals-differences-examples/>
- Smillie, G. (1999). *Analogue and digital communication techniques*. Elsevier.
- White, D. (2005). Technical Guide 10-A Simple Narrow-Band Thermistors Themometer. *Measurement Standards Laboratory of N New Zealand*.

Xu, Y., & Peet, Y. T. (2021). Effect of an on/off HVAC control on indoor temperature distribution and cycle variability in a single-floor residential building. *Energy and Buildings*, 251, 111289. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111289>

Zojirushi. *Neuro Fuzzy® Rice Cooker & Warmer NS-ZCC10/18*. (s.d.). Zojirushi. Retrieved 14-12-2022 from

9. Procesevaluering

Gruppemedlemmernes forskellige kompetencer har bidraget til, at gruppen har fået udført gode forsøg, og afleveret en gennemarbejdet rapport. Gruppemedlemmer har haft forskellige roller og ansvarsområder, hvilket har fungeret godt, da det har medvirket til en overordnet struktur.

Som det første i projektet blev der udarbejdet en samarbejdsaftale (bilag 10.1), hvor der forventningsafstemmes, så hele gruppen har været enige om forventninger til hinanden, og hvordan eventuelle konflikter skulle håndteres. Dog har det ikke været nødvendigt bruge reglerne fra samarbejdsaftalen, da projektet overordnet har forløbet problemfrit. Gruppen har også udarbejdet en tidsplan (bilag 10.2), for at skabe et bedre overblik, dog er den ikke fulgt, grundet udfordringer undervejs i projektet.

Gennem projektet har det været tydeligt, at et godt samarbejde og kommunikation er nøglen til et godt gruppearbejde. Samarbejdet i gruppen har været godt, og alle gruppemedlemmer bidraget til projektet. Gennem hele forløbet har der været en god stemning i gruppen, og humøret har generelt været godt. Gruppen har haft et velfungerende samarbejde, og alle er tilfredse med det projekt, der er afleveret. Gruppen har sørget for at ikke gøre arbejdsbyrden for stor ved at uddelegere opgaverne, hvilket har givet større overskud til de forskellige opgaver og forsøg.

Fra dette projekt har gruppen tilegnet sig ny viden og erfaring i forhold til at udarbejde et projekt i en større projektgruppe. Det der kan tages videre fra dette projekt, er hvor afgørende en rolle vidensdeling spiller gennem hele projektet.

Det gælder blandt andet det praktiske omkring ovnen, i forhold til tilslutningen af ledningerne, og hvordan systemet hænger sammen. Her har Nicolai haft en fordel, da han har læst to år på softwareingeniøruddannelsen. Resten af gruppen har været mere udfordret på forståelse, da det hele var helt ny viden. Dette har givet den udfordring i gruppen, at der har været en ulige fordeling af viden, hvilket var en udfordring da Nikolai var syg en dag. Dette gjorde at gruppen blev sat et skridt tilbage i forhold til tidsplanen og processen. Selvom emnet var helt nyt for gruppen fra begyndelsen, lykkedes det deltagerne at tilegne sig ny viden gennem kommunikation, nysgerrighed og unikke personlighedstræk.

10. Bilag

10.1 Samarbejdsaftale

Samarbejdsaftale

Gruppens medlemmer

Nicolai Skjødt, 201703432

Oksana Kantsyber, 202009392

Marie Froberg, 202107810

Sara Tjagvad Madsen, 202105762

Jonathan Funk Neumann, 202106429

Overordnede mål

Rapportens kvalitet skal være så høj, at alle gruppemedlemmer skal føle sig trygge og kunne bestå eksamen med plads til fejl under den mundtlige eksamen. Det forventes at alle individuelt leverer deres bedste arbejde.

Hvert enkelt gruppemedlem skal kunne forsvare og forstå rapporten inkl. de enkelte dele af processen.

Alle har ansvar for alles opgaver.

Mødetider og dagsorden

Gruppen arbejder IKKE med akademisk kvarter. Kommer man 5 min eller mere for sent til aftalte møder, er udløser dette en kageskyldner. Udeblivelse fra projektgruppe møde, uden at give lyd fra sig, vil resultere i en kageskyldner. Udeblivelse fra vejleder møde, uden at give lyd fra sig, vil resultere i kageskyldner. Hvis en given person får 3 eller flere kageskyldnere, tages dette op til et gruppe-møde,

hvor vedkommende får mulighed for at forklare sig, og en løsning findes.

Respekteres løsningen ikke, vil det blive bragt videre til vejleder, og kan der stadig ikke findes en løsning, og såfremt alle i gruppen er enige, kan et medlem ekskluderes fra gruppen. Alle i gruppen skal fysisk deltage i fælles møder, hvis andet ikke er aftalt. Aftaler skal overholdes, og ellers skal gruppen informeres, ved hindringer. Pludselig sygdom på selve dagen skal gruppen informeres ASAP på Messenger.

Som udgangspunkt er vi fælles om grupperoller og stemmer ved uenighed.

Ordstyrer: Jonathan

Fast referent: Oksana

Brug af redskaber

Dokumenter laves og deles i OneDrive Logbog til forsøgsgangene.

Kommunikation: Messenger-gruppe

Svartid: Det forventes der bliver taget holdning og svaret i bedste forstand på alle spørgsmål, indenfor rimelighedens grænser.

Kvalitetskontrol

Vi læser alle hinandens udarbejdelser igennem og stiller spørgsmål. På møder aftales der deadlines for gennemlæsning af andres opgaver. Ved rettelser, kommentarer eller spørgsmål, noteres det, og tages op til næste gruppemøde.

Valg af ord og eventuelle forkortelser skal være ensartede gennem hele rapporten.

Skrifttype: Times New Roman

Overskrifter: Brug Words indbyggede overskriftsmodeller.

Skriftstørrelse: 12

Linjeafstand: 1.5

Billede/tabel/andet tekster: De skal indsættes det samme sekund du lægger billedet op.

Fodnoter: Litteraturlisteautomaten anvendes til fodnoter. De skal sættes ind lige så snart kilden anvendes

Sprog: Gruppen bruger ikke, jeg, vi, os, man, og generelle forkortelser (vha. F.eks. mm.)

Konflikthåndtering

Hvis der er et problem eller en konflikt, er det alles ansvar, at konflikten bliver løst. Vi skal sige det utvetydigt, være åbne for en forklaring, samt have eksempler og løsningsforslag.

Det er hele gruppens ansvar, at gruppen trives som enhed og som enkeltperson. Beslutninger træffes på baggrund af enighed, ellers demokratisk. Hvis ikke dette kan opnås, holdes en kort pause, hvor alle medlemmer får tænketid. Gruppen skal acceptere, at der er et problem, allerede når ét gruppe-medlem pointerer et problem

Man kan tage problemet op ved mødets start, og en løsning SKAL findes.

Alle i gruppen skal færdiggøre den pågældende opgave, man er tildelt. Ved overraskelser i omfanget eller sværhedsgraden af opgaven informeres de andre gruppe-medlemmer og en løsning findes.

Underskrift

“Vi lover hermed at respektere ovenstående aftale. Aftalen danner basis for vores samarbejde”

Dato for underskrift 15/09-2022

Nicolai Skjødt, 201703432

Nicolai Skjødt

Oksana Kantsyber, 202009392

Oksana Kantsyber

Marie Froberg, 202107810

Marie Froberg

Sara Tjagvad Madsen, 202105762

Sara Tjagvad Madsen

Jonathan Funk Neumann, 202106429

Jonathan Funk Neumann

10.2 Tidsplan

Uge 45	Mandag d. 7	Tirsdag d. 8	Onsdag d. 9	Torsdag d. 10	Fredag d. 11	Lørdag d. 12	Søndag d. 13
				Forsøg			
Uge 46	Mandag d. 14	Tirsdag d. 15	Onsdag d. 16	Torsdag d. 17	Fredag d. 18	Lørdag d. 19	Søndag d. 20
		Biokemi	Fødevarekemi	Forsøg	KEO		
Uge 47	Mandag d. 21	Tirsdag d. 22	Onsdag d. 23	Torsdag d. 24	Fredag d. 25	Lørdag d. 26	Søndag d. 27
	Rapport - hjemme	Biokemi	Fødevarekemi	Forsøg	KEO		
Uge 48	Mandag d. 28	Tirsdag d. 29	Onsdag d. 30	Torsdag d. 1	Fredag d. 2	Lørdag d. 3	Søndag d. 4
	Rapport - hjemme	Biokemi	Forsøg	Forsøg	KEO		
			Rapport				
Uge 49	Mandag d. 5	Tirsdag d. 6	Onsdag d. 7	Torsdag d. 8	Fredag d. 9	Lørdag d. 10	Søndag d. 11
	Rapport – hjemme	Biokemi	Rapport	Rapport	Færdig med skrivning		
Uge 50	Mandag d. 12	Tirsdag d. 13	Onsdag d. 14	Torsdag d. 15	Fredag d. 16		
		Rette	Rette		AFLEVER kl. 12		

10.3 inputs/outputs på PID-regulator

1. Input: Enable - aktiverer kontrolleren, med proces inputs.
2. Input: PV (Process value) kommer fra et sensorsystem - temperatur sensor.
3. Input: sætpunktet (set point), som er den værdi PID-controlleren vil forsøge at opnå ud fra information givet af PV. Under ideelle forhold, vil PV og SV være identiske.
4. Input: Automanual – processen styres automatisk af PID controlleren og ikke CVmanual.
5. Input: CVmanual – styrings input til manual operation ($CV_{min} < CV_{manual} < CV_{max}$).
6. Input: CVmin (control value) minimum limit.
7. Input: CVmax (control value), maximum value
8. Input: Gains – et sted, hvor P, I, D konstanterne indsættes. Disse værdier regulerer ændringer i systemet for at minimere fejlen mellem sætpunktet og PV.
9. Input: Control – kontroller direkte/inverse regulering, med direkte regulering vil controllernes output stige når sensorens input stiger, og med inverse regulering vil controllerens output falde, når sensorens input stiger. I dette tilfælde benyttes den inverse regulering.
10. Output: Active – status af PID-controller, fortæller om den er aktiv eller inaktiv.
11. Output: CV output.
12. Output: AbsoluteError – er forskellen mellem PV og SP.
13. Output: Error – indikerer at der er en fejl.

14. Output: ErrorID – en numerisk identifikation af fejlen.

10.4 inputs/outputs på PWM-regulator

1. Input: Enable – True/False aktivering blokken, og bestemmer om der skal gøres noget ved signalet, baseret på Sts status.
2. Input: On – True/False aktivering af PWM-signalet, med nuværende konfiguration.
3. Input: Freq – Den valgte frekvens som systemet skal operere ved.
4. Input: DutyCycle - Dutycycle er forholdet mellem pulsbredden og pulsperioden, og her vores output fra vores PID-regulator skal sættes på.
5. Input: Chtype – Her vælges om systemet skal være Indlejret, et plugin eller en udvidelse.
6. Input: ChSlot - Her kan embedded kun vælges, og det passer fint, da vores system også er embedded.
7. Input: ChNum – hvilken kanal PWM-signalet skal være på.
8. Output: Sts – giver en status af PWM-blokken.

10.5 Rå-data fra kalibrering af sensor

Temperatur (°C)	1/T (K)	kOhm(R)	Log(R)	Spænding (V)	mA
0,00	0,003660992129	281,000	2,4487063	4,06000	0,014448399
10,40	0,003526714865	177,200	2,2484637	2,61600	0,01476298
15,10	0,003469210755	150,000	2,1760913	2,13200	0,014213333
20,00	0,003411222923	126,500	2,1020905	1,75800	0,013897233
25,00	0,003354016435	102,200	2,0094509	1,41900	0,01388454
30,00	0,003298697015	84,300	1,9258276	1,16800	0,013855279
35,00	0,003245172805	66,100	1,8202015	0,93900	0,014205749
40,30	0,003190301483	53,400	1,7275413	0,77500	0,014513109
45,30	0,003140210394	43,000	1,6334685	0,63300	0,01472093
50,00	0,003094538140	37,500	1,5740313	0,53400	0,01424
55,20	0,003045530684	29,000	1,4623980	0,43900	0,015137931
60,10	0,003000750188	24,320	1,3859636	0,37100	0,015254934
65,00	0,002957267485	20,290	1,3072820	0,31200	0,015377033
70,20	0,002912479977	17,150	1,2342641	0,26200	0,015276968
74,90	0,002873150409	14,350	1,1568519	0,22300	0,01554007
79,90	0,002832459992	12,200	1,0863598	0,18800	0,015409836
90,00	0,002753683051	11,920	1,0762763	0,13100	0,010989933
100,00	0,002679887445	7,800	0,8920946	0,09470	0,012141026
149,00	0,002368826247	1,655	0,2187980	0,02500	0,01510574
195,00	0,002136067500	0,565	-0,2479516	0,00760	0,013451327
245,00	0,001929943067	0,231	-0,6373291	0,00240	0,010412148

10.6 Rå-data fra karakterisering af sensor

Måling 1

Tid [s]	Temp. [°C]	Normaliseret temp. [°C]	Beregnet temp. [°C]	Varians
0	21	0	0	0
2	56	35	40,37	28,81
3	78	57	51,93	25,72
4	83	62	59,99	4,04
5	87	66	65,61	0,15
6	91	70	69,53	0,22
7	92	71	72,26	1,58
8	94	73	74,16	1,35
9	95	74	75,49	2,22
10	96	75	76,42	2,00
11	97	76	77,06	1,12
12	98	77	77,51	0,26
13	98	77	77,82	0,68
14	99	78	78,04	0,001
15	99	78	78,20	0,04
16	99	78	78,20	0,09
17	100	79	78,38	0,39
18	100	79	78,42	0,33
19	100	79	78,46	0,29
20	100	79	78,49	0,26
21	100	79	78,51	0,24
22	100	79	78,52	0,23
23	100	79	78,53	0,22
24	100	79	78,53	0,22
25	100	79	78,54	0,21
26	100	79	78,53	0,21
				= 70,91

Måling 2

Tid [s]	Temp. [°C]	Normaliseret temp. [°C]	Beregnet temp. [°C]	Varians
0	21	0	0	0
1	41	20	25,26	27,66
2	63	42	42,43	0,18
3	80	59	54,1	24,02
4	85	64	62,03	3,88
5	89	68	67,42	0,33
6	91	70	71,09	1,18
7	93	72	73,58	2,49
8	95	74	75,27	1,61
9	96	76	76,42	2,02
10	97	76	77,20	1,45
11	98	77	77,73	0,54
12	98	77	78,1	1,20

13	99	78	78,34	0,12
14	99	78	78,51	0,26
15	100	79	78,62	0,14
16	100	79	78,7	0,09
17	100	79	78,75	0,06
18	100	79	78,79	0,05
19	100	79	78,81	0,04
20	100	79	78,83	0,03
21	100	79	78,84	0,03
22	101	80	78,85	1,33
23	100	79	78,85	0,02
24	100	79	78,86	0,02
25	101	80	78,86	1,30
26	101	80	78,86	1,30
				= 71,36

Måling 3

Tid [s]	Temp. [°C]	Normaliseret temp. [°C]	Beregnet temp. [°C]	Varians
0	20	0	0	0
1	46	26	30,15	17,18
2	75	55	48,64	40,41
3	81	61	59,99	1,01
4	85	65	66,96	3,84
5	90	70	71,23	1,52
6	92	72	73,86	3,45
7	94	74	75,47	2,15
8	95	75	76,45	2,11
9	96	76	77,06	1,12
10	97	77	77,43	0,19
11	97	77	77,66	0,44
12	98	78	77,80	0,04
13	98	78	77,89	0,01
14	99	79	77,94	1,13
15	99	79	77,97	1,06
16	100	80	77,99	4,04
17	100	80	78,00	3,99
				= 83,68

10.7 Hele CCW-systemet

