



CHALMERS



Inbyggt styrsystem för elektrisk genomströmningvärmare

Examensarbete inom högskoleprogrammet Mekatronik

MIKAEL BOMAN
TONY MILLBERG

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg 2026

www.chalmers.se

EXAMENSARBETE 2026

**Inbyggt styrsystem för
elektrisk genomströmningsvärmare**

MIKAEL BOMAN
TONY MILLBERG



CHALMERS

Institutionen för elektroteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2026

Inbyggt styrsystem för elektrisk genomströmningsvärmare
MIKAEL BOMAN
TONY MILLBERG

© MIKAEL BOMAN, TONY MILLBERG, 2026.

Handledare: Simon Jeklind Dybeck, Vyse Tech AB
Examinator: Veronica Olesen, Elektroteknik

Examensarbete 2026
Institutionen för elektroteknik
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Bild på den senaste prototypen med examensarbetets reglering.

Skriven i L^AT_EX
Göteborg 2026

Förord

Detta examensarbetet är utfört av två mekatronikstudenter på Chalmers tekniska högskola hos institutionen för elektroteknik. Arbetet utfördes på företaget Vyse tech AB.

Vi vill tacka Johannes Fagerström och vår handledare Simon Jerklind Dybeck, på Vyse tech, för att de gett deras tillit till oss att utföra arbetet. Vi vill även tacka Boid AB för att de har tillåtit oss att använda deras lokaler vid behov. Vi vill också rikta ett stort tack till Veronica Olesen, vår handledare och examinator på institutionen.

Mikael Boman och Tony Millberg, Göteborg, Juni 2026

Inbyggt styrsystem för elektrisk genomströmningsvärmare
MIKAEL BOMAN, TONY MILLBERG
Institutionen för elektroteknik
Chalmers tekniska högskola

Sammanfattning

Vyse tech AB utvecklar en produkt som ska minska vatten- och energiförbrukningen hos kranar. Istället för en centraliserad värmepanna värmer produkten vattnet precis innan det når kranen. I denna rapport redovisas utvecklingsprocessen för styrsystemet till en vattenvärmare samt de resultat som framkommit under examensarbetet.

Det har funnits två mål med examensarbetet. Det första har varit att utveckla och implementera regleringen av temperaturen i värmeelementet som ska finnas i produkten. Det andra har varit att undersöka och eventuellt eliminera en temperaturdipp som kan ske i början av vissa spolningar av kranen. För att uppnå dessa mål har en iterativ process utförts där tester och resultat kontinuerligt utvecklats.

Resultatet av examensarbetet är att den framtagna regulatorn snabbt värmer upp vattnet och har eliminerat översväng i det mest förekommande driftsceneriet. Temperaturdippen är antingen kraftigt reducerad eller helt eliminerad beroende på hur produkten är installerad.

Nyckelord: Reglerteknik, styrsystem, vattenuppvärmning, energieffektivitet, värmeelement.

Abstract

Vyse tech AB is developing a product that will reduce water and energy consumption in faucets. Instead of a centralized boiler, the product heats the water just before it reaches the faucet. This report describes the development process for the control system for a water heater and the results that emerged during the degree project.

There have been two goals with the degree project. The first has been to develop and implement the control system of the temperature in the heating element that will be in the product. The second has been to investigate and possibly eliminate a temperature dip that may occur at the start of certain flushes of the faucet. To achieve these goals, an iterative process has been carried out where tests and results have been continuously developed.

The result of the degree project is that the developed control system quickly heats the water and has eliminated overshoot in the most common operating scenario. The temperature dip is either greatly reduced or completely eliminated depending on how the product is installed.

Keywords: Control technology, control system, water heating, energy efficiency, heating element.

Innehåll

Figurer	xi
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Mål	2
1.4 Avgränsningar	2
2 Teknisk Bakgrund	3
2.1 Parameterstyrning	3
2.2 Anti-windup	3
2.3 Framkoppling	4
3 Setup	6
3.1 Ombyggnad av testbädden	8
4 Metod	10
5 Riskanalys	12
5.1 Farlig spänning	12
5.2 Vatten och El	12
5.3 Halkrisk	12
6 Genomförande	13
6.1 Analys av befintlig driftdata	13
6.2 Stegsvarsanalys	13
6.3 Modell från stegsvarsanalys	14
6.4 Skapande av regulatorer	16
6.4.1 Simulering	16
6.4.2 Lösningsförslag	17
6.5 Implementation av nya regulatorparametrar	17
6.5.1 Förändringar i befintlig kod	18
6.5.2 Lösningssimplementation	18
6.5.3 Jämförelse av lösningar	18
6.5.4 Hantering av restvärme	20

6.6	Förändrad testbädd	23
6.6.1	Nya regulatorparametrar	23
6.6.2	Uppdatering av dipphantering och justerade PI-parametrar . .	24
7	Resultat	26
7.1	Maximalt flöde	26
7.2	Lägre flöden	27
7.3	Dipphantering	28
8	Diskussion	30
8.1	Reflektioner	30
8.2	Utmaningar under examensarbetet	31
8.3	Förslag på vidareutveckling	32
	Litteraturförteckning	I
	Bilagor	I
	A Dipptester	II
	B Fler resultat	III

Figurer

2.1	Ett exempel på hur windup kan påverka ett system.	4
3.1	Tredje versionen av testbädden, där (1) - Kran, (2) - Informations-skärm, (3),(4),(5) - termistorer, (6) - Värmeelement, (7) - Flödesmätare, (8) - Förgrening, (9) - Potentiometer, (10) - Nödstopp/strömbrytare.	6
3.2	Informationsskärmen i effektläge.	7
3.3	Informationsskärmen i temperaturläge.	7
3.4	Illustration hur varmvattnet beter sig efter körningar vid olika orienteringar av värmeelementet. Röd färg indikerar var någonstans restvärmen hamnar efter en körning.	8
6.1	Stegsvaret från ett av scenarierna.	14
6.2	Svårtolkat stegsvar med störningar, där den blå kurvan är mätvärdena medan den svarta och röda kurvorna är två möjliga tolkningar av den blåa kurvan.	15
6.3	Analys av stegsvarets dödtid vid effektändringar under en körning.	15
6.4	Simuleringsresultatet av PI-regulatorer för systemen med hög flöde, mellan flöde och låg flöde på systemet för extremfallet med högt flöde.	16
6.5	Simuleringsresultatet av PI-regulatorer för systemen med hög flöde, mellan flöde och låg flöde på systemet för extremfallet med lågt flöde.	17
6.6	Båda lösningsförslagens hantering av högt flöde.	19
6.7	Båda lösningsförslagens hantering av mellan flöde, där växel låg- respektive höglösning syftar på växellösningen för lågt flöde respektive högt flöde.	19
6.8	Båda lösningsförslagens hantering av lågt flöde.	20
6.9	Test resultat över hur stor temperaturdippen är vid en körning på högflödesfallet med växellösningen och hur mycket temperaturdippen kan reduceras i maximeffekt-fallet.	21
6.10	Skillnaden mellan regulatorn, med och utan dipphanteringen.	22
6.11	Dipphanteringen på lågt flöde med växellösningen.	22
6.12	Ett stegsvar från den tredje versionen av testbädden.	23
6.13	Högflödeskörning på tredje versionen av testbädden med de justerade parametervärdena samt med 75 %-lösningen och 87,5 %-lösningen.	24

6.14	Dipptester för högflödeskörning på tredje versionen av testbädden med de justerade parametervärdena samt med 75 %-lösningen och 87,5 %-lösningen.	25
7.1	Högflödeskörning med originallösningen och den framtagna lösningen på högt flöde.	26
7.2	Lågflödeskörning med originallösningen och den framtagna lösningen på lågt flöde.	27
7.3	Lågflödeskörning med originallösningen och den framtagna lösningen på lågt flöde där temperaturerna är omräknade till den riktiga temperaturen ut ur kranen.	28
7.4	Dipptest med originallösningen och den framtagna lösningen.	29
A.1	Dipptest med lågt flöde.	II
A.2	Dipptest med extra dödtid från säkerhetsåtgärd.	II
B.1	Medelflödeskörning med originallösningen och den framtagna lösningen på medelflöde.	III
B.2	Mycket Lågt flödeskörning med originallösningen och den framtagna lösningen på mycket lågt flöde.	IV
B.3	Oväntad dipp i uppvärmningen innan integraldelen hanterades på rätt sätt.	IV

1

Inledning

Idag är det standard att varmvattnet i kranen värms upp med en värmepanna någonstans i byggnaden. En konsekvens av detta innebär att beroende på hur långt bort kranen sitter från värmepannan, krävs det olika mycket varmvatten innan det kommer ut ur kranen. Detta märks av när kranen behöver spolas en tid innan det kommer varmvatten. Efter användning ligger det varma vattnet kvar i rörledningen och svalnar, vilket leder till att nästa användare återigen kan behöva spola en tid. För att minska på detta slöseri av både vatten och energi bör uppvärmningen av vattnet ske närmare kranen. Om vattnet värms upp precis innan kranen kommer det också minska antalet vattenledningar som krävs till endast en för kallvatten. Vyse tech AB har utvecklat en produktlösning för det beskrivna problemet. I det här examensarbetet presenteras hur regleringen av värmeelementet i prototyplösningen togs fram.

1.1 Bakgrund

Vyse tech utvecklar en elektrisk vattenvärmare som producerar varmt vatten direkt vid tappstället och på detta sätt eliminera energiförluster och spolspill. Systemet kombinerar elektronik, sensorer, styralgoritmer och molnkoppling i en miljö där vatten och starkström möts, vilket ställer höga krav på säkerhet, robusthet och tillförlitlighet.

Vyse tech står inför att ta sin produkt från ett stadie med minimala funktioner för testning och feedback, till en färdig produkt som är redo för försäljning. Ett av stegen i denna processen är att åstadkomma en snabb och stabil reglering av värmeelementet.

Innan examensarbetets start styrdes produkten av en PI-regulator som har stora svängningar i temperaturen under användning. Även stora temperaturdippar kunde uppstå vid start av kranen kort efter en tidigare spolning. När temperaturen går från varmt till kallt och sedan tillbaka till varmt igen upplever användaren att kranen inte fungerar som den ska.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att utveckla och utvärdera centrala delar av det inbyggda system som styr effekten och temperaturregleringen i vattenvärmaren. Arbetet ska bidra till att ta produkten från en fungerande prototyp till en version som närmar sig produktionsmognad.

1.3 Mål

Målet går att dela in i två huvuddelar.

- Utveckla och implementera reglering på temperaturer för vattenflödet utan stora svängningar.
- Undersök om dippen i temperatur som kan uppstå i början av en körning går att eliminera, eventuellt reducera.

1.4 Avgränsningar

Arbetet har följande avgränsningar:

- I examensarbetet ingår inte att ändra den fysiska designen.
- Testning av prototypen kommer inte att ske med olika kranar.
- Testning av prototypen kommer inte ske under olika årstider och därmed olika temperaturer till kranen.
- Allmän användardata kommer inte insamlas under examensarbetets gång.
- Kod kommer inte skapas från grunden eftersom det redan finns kod som examensarbetet kommer att bygga på.

2

Teknisk Bakgrund

I detta kapitel presenteras den tekniska bakgrunden samt teorin till de komponenter och begrepp som används i rapporten.

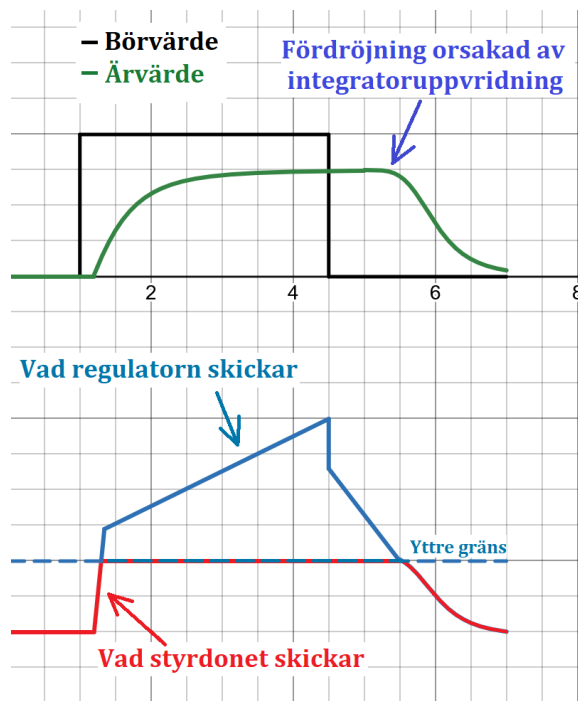
2.1 Parameterstyrning

Ett olinjärt system kan beskrivas som ett system som har oproportionerlig förändring av ärvärden när börvärdet ändras [1]. Exempelvis om en styrsignal dubblas från 10 % till 20 % dubblas ärvärdet men om styrsignalen dubblas från 20 % till 40 % ökar ärvärdet med 50 %.

En metod för att reglera ett olinjärt system är parameterstyrning, även kallat gain scheduling. Metoden innebär att en eller flera av regulatorns parametrar varierar beroende på systemets driftförhållanden. Det vill säga de driftförhållanden som har en direkt påverkan på systemets förstärkning. Alternativt kan en så kallad schedulingvariabel avgöra när regulatorförstärkningen ska vara hög eller låg. I detta fall agerar variabeln som en gräns som avgör när regulatorn ska byta parametrar. Exempelvis om ett flöde är mer än 2 l/min används en uppsättning av parametrar och är flödet under, används en annan uppsättning .

2.2 Anti-windup

När en regulators utsignal blir mättad, uppstår fenomenet integratoruppvridning, även kallat wind-up [2]. Orsaken till fenomenet är att ett börvärde inte kan uppnås trots att ett don kör på min- eller maxeffekt. Problemet som uppstår, är att integraldelen av regulatorn bygger på sig själv fram till att börvärdet är uppnått eller att börvärdet är passerat, se figur 2.1 nedan. När signalen inte längre är mättad har integraldelen byggts upp så pass mycket att regulatorn får en fördröjd reaktion innan den uppnår börvärdet. Dessa signaler kan leda till person- eller systemskada.



Figur 2.1: Ett exempel på hur windup kan påverka ett system.

Processen för att förhindra windup kallas för anti-windup. Det finns inte en entydig metod eller lösning till hur windup ska hanteras [3]. En av dessa metoder är villkorlig integration [4, Kap. 3.5.6]. I denna metod ändras endast integralvärdet i regulatorn när vissa villkor är uppfyllda och annars behålls värdet som konstant. I pseudokoden nedan visas ett exempel på hur villkorlig integration kan ske.

```

if(i_term > max_i_term){
    i_term = max_i_term;
} else if(i_term < min_i_term){
    i_term = min_i_term;
} else{
    i_term = i_term_gammal + i_term_ändring
}

```

2.3 Framkoppling

Användandet av framkoppling kan hjälpa till att minimera effekten av mätbara störningar på systemet samt förbättra reaktionen på börvärdesändringar [4, Kap. 5].

I detta examensarbetet baserades framkopplingsfunktionen på vilken effekt som behövs för att värma upp vattnet i värmeelementet till börvärdet. Uträkningen använder den specifika värmekapaciteten för vatten, temperaturskillnaden mellan börvärdet och temperaturen in samt vattenflödet, vilket kan ses i ekvation (2.1) nedan.

Den specifika värmekapaciteten för vatten betyder den mängd energi som krävs för att värma upp ett kilo vatten en grad Celsius.

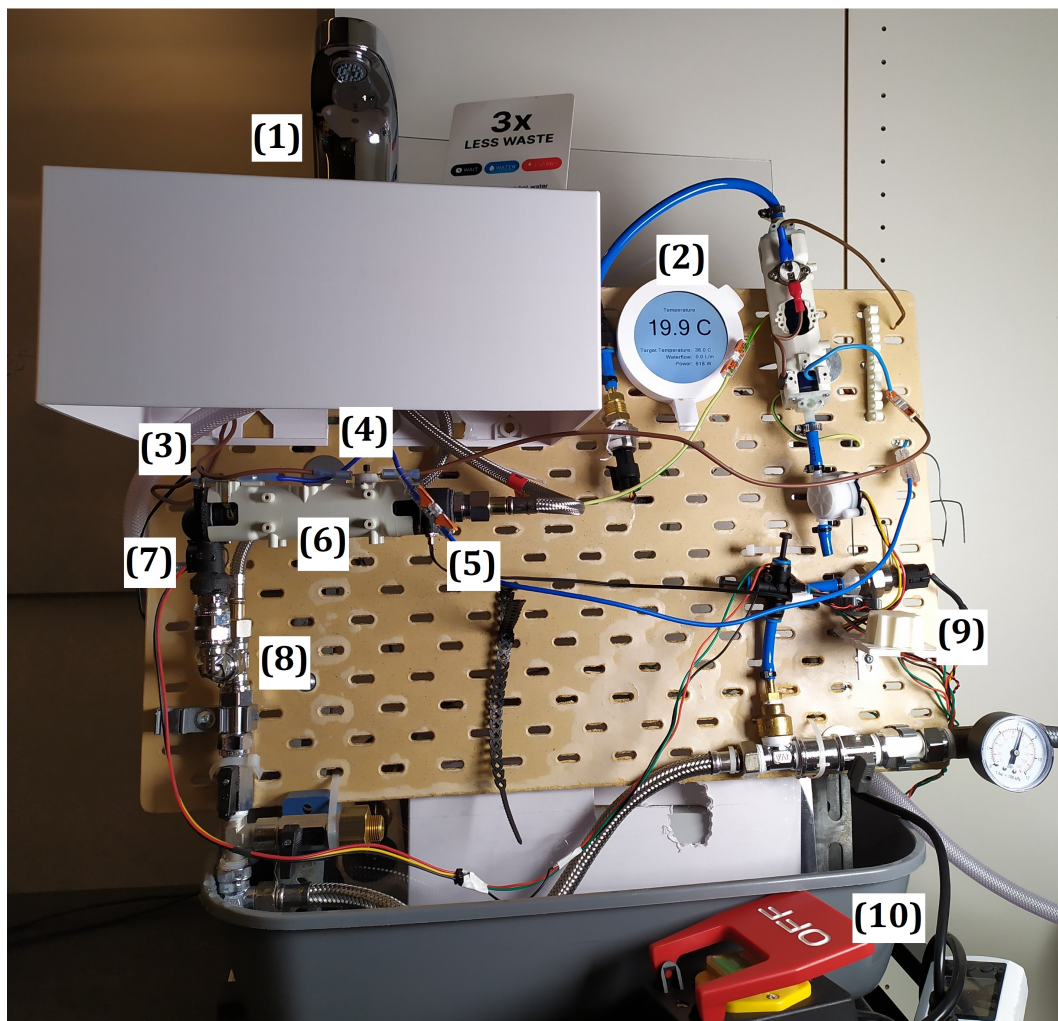
$$P_{required} = \dot{m} \cdot C_{P_{Water}} \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

I ekvation (2.1) är \dot{m} vattenflödet mätt i kg/s, $C_{P_{Water}}$ är den specifika värmekapaciteten för vatten vid konstant tryck och ΔT är temperaturskillnaden mellan börvärdet och temperaturen in.

3

Setup

Under examensarbetets gång har det utförts en hel del tester. För att lättare utföra testerna har en testbädd använts. Testbäddens fysiska uppbyggnad kan skådas i figur 3.1 nedan.



Figur 3.1: Tredje versionen av testbädden, där (1) - Kran, (2) - Informationsskärm, (3),(4),(5) - termistorer, (6) - Värmelement, (7) - Flödesmätare, (8) - Förgrening, (9) - Potentiometer, (10) - Nödstopp/strömbrytare.

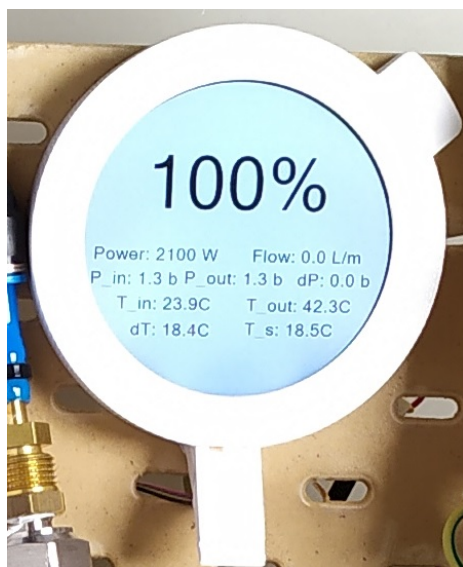
Testbädden är uppbyggd med att kallvatten kommer in och förgrenas (8), se figur 3.1. En gren går direkt till en beröringsfri kran (1) medan den andra grenen går till ett värmeelement (6) via en flödesmätare (7). Därefter går vattenledningen vidare till kranen.

Kring värmeelementet sitter det tre termistorer. Två av dem mäter temperaturen på vattnet in (3) i respektive ut (5) ur värmeelementet, och en mäter temperaturen på ytan (4) av värmeelementet.

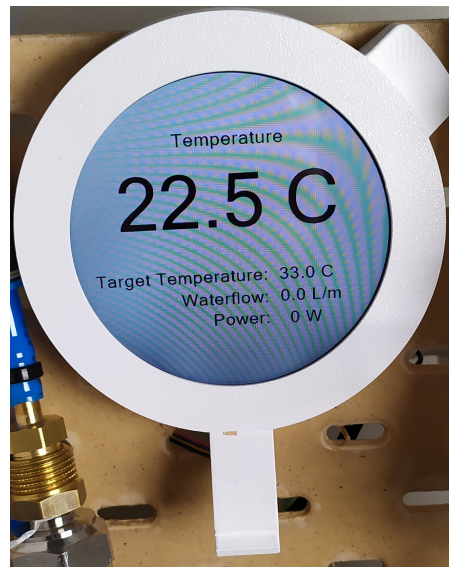
Termistorn som mäter temperaturen på utsidan av värmeelementet används i en säkerhetsåtgärd. Om temperaturen på värmeelementet eller på vattnet ut ur värmeelementet blir för högt, stänger säkerhetsåtgärden av värmeelementet. Säkerhetsåtgärden tillåter inte att värmeelementet sätts på igen tills temperaturen sjunkit. En annan säkerhetsåtgärd är att det finns en nödstoppsknapp (10), som bryter strömmen till värmeelementet.

Testbädden kan sättas i två olika lägen. I ena läget bestäms vilken effekt värmeelementet ska köras på och i det andra läget bestäms vilken temperatur på vattnet ut ur värmeelementet som önskas. De önskade värdena i de två lägena kan bestämmas med hjälp av ett reglage (9).

På testbädden sitter det en informationsskärm (2) som visar vilket av de två lägena testbädden är i, se figur 3.2 och 3.3 nedan.



Figur 3.2: Informationsskärm i effektläge.



Figur 3.3: Informationsskärm i temperaturläge.

I båda lägena visar skärmen flödet genom värmeelementet, hur mycket ström värmeelementet drar och temperaturen på vattnet ut ur värmeelementet. I effektläget, figur 3.2, visas även temperaturen in på vattnet till värmeelementet, skillnaden i

temperatur mellan flödet in till värmeelementet och flödet ut ur värmeelementet, temperaturen på utsidan av värmeelementet, trycket in i och ut ur värmeelementet samt skillnaden mellan trycken. Under körning sparas all denna information på ett SD-kort varje 200 ms.

Under examensarbetets gång har testbädden byggts om två gånger. Ombyggnaden av testbädden och utvecklingen av prototypens design utfördes av Vyse tech parallellt som examensarbetet utfördes.

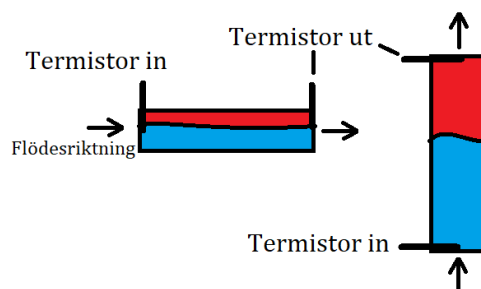
3.1 Ombyggnad av testbädden

Testbäddens första version hade ett slutet vattensystem, där det var samma vatten som åkte igenom systemet under körningarna. Detta var ett problem då vattnet i det slutna systemet sakta blivit varmare efter varje körning, vilket gav inkonsekventa tester. Den första versionen av testbädden användes endast till de första stegsvarstesterna samt dödtidstestet.

Testbäddens första uppdatering kom först när de första lösningsförslagen skulle implementeras. I den andra versionen av testbädden byttes det slutna vattensystemet ut till att vara direkt kopplat till vattensystemet i byggnaden. Den andra versionen av testbädden användes under större delen av examensarbetet.

Testbäddens sista uppdatering kom först när justeringen av den slutgiltiga lösningen skulle implementeras. Den tredje och sista versionen behöll vattensystemet från den andra versionen men bytte ut spolarmunstycket till ett med lägre maximalflöde. Den tredje versionen bytte också ut värmeelementet till ett värmeelement som installerats horisontellt istället för vertikalt och flödesmätaren byttes ut mot en mindre och mer kompakt variant. Anledningen till att värmeelementet installerades horisontellt var för att den slutgiltiga produkten kommer installeras horisontellt.

Efter en användning av kranen och värmeelementet har blivit avstängt, finns restvärme kvar i elementet. Detta innebär att det stillaliggande vattnet värms upp av elementet. Eftersom varmt vatten stiger avgör värmeelementets orientering var varmvattnet hamnar, se figur 3.4 nedan.



Figur 3.4: Illustration hur varmvattnet betar sig efter körningar vid olika orienteringar av värmeelementet. Röd färg indikerar var någonstans restvärmen hamnar efter en körning.

Konsekvensen blir att termistorerna in och ut mäter temperaturen till olika värden vid olika orienteringar. Vid vertikal orientering hamnar all värme vid termistorn som är riktad uppåt. Vid horisontell orientering sprids värmen ut över båda termistorerna. I denna orientering kan spridningen variera beroende på om elementet har någon lutning eller ej.

4

Metod

Innan examensarbetet påbörjades har Vyse tech samlat in användardata i form av flödesdata, temperatur på vattnet ut ur värmeelementet och effekten, med mera. I diskussion med handledaren på Vyse tech togs riktlinjer fram över hur stigtid och översväng skulle värderas. Samt diskuterades de möjliga huvudfaktorer som antogs kunna ha en stor påverkan på systemets förmåga att värma upp vatten. För att ta reda på om faktorerna var relevanta behövdes stegsvarstester utföras på systemet med varierade parametrar baserade på huvudfaktorerna.

Stegsvarstesterna skedde i den första versionen av testbädden, tidigare nämnt i slutet av kapitel 3. Testerna gjordes genom att utföra tre körningar per ändring av en av huvudfaktorerna, medan de andra huvudfaktorerna hölls konstanta. För att ta reda på om det fanns någon dödtid, gjordes ett test där effekten ändrades två gånger under körningen.

Datan som togs fram analyserades i Matlab genom att skapa matematiska modeller av systemet baserade på olika värden på huvudfaktorerna. Insignalen på modellerna är styrsignalen från regulatoren, i form av effekten på värmeelementet, och utsignalen är mätvärdet, i form av temperaturen ut ur värmeelementet. Från stegsvarsdatan approximerades systemet till att vara ett första ordningens system med dödtid, genom att plotta stegsvaren och hitta systemets parametrar.

För respektive matematisk modell skapades en PI-regulator, via Matlab. För att avgöra om modellerna var baserade på relevanta huvudfaktorer gjordes simuleringar i Simulink. Modellerna testades på huvudfaktorerna. I de fall, inom samma huvudfaktor, där två modeller gav samma eller närliggande resultat ansågs de vara samma modell och den ena uteslöts i vidare tester. Om en huvudfaktors alla tillstånd kunde beskrivas med en modell ansågs huvudfaktorn inte längre vara en huvudfaktor.

När de slutgiltiga huvudfaktorerna var identifierade jämfördes PI-regulatorerna på hur bra de hanterade extremfallmodellerna. En regulator ansågs vara bra om den hade en stigtid på mindre än 4 sekunder och en översväng på under 2 °C.

Lösningförslag togs fram baserat på hur bra PI-regulatorerna agerade i simuleringarna. Två lösningförslag togs fram. Det första lösningförslaget var en enkel

PI-regulator som har konstanta parametrar. Det andra lösningsförslaget var en PI-regulator som byter värde på parametrarna beroende på huvudfaktorerna med parameterstyrning.

Båda lösningsförslagen implementerades i det befintliga programmet, med C++, och testades på den andra versionen av testbädden. Testerna som utfördes var stegsvars-tester på extremfallen. Från resultatet av testerna togs beslutet om vilket lösningsförslag som skulle vidareutvecklas.

För att beräkna styrsignalen, $u(t)$, används ekvationen $u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau$. Styrsignalen begränsas sen till att vara mellan 0 och 1, där 0 är att värmeelementet är avstängt och 1 är att värmeelementet körs på full effekt.

För att undersöka om det går att reducera eller eliminera temperaturdippen gjordes tester där effekten sattes på max i två körningar efter varandra. Datan plottades i Matlab och visade att det var möjligt att reducera temperaturdippen. Två lösningsförslag togs fram baserat på funktioner från originalkoden. Det första lösningsförslaget var att använda framkoppling baserad på huvudfaktorerna. Det andra lösningsförslaget var att använda en, så kallad, boost, det vill säga att köra värmeelementet på maximaleffekt vid start av körning. Lösningsförslagen analyserades logiskt och det som tolkades att uppnå målet med minst extraarbete vidareutvecklades.

För att vidareutveckla regulatorn och dipphanteringen utfördes en iterativ process som anpassades baserat på problemen som dök upp. Målet var att regulatorn skulle ha en stigtid på under 4 sekunder och en översväng under 2 °C samtidigt som dippen efter upprepande körningar skulle reduceras eller elimineras.

5

Risikanalyt

Eftersom examensarbetet hanterar el och vatten finns det risk för personskada. I detta kapitel analyseras dessa risker och möjliga åtgärder att implementera för att minimera riskerna.

5.1 Farlig spänning

Testbädden är inkopplad till vägguttag och har spänningsförande ledningar/komponenter (utan skydd) som går att komma åt.

För att minimera riskerna bör följande åtgärder utföras:

- Att inte fysiskt hantera komponenter när testbädden är kopplad till strömkälla.
- Att meddela personer i omgivningen innan strömmen slås på.

5.2 Vatten och El

Testbädden hanterar både vatten och el vilket medför risken för kortslutning, brandrisk och elchock.

För att minimera dessa risker ska vattenkopplingen säkerställas innan strömkällan slås på. Personer i omgivningen ska meddelas innan strömmen slås på.

5.3 Halkrisk

Arbetsplatsen har öppna vattenbehållare som kan spillas, och beroende på golvet kan detta resultera i ett halt golv.

För att minimera dessa risker bör följande åtgärder utföras:

- Att torka upp vatten som spillts så snabbt som möjligt.
- Koppla bort testbädden från strömkällan medan vattnet torkas upp.

6

Genomförande

Följande kapitel presenterar examensarbetets praktiska genomförande och de arbetsmoment som utförts under examensarbetets gång.

6.1 Analys av befintlig driftdata

Innan examensarbetet påbörjades har Vyse tech utfört tester där användardata samlats in. Exempelvis vilka flöden användarna körde kranen på, hur länge de använde kranen och vilken temperatur det var på vattnet in och ut ur värmeelementet.

För att bedöma regulatorernas prestanda diskuterades, med handledaren på Vyse tech, vilka krav som skulle sättas på stigtiden och översvänget. Eftersom en användare upplever att det är ett större fel om temperaturen svänger än att det tar tid att temperaturen ökar blev kravet att översvänget skulle prioriteras över stigtiden. Kravet på översvänget blev att om användaren inte känner av svängningen fick översvänget kvarstå. Detta tolkades till att vara ett översväng på under 2 °C.

I diskussionen med handledaren togs även tre huvudfaktorer fram som antogs direkt påverka uppvärmningen av vattnet. Den första huvudfaktorn var temperaturen på vattnet in i värmeelementet. Den andra huvudfaktorn var hur mycket vatten som åkte igenom värmeelementet, det vill säga flödet. Den tredje och sista huvudfaktorn var vilken effekt värmeelementet körts på.

6.2 Stegsvarsanalys

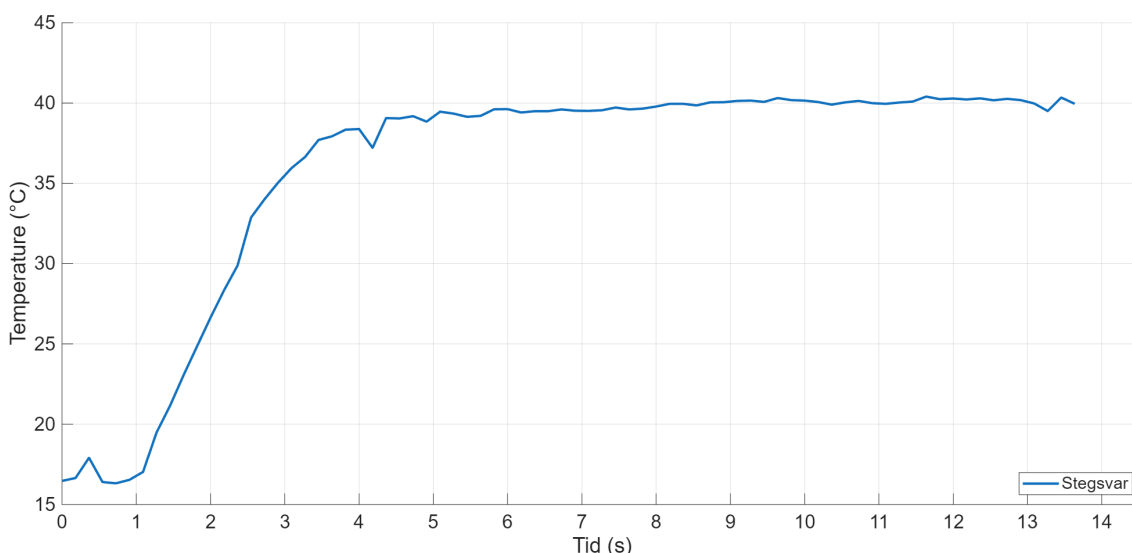
Baserat på de tre möjliga huvudfaktorerna skapades matematiska modeller. Modellerna användes för analys och förbättring av systemet.

Med de tre möjliga huvudfaktorerna användes den första versionen av testbädden för att ta fram stegsvarsdata där de olika huvudfaktorerna på systemet ändrades mellan körningar. Exempelvis ändra på flödet medan effekten på värmeelementet och temperaturen på vattnet in hålls så konstant som möjligt. De olika testscenariona kan skådas i tabell 6.1 nedan.

Tabell 6.1: Tabell innehållande de olika scenarierna som stegsvarsdatan har tagits fram ifrån.

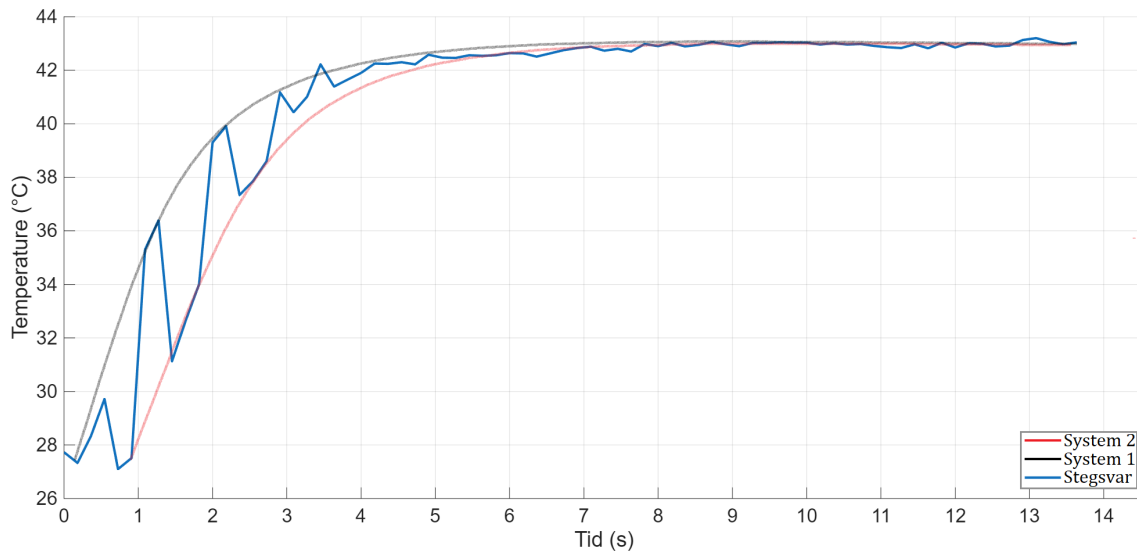
	Flödet:	Effekten:	Vattentemperaturen in:
Scenario 1:	Ändras	Konstant	Konstant
Scenario 2:	Konstant	Ändras	Konstant
Scenario 3:	Konstant	Konstant	Ändras

Eftersom testerna gjordes på den första testbädden, och dess slutna system, innebar det att temperaturen på vattnet in i värmeelementet inte kunnat hållas konstant, utan den har sakta blivit varmare under testerna. Detta problem löstes i andra versionen av testbädden där den kopplas direkt till en kran, se delkapitel 6.5. Exempel på stegsvarsdatan kan ses i figur 6.1 nedan.

**Figur 6.1:** Stegsvaret från ett av scenarierna.

6.3 Modell från stegsvarsanalys

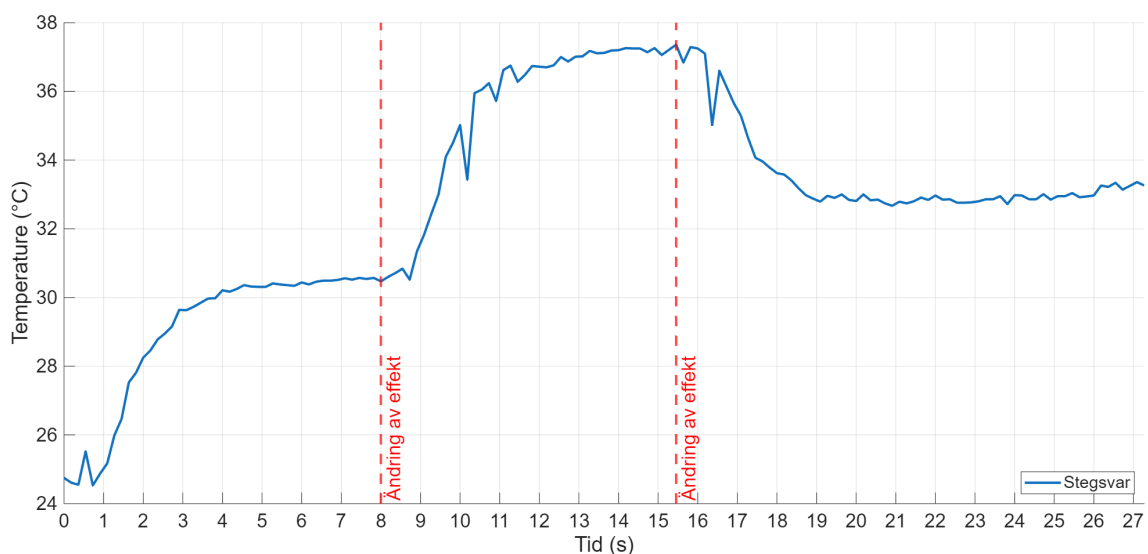
Från stegsvaren kunde de olika scenarierna beskrivas matematiskt. I bästa fall genererades en jämn kurva som i figur 6.1 och i värsta fall gjorde störningarna grafen relativt svårläst, se figur 6.2 nedan. Detta innebar att en grov uppskattning av parametrar ibland behövdes göras vid skapandet av de matematiska modellerna.



Figur 6.2: Svårtolkat stegsvar med störningar, där den blå kurvan är mätvärdena medan den svarta och röda kurvorna är två möjliga tolkningar av den blåa kurvan.

I figur 6.2 är det svårt att se om den blåa kurvan följer dalarna eller pikarna, det vill säga om det är system 1 eller system 2 som motsvarar den sanna kurvan. Detta innebär att samma test på samma scenario behövdes göras flera gånger för att kunna tolka datan rätt.

En fråga som behövde besvaras var om det fanns en dödtid och hur lång den var. För att undersöka detta gjordes ett test där effekten ändrades två gånger under samma körning. Detta test utfördes för att se hur systemet hanterade effektändringar under drift. Detta resulterade i data som visar att det fanns en mätbar dödtid efter effektändringar, se figur 6.3 nedan.



Figur 6.3: Analys av stegsvarets dödtid vid effektändringar under en körning.

Med hjälp av figuren och rådatan beräknades att det fanns en dödtid på ca 0,8 sekunder. Baserat på formen på stegsvaren valdes modeller av första ordningen med dödtid: $G(s) = \frac{K}{1+Ts}e^{-Ls}$, där parametrarna anpassades till uppmätta värden i stegsvaren. Modellerna som skapades var baserade på stegsvarsdaten från de olika scenarierna.

6.4 Skapande av regulatorer

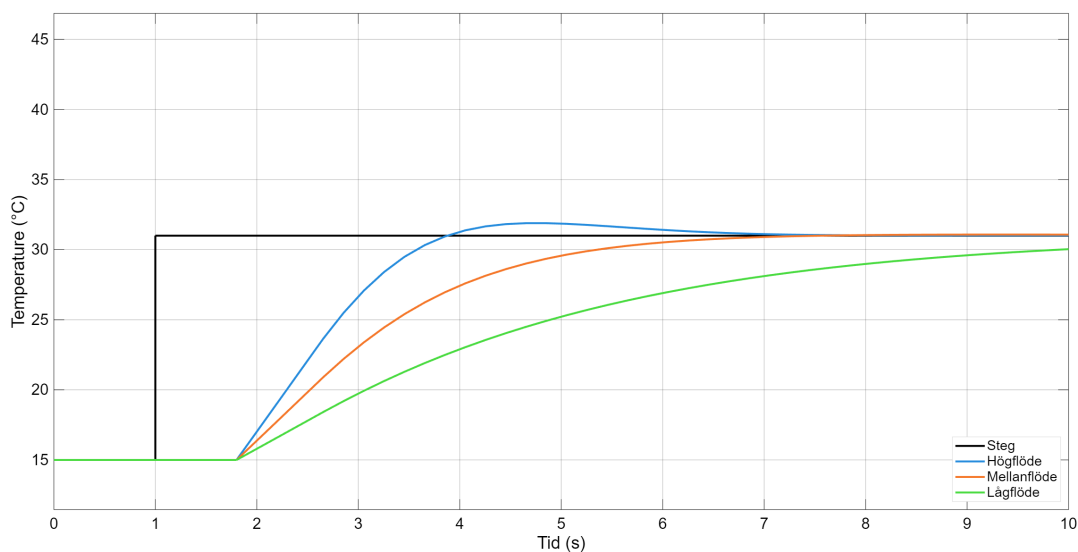
Efter att de matematiska modellerna tagits fram skapades PI-regulatorer, för varje modell, via Matlab. För att jämföra regulatorerna gjordes simuleringar i Simulink.

6.4.1 Simulering

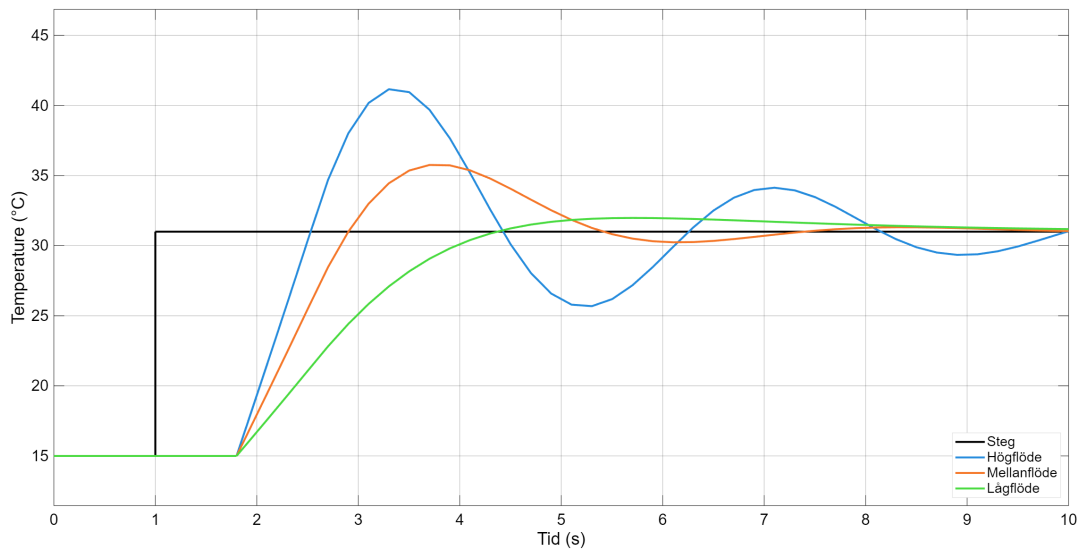
När K_p - och K_i -värdena för de olika PI-regulatorerna analyserades, kunde det observeras att för scenarierna 2 och 3, ändring av effekt respektive temperatur in, var det inte direkt någon större skillnad mellan de olika modellerna. Vid scenario 1, ändring av flödet, var det en märkbar skillnad för både K_p och K_i mellan de olika modellerna. Med detta resonemang drogs slutsatsen att flödet genom värmeelementet är den enda huvudfaktorn som påverkar hur regleringen bör ställas in.

Med endast en huvudfaktor, flöde, valdes att göra framtida simuleringar och tester på maximal- och minimalflöden, härafter kallat extremfall, samt på ett flöde mitt emellan extremfallen. Övriga extremfall undersöktes inte vidare.

För att se ifall någon regulator fungerar tillräckligt bra på alla flöden eller ifall det behövs olika regulatorer för olika flöden, gjordes olika simuleringar på extremfallen. I figur 6.4, högflödesfallet, och figur 6.5, lågflödesfallet, observeras simuleringen av de regulatorer som var skapade för extremfallen samt en regulator skapad för ett flöde mitt emellan extremfallen.



Figur 6.4: Simuleringsresultatet av PI-regulatorer för systemen med hög flöde, mellan flöde och låg flöde på systemet för extremfallet med högt flöde.



Figur 6.5: Simuleringsresultatet av PI-regulatorer för systemen med hög flöde, mellan flöde och låg flöde på systemet för extremfallet med lågt flöde.

Figurerna visar som förväntat att regulatorerna fungerar bäst på scenarierna de var framtagna för och sämst på de motsatta scenarierna. Mellanflödesregulatorn är näst bäst i båda extremfallen.

När lågflödesregulatorn agerar på högflödesfallet är stigtiden alldeles för lång för att värma upp vattnet snabbt nog för bekväm användning. Kontra det har högflödesregulatorn stora svängningar när den agerar på lågflödesfallet. Temperatursvängningarna kan uppfattas som obehagliga eller som om något är fel. Mellanflödesregulatorn har en längre stigtid än högflödesregulatorn i högflödesfallet och endast en översväng på lågflödesfallet.

6.4.2 Lösningsförslag

Baserat på jämförelserna av simuleringarna ovan togs två olika lösningsförslag fram. Den första lösningen var baserad på mellanflödesregulatorn eftersom den fungerade acceptabelt på alla olika flöden. Den andra lösningen var baserad på regulatorerna som var framtagna för extremfallen. Denna lösning var en typ av parameterstyrning som byter mellan hög- och lågflödesregulatorerna beroende på flödet genom värmeelementet.

6.5 Implementation av nya regulatorparametrar

Implementationen av lösningarna använde originallösningens kod som grund. Extrafunktioner i form av framkoppling och en så kallad boost togs bort vid implementeringen och regulatorns parametrar justerades. Först vid detta skede användes den andra versionen av testbädden, det vill säga vatten direkt från kranen.

6.5.1 Förändringar i befintlig kod

Vid implementeringen och körning av de två lösningsförslagen upptäcktes fel i den befintliga koden som behövdes fixas för att få regulatorerna att köra som de ska.

I den befintliga koden för regulatorn begränsades integraldelen i regulatorn till att vara mellan minus ett och ett. Detta var inte rätt eftersom integraldelen ska kunna öka eller minska fritt, så länge styrsignalen förblir mellan 0 och 1. Detta löstes genom att ta bort koden som begränsade integraldelen.

I den befintliga koden nollställdes också integraldelen för regulatorn varje gång en körning startade, samt när flödet blev för lågt. Detta resulterade i att mätningssfel kunde nollställas under körning. När nollställningen sker under körning resulterar det i en oväntad temperaturdipp.

Dessa nollställningsfel löstes genom att sätta in att integraldelen bara ska nollställas ifall det gått en viss tid sedan körningen stoppats samtidigt som temperaturen ut ur värmeelementet är under 90 procent av börvärdet.

6.5.2 Lösningsimplementation

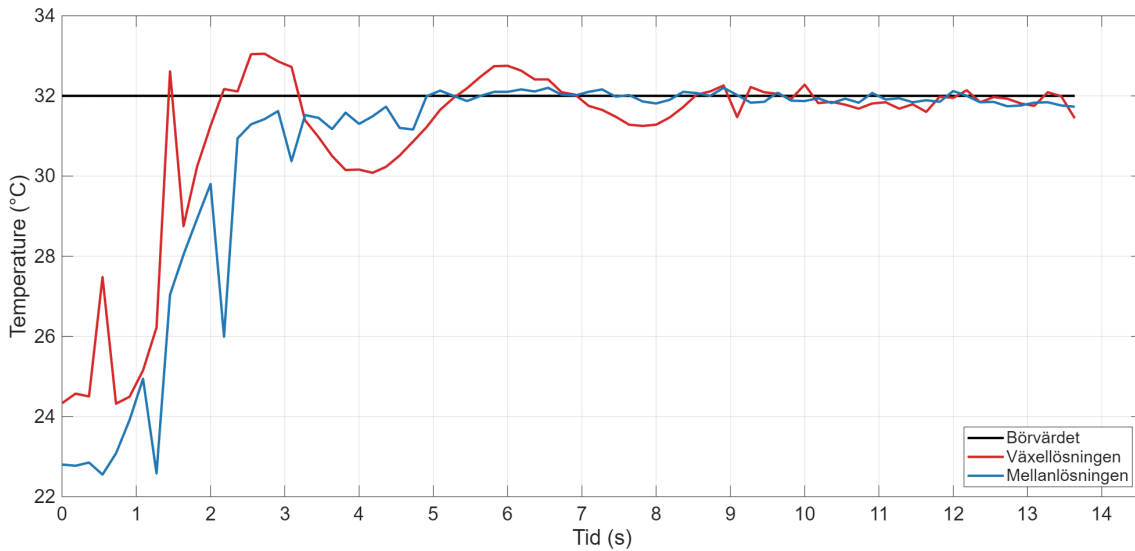
Mellanflödeslösningen, härfter kallad mellanlösningen, är en enkel PI-regulator där K_p - och K_i -värden förblir konstanta för alla flöden. För att implementera denna lösning krävdes endast justering av parametrarna i originalkoden.

Parameterstyrningslösningen, härfter kallad växellösningen, använder två enkla PI-regulatorer där K_p - och K_i -värdena ändras beroende på vad flödet är. Övergången sker halvvägs mellan extremfallen och regulatorerna är baserade på extremfallen och agerar därmed bäst i dessa fall. Denna lösning agerar sämst mitt emellan extremfallen, där övergången mellan regulatorerna sker. När flödet ligger på övergångsvärdet finns risk att regulatorn byts fram och tillbaka vid små mätvärdesändringar. Detta skulle kunna leda till instabilitet. För att förhindra detta behövs en buffertzona där ändringen inte sker. Detta innebär att det finns ett överlapp där båda regulatorer kan köra och först efter att överlappet har passerats ändras regulatorn. Exempelvis, högflödesregulatorn växlas till lågflödesregulatorn vid 0,9 l/min medan lågflödesregulatorn växlas till högflödesregulatorn vid 1,1 l/min. För att implementera denna lösning skapades en parameterstyrningsalgoritm med två lägen och med överlapp.

6.5.3 Jämförelse av lösningar

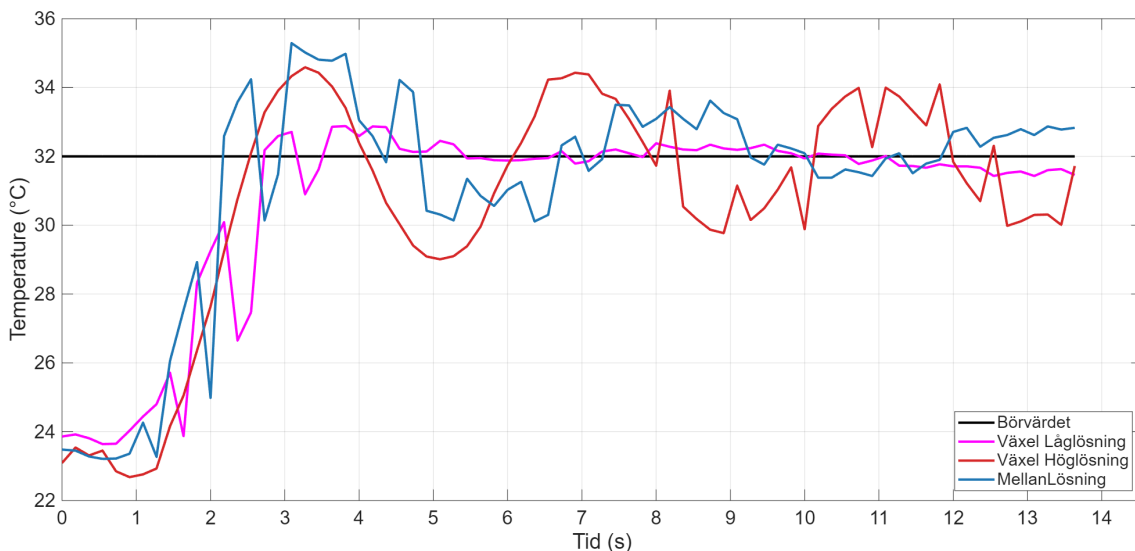
I figurerna 6.6 till 6.8 nedan observeras stegsvaren för båda lösningarna, vars mätvärden var tagna från den riktiga testbädden. I figur 6.6 observeras fallet med högt flöde, i 6.7 observeras fallet med medelflöde och i 6.8 observeras fallet med lågt flöde. I medelflödesfallet användes inte växellösningen på samma flöde som mellanlösningen, utan på flöden som var $\pm 0,1$ l/min från medelflödet. Anledningen till denna skillnad var för att undvika att någon störning bytte från högt till lågt eller vice versa för växellösningen under testningen. Värt att notera är att testerna gjordes

på olika tider på dagen och har därmed lite olika startvärden, eftersom vattnets temperatur in varierar beroende på temperaturen i byggnaden.



Figur 6.6: Båda lösningsförslagens hantering av högt flöde.

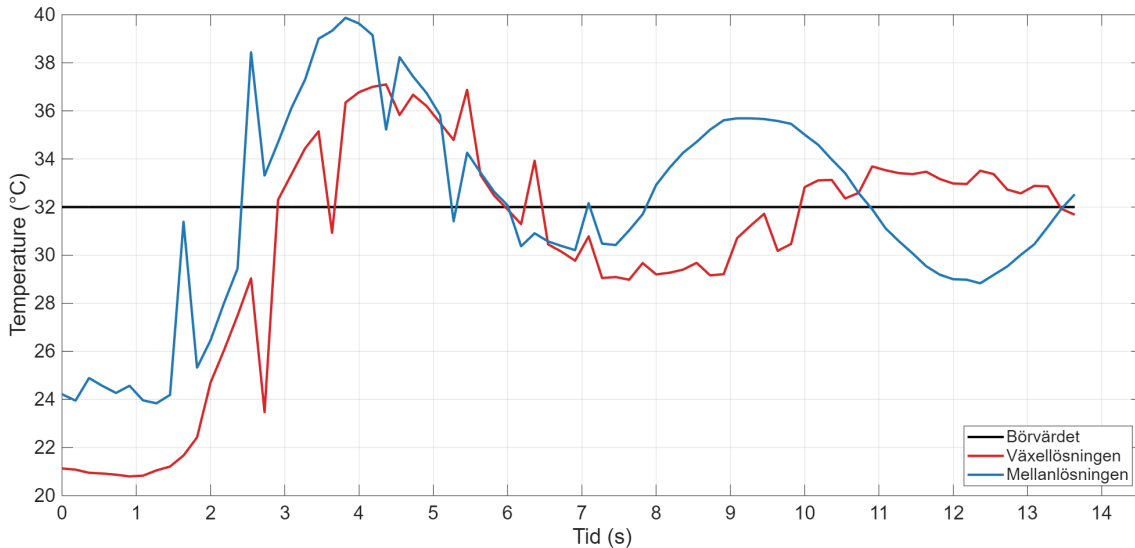
Ur figur 6.6 framgår att vid högt flöde, har växellösningen en stigtid på lite mindre än 1 sekund och en översväng på ca 1 °C och en undersväng på ca 2 °C. Samtidigt har mellanlösningen en stigtid på ca 1,5 sekunder och är utan några svängningar. Däremot tar det ca 4 sekunder innan börvärdet uppnås. Växellösningen är därmed snabbare än mellanlösningen men inte lika dämpad.



Figur 6.7: Båda lösningsförslagens hantering av mellan flöde, där växel låg- respektive höglösning syftar på växellösningen för lågt flöde respektive högt flöde.

Ur figur 6.7 framgår att för medelflödesfallet, har växellösningen med lågflödesregulatorn en stigtid på ca 1,3 sekunder och har en översväng på lite mindre än 1 °C.

Samtidigt har växellösningen med högflödesregulatorn en stigtid på ca 0,9 sekunder och har en översväng på ca 2,5 °C. Den är dessutom instabil eftersom styrsignalen svänger mellan ca 10 % och 55 %. Mellanlösningen har en stigtid på ca 0,9 sekunder och har en översväng på ca 3,2 °C.



Figur 6.8: Båda lösningsförslagens hantering av lågt flöde.

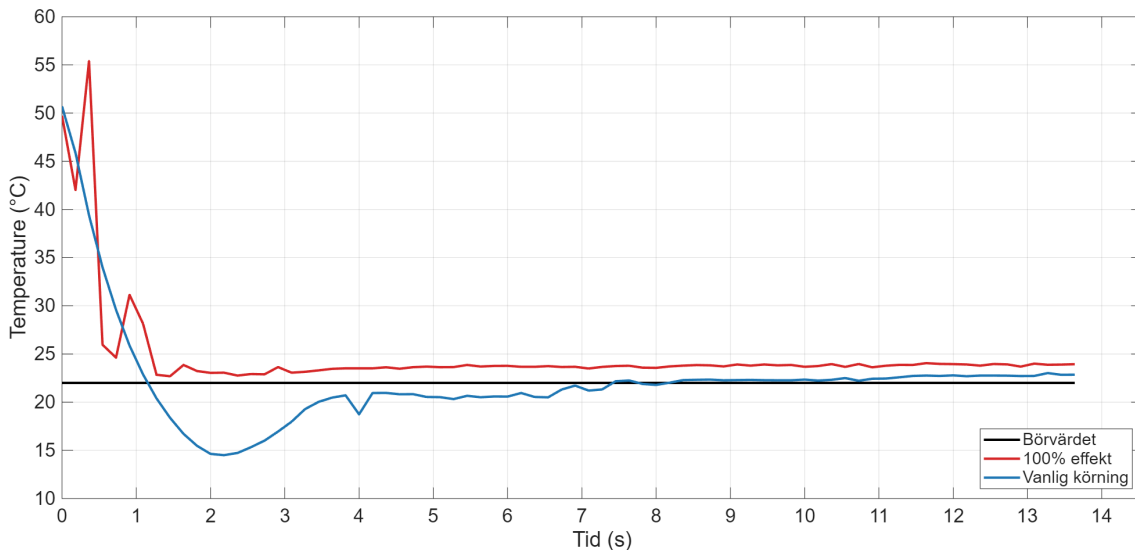
Ur figur 6.8 framgår att för lågflödesfallet, har växellösningen en stigtid på ca 1 sekund och en översväng på ca 5 °C. Samtidigt har mellanlösningen en stigtid på ca 0,6 sekunder och en översväng på 8 °C. Den är dessutom instabil eftersom styrsignalen svänger mellan 0 och ca 50 %. Växellösningen är därmed långsammare än mellanlösningen men mer dämpad.

Efter analys av datan togs beslutet att växellösningen var den lösningen som skulle vidareutvecklas. Resonemanget kring detta beslut var att parametrarna i mellanlösningen gör den instabil på lågflödesfallet. Detta innebär att värdet på K_i eller K_p behöver minskas eller båda. Konsekvensen av detta var att, på de övriga flödena, hade mellanlösningen blivit ännu långsammare jämfört med växellösningen än vad den redan var.

6.5.4 Hantering av restvärme

När en körning har skett återstår restvärme i värmeelementet. Detta resulterar i att vid nästa körning kommer temperaturen ut börja varmt och över börvärdet, vilket gör att regulatorn inte aktiveras förrän temperaturen kommit under börvärdet. Vilket resulterar i att temperaturen fortsätter att sjunka innan regulatorn kommit igång helt. Denna dipp i temperaturen kan kännas obehaglig för användaren. Det andra målet för examensarbetet var att undersöka om det går att reducera eller eliminera denna temperaturdipp. Det första som gjordes för att undersöka temperaturdippen, var att se om den gick att reducera överhuvudtaget. För att ta reda på detta gjordes tester där värmeelementet sattes på maxeffekt, två kör-

ningar i rad. Tanken med detta test var för att se vad som händer om regulatorn gör allt den kan för att reducera temperaturdippen. Om dippen ej hade minskat, skulle det inte vara rimligt att försöka reducera temperaturdippen med regulatorn heller. Då skulle en ombyggnad krävas. Resultatet av testerna kan observeras i figur 6.9 nedan. I figuren visas hur stor dippen blir vid en körning på högflödesfallet med växellösningen, samt hur stor dippen blir när maximaleffekt används. Något som inte kan tolkas från figuren är att temperaturen in till värmeelementet var ca 15 °C när testerna gjordes.



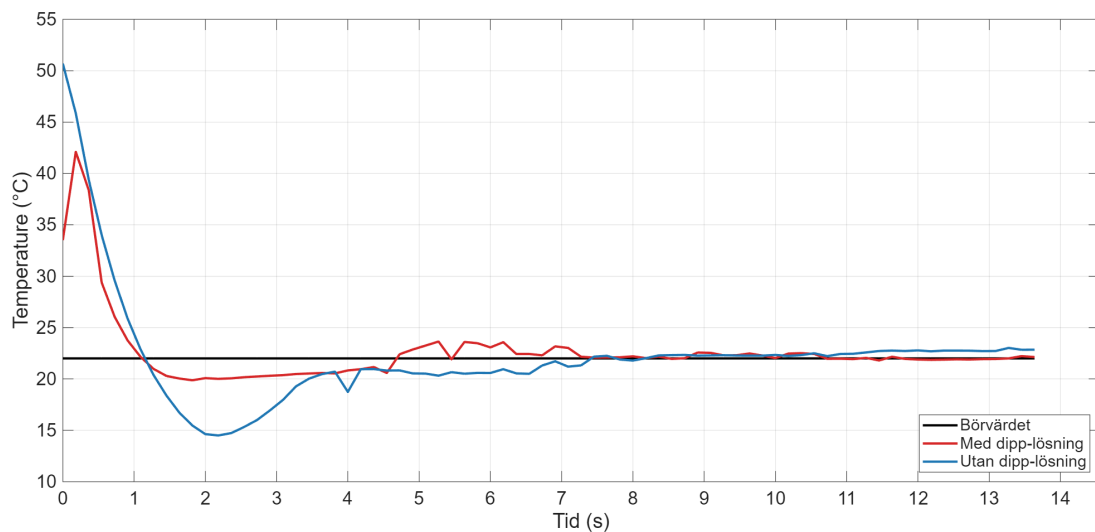
Figur 6.9: Test resultat över hur stor temperaturdippen är vid en körning på högflödesfallet med växellösningen och hur mycket temperaturdippen kan reduceras i maximaleffektfallet.

I figuren kan det observeras att temperaturdippen är ca 7 °C när regulatorn styr effekten och att det går att reducera dippen. Att temperaturdippen går ner till 15 °C implicerar att den sanna temperaturdippen kan vara större än vad som observerats eftersom temperaturdippen inte kan bli lägre än temperaturen in. Vissa tester visade att temperaturen, ut ur värmeelementet, blev hög nog att en säkerhetsåtgärd stängde av elementet och gav en extra död tid på 4 sekunder till nästa test, se bilaga A.2. Även tester för andra flöden gjordes där resultaten visade att även för lägre flöden fångades temperaturdippen in. Exempel på detta går att se i bilaga A.1. Resultatet av testerna visar att det går att reducera problemet med temperaturdippen. Värt att notera är att endast den röda kurvan använder en regulator och illusionen av att kurvorna går mot samma börvärde, endast är ett sammanträffande. Med den andra versionen av testbädden och 15 °C på vattnet in, kunde värmeelementet inte värma upp vattnet högre för detta flöde.

För att lösa problemet betraktades två metoder. Den första var med framkoppling och den andra var med en, så kallad, boost. Båda metoderna skulle användas på samma sätt, det vill säga metoden skulle endast vara igång i de första sekunderna innan regulatorn tar över. Skillnaden var att framkoppling beräknar hela tiden vad

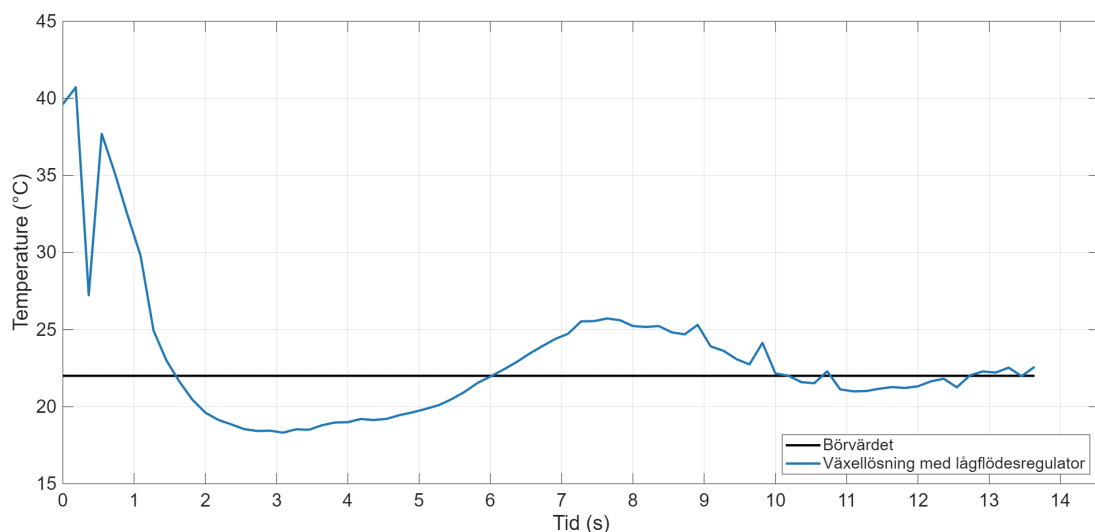
effekten ska sättas till samt uppdaterar integraldelen av regulatorn för att göra övergången från framkoppling till regulatorkörning smidig. Boosten sätter effekten direkt till maximalt värde. I slutändan valdes framkoppling. Anledningen till detta var att användandet av boosten krävde att dess parametrar ändras beroende på vad flödet är. Detta innebär att den i princip agerade på motsvarande sätt som framkopplingsmetoden.

Implementationen av dipphanteringen blev att framkopplingen endast användes när temperaturen kring termistorn för utflödet ur värmeelementet var högre än börvärdet, samt att värmeelementet bara varit på i mindre än 4 sekunder. Resultatet kan observeras i figur 6.10 nedan.



Figur 6.10: Skillnaden mellan regulatorn, med och utan dipphanteringen.

I figuren kan det tydligt observeras att temperaturdippen har minskat till ca 2 °C. Denna temperaturdipp går även att se i tester på lågflödesfallet, se figur 6.11 nedan.



Figur 6.11: Dipphanteringen på lågt flöde med växellösningen.

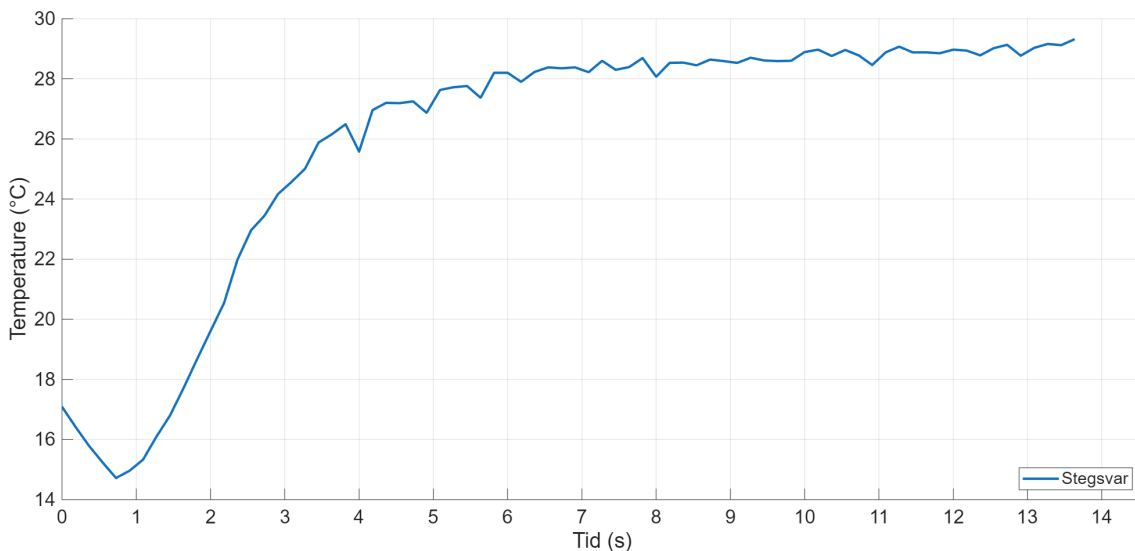
I detta fall är dipptemperaturen något större och ligger kring 3 °C. Anledningen att lösningen fungerar på båda flödesfallen är att framkopplingen tar hänsyn till flödet när effekten beräknas.

6.6 Förändrad testbädd

Innan justeringen av lösningen skulle påbörjas, uppdaterades testbädden till tredje versionen. Med ett lägre maximalflöde behövdes nya parametrar tas fram på regulatorn. I samband med detta beslutades det även att utöka växellösningen till att ha fyra flödeslägen. Dessa flödeslägen är högt, medel, lågt och mycket lågt flöde, vilket representerar kring 100 %, 75 %, 50 % och 25 % av maximalflödet. Denna utökning gjordes för att öka robustheten på lösningen genom att tillåta fler maximalflöden på kranen. Implementationen av denna utökning gjordes på samma vis som den första växellösningen, se delkapitel 6.5.2.

6.6.1 Nya regulatorparametrar

Med en uppdaterad växellösning behövdes ny öppen stegsvarsdata. Eftersom högflödeslösningen var baserad på ett högre maximalt flöde var regulatorn inte längre anpassad för det nya maximalflödet. Med de två nya flödeslägena, medel- och mycket lågt flöde, behövdes även regulatorer skapas för dessa flöden. Ett exempel på ett stegsvar på det nya maximalflödet kan ses i figur 6.12 nedan.



Figur 6.12: Ett stegsvar från den tredje versionen av testbädden.

Stegsvarstester gjordes på de fyra olika flödeslägena och på samma vis som med första växellösningen, togs parametervärden för regulatorerna fram via Matlab. I de nya stegsvaren har K -värdet ökat med ca 23 % respektive 65 % och T -värdet med ca 33 % respektive 30 % för låg- och högflödesfallen. Detta resulterade i att även nya K_i - och K_p -värden behövde beräknas.

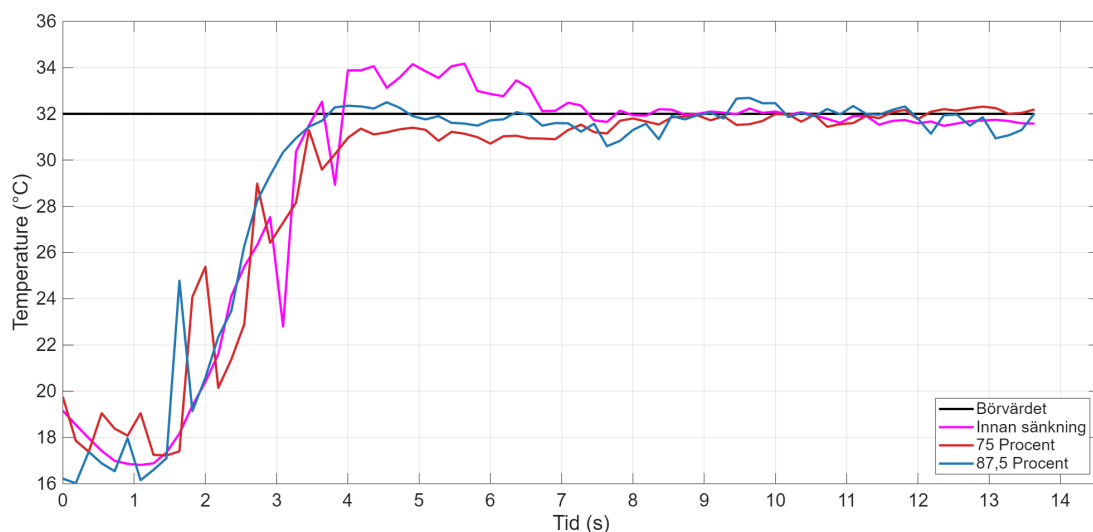
6.6.2 Uppdatering av dipphantering och justerade PI-parametrar

Med ett horisontellt värmeelement spreds restvärmen ut över båda termistorerna. När restvärmen spreds ut är det inte garanterat att tillräckligt mycket restvärme hamnar kring termistorn ut för att dipphanteringen ska aktiveras. Detta innebar att nya tester behövdes göras för att se ifall dipphanteringen fortfarande fungerar. Om värmeelementet står vertikalt, hamnar värmen nästan endast kring termistorn som är uppåt. Om det står horisontellt kan värmen hamna på ett spektrum från termistorn in till termistorn ut. Detta beror på hur mycket lutning det är på värmeelementet efter installationen.

När restvärmen hamnar kring termistorn in blir temperaturen in större än börvärdet. Detta gör att dipphanteringen inte kan lösas med endast framkoppling eftersom att framkopplingen då beräknar effekten på värmeelementet till ett negativt värde. Eftersom värmeelementet inte kan ha en negativ effekt sätts effekten till noll. Detta leder till att en artificiell ökning av dödtiden, upp till drygt en halv sekund, tillkommer. Uppdateringen av dipphanteringen blev därmed att när framkopplingen ska användas och temperaturen in också är större än börvärdet, sätts effekten till max. Detta sker fram till att temperaturen in är under börvärdet igen eller att framkoppling ska sluta användas.

För att undersöka de justerade PI-parametrarna gjordes ytterligare tester. Först utfördes tester med sänkta K_i -värden för att minska översvängen. Därefter gjordes tester med det sänkta K_i -värdena tillsammans med den uppdaterade dipphantering.

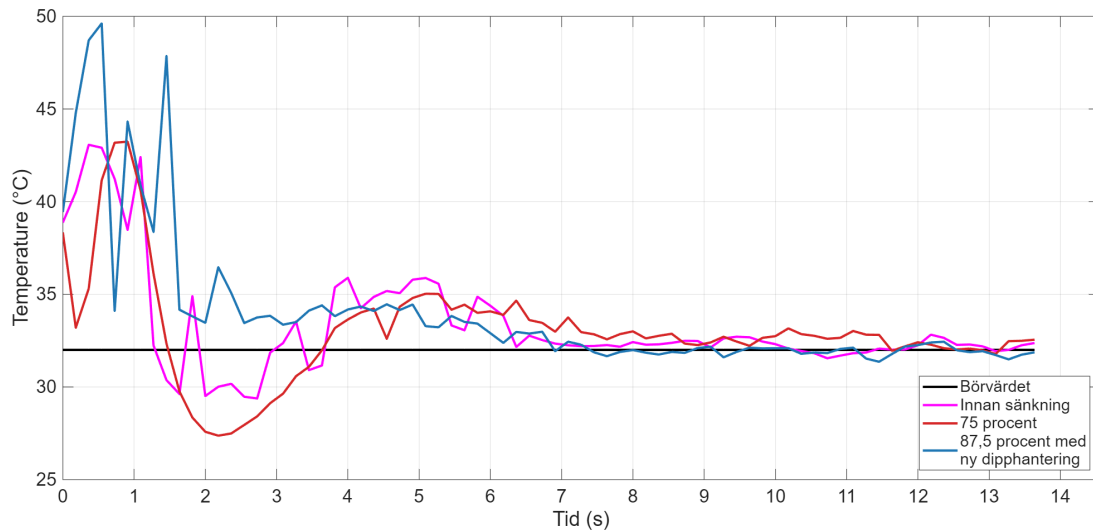
Det var efter dessa tester som beslutet togs av vad den slutgiltiga lösningen skulle vara. I figur 6.13 nedan, observeras regleringsresultatet innan K_i -sänkningen samt två regulatorer med ett K_i -värde sänkt med 25 % respektive 12,5 %, härefter kallade 75 %-lösningen respektive 87,5 %-lösningen.



Figur 6.13: Höglödeskörning på tredje versionen av testbädden med de justerade parametervärdena samt med 75 %-lösningen och 87,5 %-lösningen.

I figur 6.13 observeras att översvängen hos 87,5 %-lösningen är nästan helt borta och för 75 %-lösningen har översvängen eliminerats helt. Stigtiden för alla tre kurvorna är ca 2 sekunder. Dock uppnår inte 75 %-lösningen jämvikt lika snabbt som 87,5 %-lösningen.

I figur 6.14 nedan, observeras regleringsresultaten av tre olika dipphanteringstester. En har regulatorn innan K_i -sänkningen, en har sänkt K_i -värde och en har sänkt K_i -värde med ny dipphantering.



Figur 6.14: Dipptester för högflödeskörning på tredje versionen av testbädden med de justerade parametervärdena samt med 75 %-lösningen och 87,5 %-lösningen.

I figur 6.14 observeras det att den sänkta K_i -lösningen har en större dippl men lägre översväng gentemot regulatorn med de justerade parametervärdena. Den markanta skillnaden är den rosa kurvan, det vill säga den nya dipphanteringen. Den har inte samma svängningar som tidigare lösningar men uppnår ändå jämvikt på samma tidsintervall.

Efter diskussion med handledaren på Vyse tech, och med användarupplevelse i fokus, valdes det att regulatorn med 12,5 % sänkning på K_i -värdet tillsammans med den nya dipphanteringen är den slutgiltiga lösningen som skulle användas. Resonemang- et var att användarupplevelsen känns värre när temperaturen svänger. Vid vanlig körning är det acceptabelt med en översväng på upp till 2 °C så länge som stigtiden hålls nere.

7

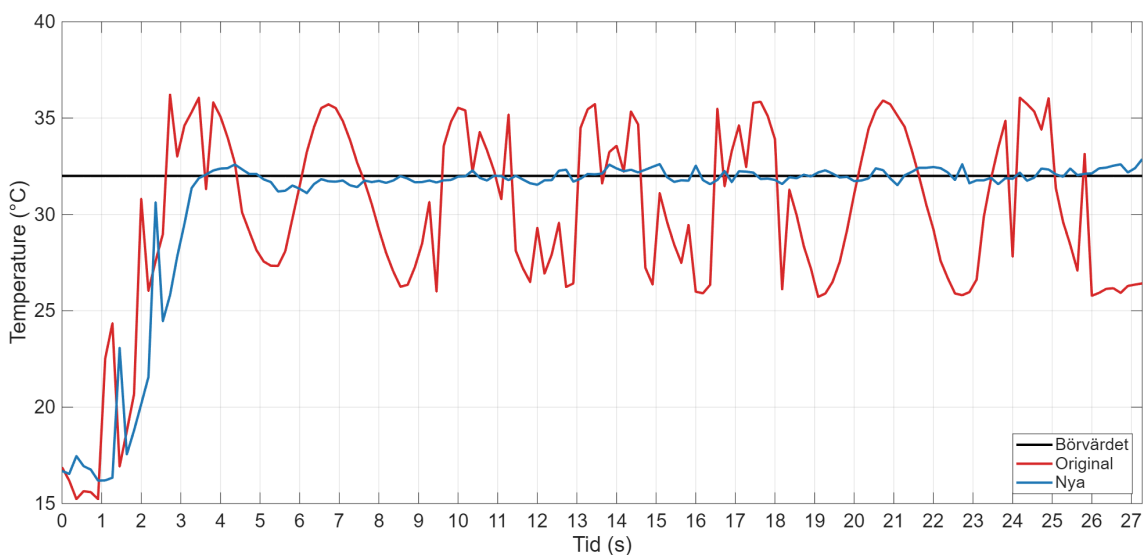
Resultat

Målet med examensarbetet var att förbättra regleringen av värmeelementet samt att undersöka och eventuellt eliminera temperaturdippen som, med tidigare lösning, skedde vid upprepande körningar.

Produkten kommer att sitta vid en beröringsfri kran. I nästan alla användningsfall körs kranen på maximalt varmvatten, det vill säga maximalt flöde genom värmeelementet.

7.1 Maximalt flöde

Eftersom maximalt flöde är det mest förekommande användningsfallet är detta flödet det viktigaste bland resultaten. I figur 7.1 nedan, observeras den framtagna lösningen (blå kurva) och hur regleringen såg ut vid examensarbetets start (röd kurva), härfter kallad originallösningen, vid maximalt flöde genom värmeelementet.



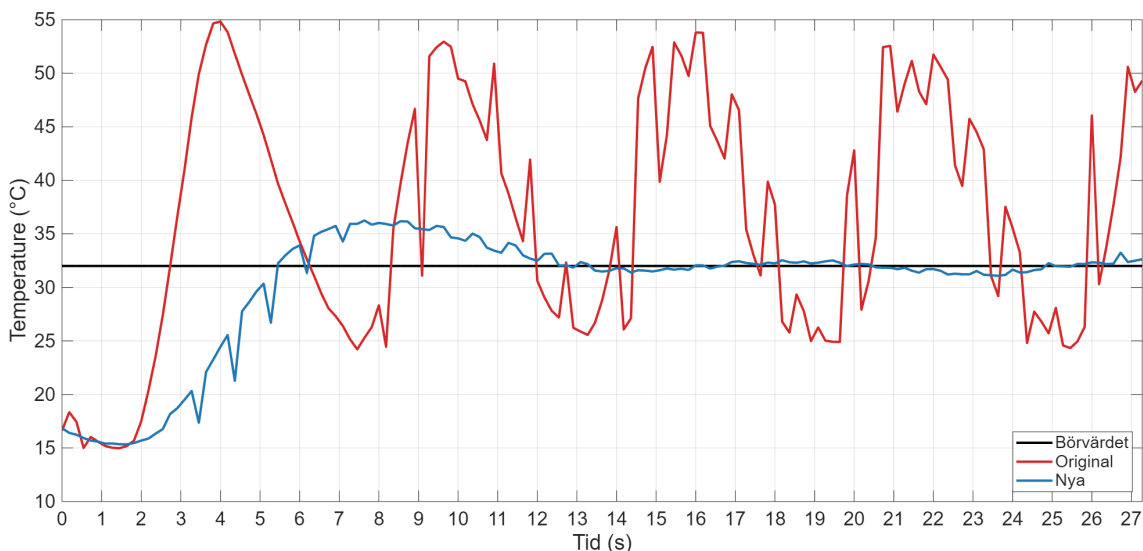
Figur 7.1: Högflödeskörning med originallösningen och den framtagna lösningen på högt flöde.

Som observeras i figur 7.1 är originallösningen instabil med stora svängningar mellan

plus 5 °C och minus 7 °C från börvärdet. Den nya lösningen har i princip helt eliminerat alla svängningar. Originallösningen har dock en halv sekund snabbare stigtid än den nya lösningen. Den nya lösningen är klart mycket bättre än originallösningen på alla andra vis.

7.2 Lägre flöden

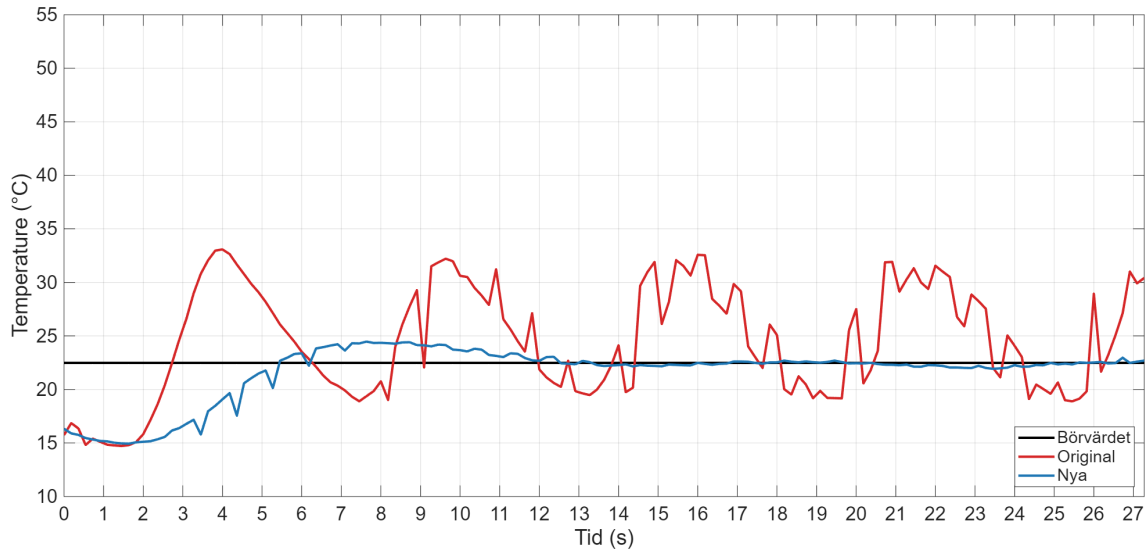
De tre lägre flödeslägena används i vanligt bruk i mindre utsträckning. I figur 7.2 nedan, observeras den framtagna lösning och originallösningen vid lågt flöde genom värmeelementet. Nedan visas endast fallet för lågt flöde eftersom samma argument och analys gäller alla tre fallen. Resultatet för de andra flödena kan hittas i bilaga B.



Figur 7.2: Lågflödeskörning med originallösningen och den framtagna lösningen på lågt flöde.

Även här är originallösningen instabil, dock med ännu större svängningar, mellan plus 23 °C och minus 7 °C. Den nya lösningen har nu en översväng på ca 4 °C. Originallösningen har dock en stigtid på ca 0,7 sekunder, vilket är ca 2 sekunder snabbare än den nya lösningen.

Svängningarna kan ses som om att det resulterande vattnet ut ur kranen skulle riskera att bli allt för varmt. Detta stämmer endast om munstycket skulle ändras till ett med lägre maximalflöde. Eftersom munstycket inte har ändrats till ett med lägre maximalflöde, blandades varmvattnet med kallvatten och får en lägre temperatur ut ur kranen. Den riktiga temperatur ut ur kranen går att beräknas. I figur 7.3 nedan, observeras den riktiga temperaturen ut ur kranen vid lågflödesfallet.



Figur 7.3: Lågflödeskörning med originallösningen och den framtagna lösningen på lågt flöde där temperaturerna är omräknade till den riktiga temperaturen ut ur kranen.

För originallösningen svänger den riktiga temperaturen på vattnet ut ur kranen mellan 19 °C och 33 °C med centrum på ca 22 °C. För den nya lösningen kommer den resulterande temperaturen att kännas som en översväng på mindre än 2 °C. Formeln för att beräkna den riktiga temperaturen ses i ekvation (7.1) nedan.

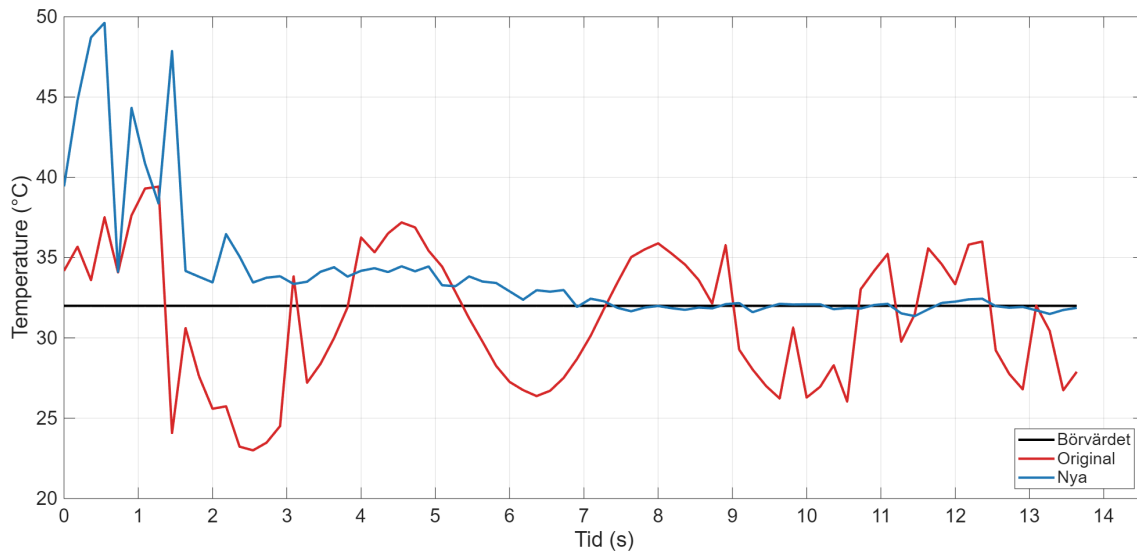
$$T_{Riktig} = \frac{F_{varm} \cdot T_{varm} + F_{kallt} \cdot T_{kallt}}{F_{totalt}} \quad (7.1)$$

Där F_{varm} är flödet för vattnet genom värmeelementet, F_{kallt} är flödet på kallvattnet till kranen, och F_{totalt} är det totala flödet ut ur kranen.

Precis som vid maximalt flöde är den nya lösningen bättre på nästan alla vis. När flödet minskar, ökar originallösningens brister.

7.3 Dipphantering

Vid körningar direkt efter varandra finns det restvärme kvar från den tidigare körningen. Detta kan resultera i en stor temperaturdipp vid nästkommande körning. I figur 7.4 nedan, observeras hur den framtagna lösningen och originallösningen hanterar detta scenariot vid maximalt flöde.



Figur 7.4: Dipptest med originallösningen och den framtagna lösningen.

Det relevanta i figuren 7.4 är det stora temperaturdippen i början. Originallösningen har inte implementerat något för att hantera detta scenariot. Därav den stora temperaturdippen i början som går till 9 °C under börvärdet. Den nya lösningen fångar upp temperaturdippen redan vid 2 °C över börvärdet och tar sedan ca 6 sekunder innan den uppnår jämvikt.

Dipphanteringen hanterar även dippen när värmeelementet är installerat i ett läge där det mesta av restvärmen ligger kring termistorn ut. I figur 6.10 observeras resultatet för dipphanteringen i ett sådant läge.

8

Diskussion

Examensarbetets mål var att utveckla regleringen i värmeelementet samt att undersöka och eventuellt reducera temperaturdippen som, med tidigare lösning, skedde efter körningar kort efter varandra. Regulatorn har gått från att vara instabil med stora svängningar till att nu vara stabil med en liten översväng. Detta innebär att användaren får en mer behaglig upplevelse eftersom vattnet inte längre svänger mellan varmt och kallt under användningen. Temperaturdippen har antingen reducerats med 70-80 % eller eliminerats helt, beroende på om värmeelementet är installerat vertikalt eller horisontellt. Med dessa resultat drar vi slutsatsen att målen har blivit uppfyllda.

8.1 Reflektioner

Som kan observeras i figur 7.1, har vi lyckats med att stabilisera regleringen och därmed uppfyllt det första målet i examensarbetet. I figur 7.4 observeras att även dipphanteringsmålet blev uppfyllt. I det stora hela är vi nöjda med våra resultat men vi vet att det går att förbättra regleringen ytterligare. Det finns även saker under arbetets gång som hade kunnat utföras bättre.

Under arbetets gång hade det varit bra om vi hade implementerat kod för att se värdet på integraldelen i regulatorn för att underlätta debugging. Med en synlig integraldel hade ett flertal problem och lösningar, som involverade integraldelen, förmodligen krävt färre antalet tester för att se varför något fungerar eller ej.

När vi implementerade de simulerade regulatorerna i den fysiska testbädden visade det sig att simuleringarna inte riktigt matchade med verkligheten. På den andra testbädden var det inte allt för stort problem men på den tredje versionen blev alla regulatorer instabila. Detta fick oss att tro att systemet hade ändrats såpass mycket att vi började göra nya stegsvarstester. Det visade sig att de nya testerna gav samma system som tidigare. Detta ledde till att vi fick manuellt ändra parametrarna i Matlab-koden för att ta fram rimliga regulatorer. Det skulle vara intressant att se vad instabiliteten av simuleringarna på tredje versionen av testbädden berodde på. En möjlig orsak kan vara att nya huvudfaktorer uppstod när konfigurationen ändrades.

8.2 Utmaningar under examensarbetet

När vi började köra testbädden för att erhålla våra stegsvar användes första versionen av testbädden med ett slutet system för vattenflödet. Vattenflödet kommer in och ut i samma behållare, som också stod på ett element. Detta resulterade i att temperaturen på vattnet in ökade successivt ju mer vi körde, vilket gjorde det svårt att utföra konsekventa tester. Detta resulterade i att när vi gjorde stegsvarstester för flödes- och effekthuvudfaktorerna ändrades också temperaturhuvudfaktorn istället för att vara konstant. Som tur var, var det endast flödeshuvudfaktorn som visade sig vara relevant på hur temperaturen för utflödet ändrades.

Därefter uppdaterades testbädden till den andra versionen där vattnet kommer direkt från byggnadens vattenledningar. Detta gjorde att vi kunde utföra tester med en mer konsekvent temperatur in på vattnet. Efter det kom en mindre uppdatering av testbädden, där kranens munstycke byttes till en med ett lägre flöde, det vill säga från 1,6 l/min till 1,3 l/min. Denna versionen av testbädden användes under större delen av examensarbetet. Därmed blev den första version av slutlösningen baserad på den andra testbädden. Detta resulterade i oväntade beteenden av vår lösning, när testbädden genomgick en tredje och sista uppdatering. Uppdateringen var ett nytt värmeelement med en ny flödesmätare där värmeelementet installerats horisontellt under kranen istället för vertikalt som den var förut, se figur 3.1. De oväntade resultaten kom från att restvärmen hamnar mer vid termistorn in än det gjorts tidigare. Detta resulterade i att dipplösningen vi tagit fram inte längre kunde hantera temperaturdippen lika effektivt. Detta löstes med att lägga till en boost samt sänka K_i -värdet lite, se delkapitel 6.6.2.

Först när testbädden uppdaterades till den tredje versionen blev robustheten relevant. Det var för att hantera olika maximalflöden som vi valde att utöka antalet flödeslägen på lösningen i hopp om att de skulle kunna hantera olika munstycken. Vi uppdaterade även dipphanteringen på ett sätt som gör att den fortfarande kan hantera gamla versioner av testbädden.

En genomgående observation under hela examensarbetet, var att mätvärdena har mycket brus, se exempelvis figur 6.2. Detta har lett till att data har varit svårtolkad och tvingat oss till att utföra upprepade tester för att tydliggöra vilken data som går att lita på. Vi vet inte vad bruset beror på men möjliga felkällor kan vara kod/konfigureringsfel, de individuella komponenterna, vattenturbulens, etc. Ett första test kan vara att ladda upp kod som endast läser av, och loggar, temperaturen för att se ifall bruset kommer från koden. Om bruset finns kvar bör de enskilda komponenterna testas. Detta kan ske genom att testa en komponent i taget. För att se om det är vattenturbulens som orsakar bruset kan en termistor placeras i stillastående vatten och se ifall bruset kvarstår vid uppvärmning.

8.3 Förslag på vidareutveckling

I koden för värmeelementet existerar det tre säkerhetsåtgärder som stänger av elementet. De tre säkerhetsåtgärderna är om termistorn ut eller termistorn på värmeelementets yta visar för hög temperatur samt om en regnsensor aktiveras. Av dessa har vi endast bekräftat att säkerhetsåtgärden för termistorn ut fungerar. Detta observerade vi när vi gjorde dipphanteringstesterna, då temperaturen ut ur värmeelementet ibland översteg säkerhetsgränsen och därmed stängde av värmeelementet. Framöver behövs det bekräftas att även de andra säkerhetsåtgärderna fungerar, det vill säga om värmeelementets utsida blir för varmt eller om värmeelementet läcker vatten. För att testa termistorn på värmeelementets yta kan den värmas upp samtidigt som elementet är på och se ifall det stängs av. Regnsensorn kan testas genom att droppa en vattendroppe på den och se ifall värmeelementet stängs av.

Parametrarna för den nya regulatorn är inte optimerade för alla flödeslägen. Fokus har legat på maximalflödet eftersom det är det vanligaste användarflödet. Detta innebär att det finns optimeringar som kan utföras beroende på om det är hastigheten på uppvärmningen av vattnet eller minimeringen av svängningarna som värderas mest.

Den framtagna lösningen är endast anpassad för en kran med ett specifikt maximalflöde. Om munstycket skulle bytas ut till ett med högre eller lägre maximalflöde skulle lösningen antingen bli långsammare eller mindre stabil. Detta går att lösa antingen genom att skapa en separat kod för varje munstycke som ska användas eller en kombinerad kod som ska kunna hantera ett flertal olika munstycken. Vi tror att det går att använda vår lösning på olika munstycken om parametrarna, på de lägre flödena, justeras.

Som tidigare nämnts påverkar värmeelementets orientering var restvärmen hamnar efter en körning. Den framtagna lösningen hanterar både ett vertikalt läge där termistorn ut är uppåt, samt ett horisontellt läge bra. Dock vet vi inte hur den skulle hantera ett omvänt vertikalt läge, det vill säga där termistorn in är uppåt. Detta skulle bli ett problem eftersom att all restvärme hamnar vid termistorn in istället för termistorn ut. Resultatet blir att dipphanteringen inte aktiveras vid nästa körning. En möjlig lösning skulle vara att ändra på dipphanteringen så att den läser av både ut- och in termistorerna istället för bara termistorn ut.

Det finns en dödtid i systemet, exakt varifrån det kommer är oklart. Mellan 50 till 60 ms kommer direkt ifrån koden men vi har inte hittat någon direkt förklaring till de resterande 90-95 % av dödtiden. Vi tror resten av dödtiden kommer från de fysiska komponenterna, men det är inget som är bekräftat. Med tester av de fysiska komponenterna kan lösningar förhoppningsvis hittas som minimerar dödtiden.

För att vidareutveckla och förbättra produkten behövs mer användardata. Det skulle vara bra att veta hur användarna värderar uppvärmningstid och temperatursvängningar, samt hur användarna upplever användandet av andra flöden.

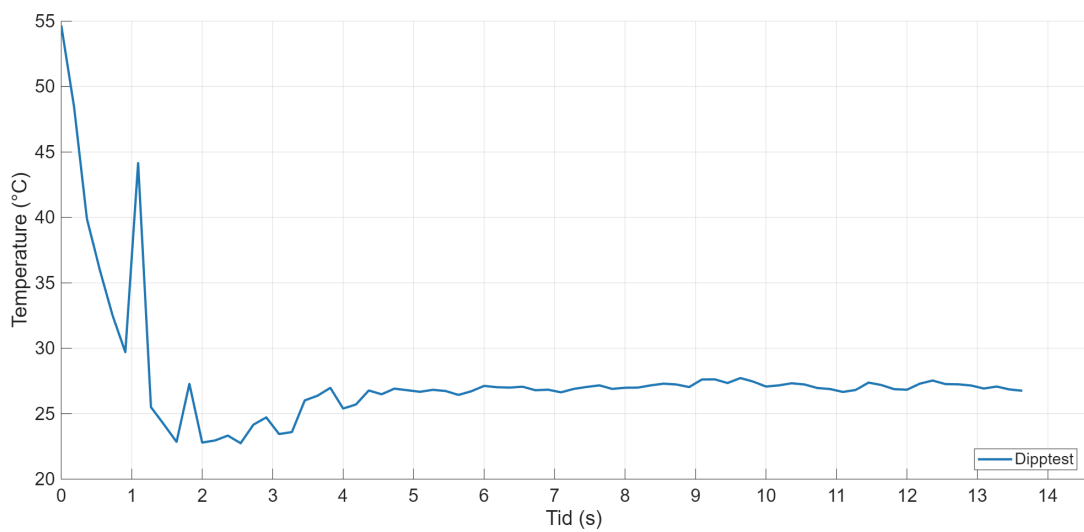
I slutet av examensarbetet upptäckte handledaren på Vyse tech att temperaturen som termistorerna visade inte stämde överens med verkligheten. Det vill säga när termistorn ut visade 36 °C var vattnet ut ur värmeelementet närmare 32 °C. Vi är ganska säkra på att det är beräkningen av temperaturerna i koden som inte stämmer. Det vill säga i koden, för temperaturberäkningen från NTC-termistorerna, används fel parametervärden. Lösningen på detta är att använda rätt värden från databladet för NTC-termistorn alternativt byta från NTC-termistorer till en annan sorts temperaturgivare, exempelvis Pt100. Detta problemet påverkar inte själva examenarbetets lösning utan bara temperaturen ut ur prototypen, det vill säga vilket börvärde som behöver användas.

Litteraturförteckning

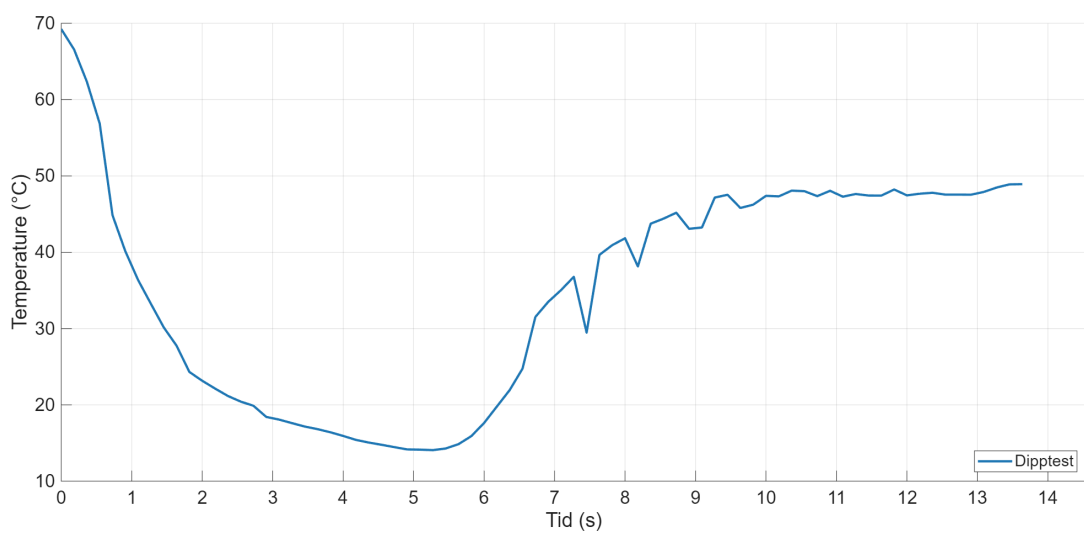
- [1] K. Forsman, *Reglerteknik för processindustrin*. 1:3. uppl, Lund, Sverige: Studentlitteratur AB, 2010.
- [2] T. Hägglund, *Praktisk processreglering*. 2. uppl., Lund, Sverige: Studentlitteratur AB, 1997.
- [3] S. Galeani, S. Tarbouriech, M. Turner och L. Zaccarian, "A Tutorial on Modern Anti-windup Design," *European Journal of Control*, vol. 15, nr. 3, ss. 418-440, 2009, doi: 10.3166/ejc.15.418-440.
- [4] K. J. Åström och T. Hägglund, *Advanced PID Control*, Research Triangle Park, NC, USA: International Society of Automation, 2006.

A

Dipptester



Figur A.1: Dipptest med lågt flöde.

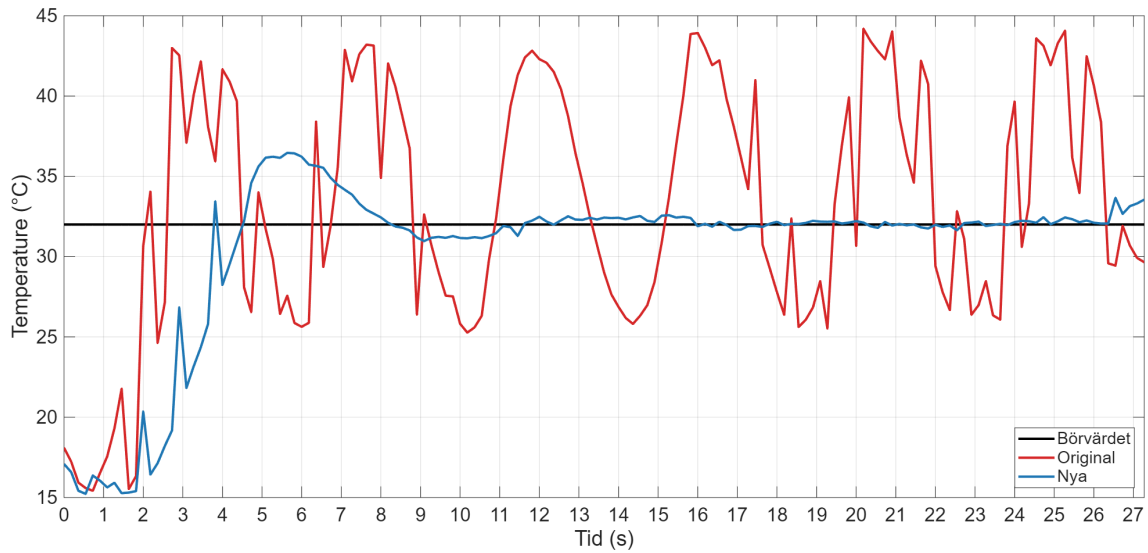


Figur A.2: Dipptest med extra dödtid från säkerhetsåtgärd.

B

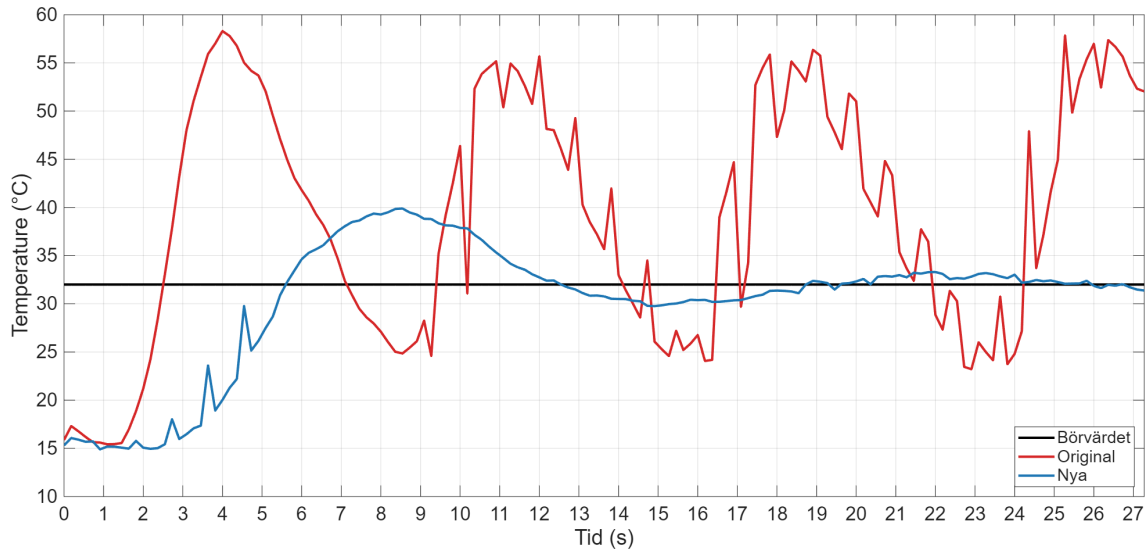
Fler resultat

Bilaga B

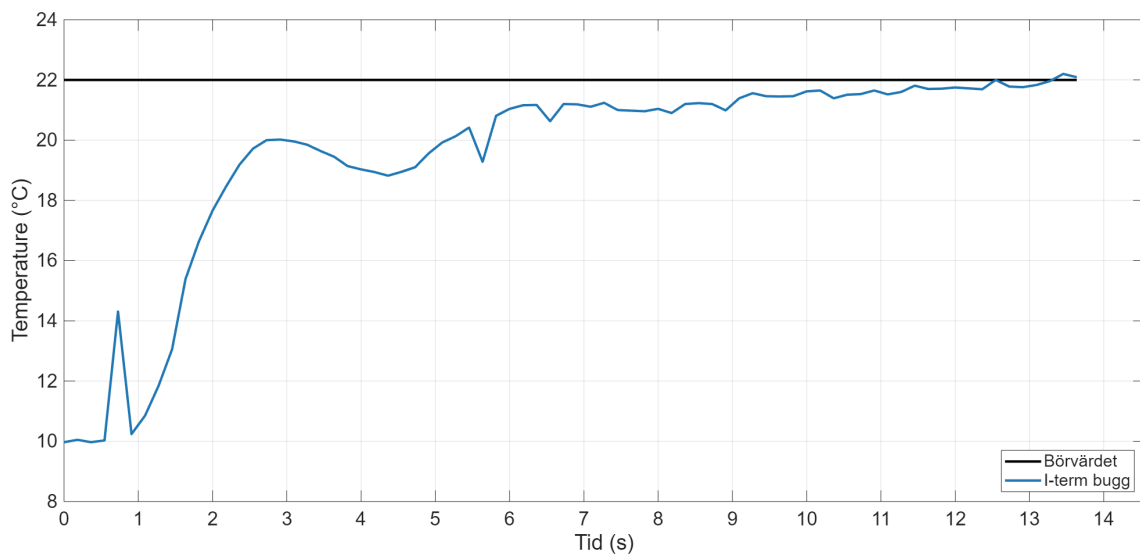


Figur B.1: Medelflödeskörning med originallösningen och den framtagna lösningen på medelflöde.

B. Fler resultat



Figur B.2: Mycket Lågt flödeskörning med originallösningen och den framtagna lösningen på mycket lågt flöde.



Figur B.3: Övåntad dipp i uppvärmningen innan integraldelen hanterades på rätt sätt.

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige
www.chalmers.se



CHALMERS