

# CHALMERS



## **Regulatorstudie av kylsystem på Rya Kraftvärmeverk**

**Controller study of cooling system at the combined heat and power  
plant in Rya**

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Mekatronik av  
**Simon Lehtonen**  
**Martin Granström**

Examinator  
**Manne Stenberg**

*Institutionen för signaler och system*  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2015



# Förord

Examensarbetet om kylventilreglering är utfört av två mekatronikingenjörer på Chalmers tekniska högskola under institutionen Signaler och system. Detta arbete omfattar 15 högskolepoäng och är den avslutande delen i utbildningen som totalt innefattar 180 högskolepoäng.

En stor del i utbildningen till mekatronikingenjör är reglerkurser samt termodynamik. Bland annat ingår det en projektkurs där eleverna får i uppgift att programmera och reglera ett system med vattentankar. Ett examensarbete på Göteborg Energi som handlar om reglering av ångtemperatur passar därför alldeles utmärkt in på utbildningen. Att få inblick i hur ett så stort system, som det på Rya Kraftvärmeverk, fungerar har varit mycket givande och lärorikt.

Tack till, Victor Karlsson på Göteborg Energi som varit den huvudsakliga handledaren under detta arbete.

Tack till, Bertil Thomas på Chalmers tekniska högskola vid institutionen Signaler och system som handlett vid allmänna frågor om reglering och examensarbete.

Tack till, Manne Stenberg på Chalmers tekniska högskola vid institutionen Signaler och system som varit examinator under detta examensarbete.

# Sammanfattning

Kraftvärmeverket i Rya ägs av Göteborg Energi AB. Detta verk använder sig utav het ånga för att driva en turbin där ångtemperaturen behöver regleras för att framförallt skydda utrustningen. Ångtemperaturen påverkas av tre överhettare och två kylvattenventiler vars flödesmängd styrs med kaskadkopplade PI-regulatorer. För tillfället består kaskadklustret av tre regulatorer per kylvattenventil där två av dem använder sig utav olika ångtemperaturer som insignaler medan den tredje använder flödesmängden på kylvattnet. Det fanns anledning att tro att den nuvarande uppsättningen av regulatorer inte var optimal. Syftet med denna studie blev därför att undersöka om regleringen kan fungera likvärdigt eller bättre med endast två regulatorer per ventil när flödesregulatorn tagits bort. Arbetet har främst bestått av modellering och simulering av kylsystemet och att försöka få denna modell så lik verkligheten som möjligt. Detta så att ändringar i systemet skulle representera verkliga ändringar så noggrant som det bara går. De resultat som kom fram via simuleringen visade att två regulatorer faktiskt fungerar lika bra som tre, om än något mer instabilt. Insvängningarna vid temperaturändringar tog nästan exakt lika lång tid då två och tre regulatorer användes för att styra kylvattenflödet. Detta betyder att man vid byggen av denna sorts kylsystem i framtiden inte behöver lika många komponenter vilket spar något på resurserna.

# Abstract

The combined heat and power plant at Rya is owned by Göteborg Energi AB. This plant uses heated steam to power a turbine where the temperature of the steam needs controlling to protect the equipment. The temperature of the steam is being affected by three heaters and two cooling sprays. The flow of the water that passes through the cooling sprays are being controlled by valves that in turn are being controlled by cascade coupled PI-controllers. At this time the cascade cluster consists of three controllers per cooling valve where two of them looks at different steam temperatures and the last one looks at the flow rate of the cooling water. There was reason to believe that the current controller build was not optimal. The purpose of this study was therefore to examine if the controlling could be more efficient or equal to the current system with just the two controllers where the controller that looks at the water flow had been removed. The work has mainly consisted of modeling and simulation of the cooling system and to try and get the model to be as similar to the real system as possible. So that changes in the model would represent actual changes in the system to get reliable data. The results that emerged during the simulation showed that two controllers could in fact be as effective as three, if only a little bit more unstable. The time it took for the temperature to reach the set point was almost exactly the same with two as with three controllers. This means that when constructing this sort of cooling systems in the future you will not have to use as many components which mean that you can conserve some resources.

# Innehållsförteckning

|       |                                           |    |
|-------|-------------------------------------------|----|
| 1.    | Inledning .....                           | 3  |
| 1.1   | Bakgrund .....                            | 3  |
| 1.2   | Syfte.....                                | 3  |
| 1.3   | Avgränsningar.....                        | 4  |
| 1.4   | Precisering av frågeställningen .....     | 4  |
| 2.    | Teoretisk bakgrund.....                   | 5  |
| 2.1   | Kraftverket i helhet.....                 | 5  |
| 2.2   | Systemet och produktion .....             | 6  |
| 2.2.1 | Gasprocessen.....                         | 6  |
| 2.2.2 | Ångprocessen .....                        | 7  |
| 2.2.3 | Delsystemet som arbetet berör .....       | 8  |
| 2.3   | MATLAB och Simulink.....                  | 9  |
| 2.4   | Thermolib .....                           | 10 |
| 2.5   | Thermolibblock.....                       | 10 |
| 2.5.1 | Ventilblock.....                          | 10 |
| 2.5.2 | Blandningskammare.....                    | 11 |
| 2.5.3 | Överhettare .....                         | 12 |
| 2.5.4 | Model setup .....                         | 12 |
| 2.5.5 | PI regulator .....                        | 13 |
| 2.5.6 | Flödeskälla .....                         | 13 |
| 2.6   | Kaskadreglering .....                     | 14 |
| 2.7   | Parametrisk identifiering.....            | 14 |
| 2.8   | Ventil .....                              | 15 |
| 2.9   | Bernoullis ekvation.....                  | 15 |
| 3.    | Metod .....                               | 16 |
| 3.1   | Införskaffa allmän information .....      | 16 |
| 3.2   | Insamling av data.....                    | 16 |
| 3.3   | Modellering av kylsystemet .....          | 16 |
| 3.4   | Validering av modell.....                 | 16 |
| 3.5   | Regulatorförändringar.....                | 17 |
| 4.    | Genomförande.....                         | 18 |
| 4.1   | Skapa förståelse för systemet .....       | 18 |
| 4.2   | Datainsamling.....                        | 20 |
| 4.3   | Modellering .....                         | 21 |
| 4.4   | Validering och kalibrering mot data ..... | 26 |

|       |                                                                    |     |
|-------|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.4.1 | Ventilen .....                                                     | 26  |
| 4.4.2 | Överhettare, Blandningskammare och resten av systemet.....         | 28  |
| 4.4.3 | Regulatorer .....                                                  | 29  |
| 4.4.4 | Justering av regulatorer.....                                      | 32  |
| 4.5   | Börvärdesrampning.....                                             | 34  |
| 4.6   | Eliminering av Flödesregulatorn.....                               | 36  |
| 4.7   | Tester.....                                                        | 37  |
| 5.    | Resultat.....                                                      | 38  |
| 6.    | Diskussion och slutsats .....                                      | 42  |
| 6.1   | Diskussion kring alternativ modellösning.....                      | 42  |
| 6.2   | Diskussion kring förenklingar i modellen samt modellkvalitet ..... | 45  |
| 6.2.1 | Tryckventilen .....                                                | 45  |
| 6.2.2 | Fördröjning i systemet.....                                        | 45  |
| 6.2.3 | Tryckfall i ledningar .....                                        | 46  |
| 6.2.4 | Ytterligare diskussion .....                                       | 46  |
| 6.3   | Slutsats .....                                                     | 47  |
| 7.    | Referenser .....                                                   | 48  |
|       | Bilaga 1 .....                                                     | I   |
|       | Bilaga 2 .....                                                     | II  |
|       | Bilaga 3 .....                                                     | III |

# Beteckningar

- PID      Proportionell, Integrerande, Deriverande      Vanligaste regleringstypen
- MWh    MegaWattimme      Enhet för energi, 1 MWh motsvarar 1 MW under en timme
- $\dot{m}$       Flödeshastighet [kg/s]
- E      Effekt i [W]
- h      Entalpi [kJ/kg]
- Pa      Pascal    Enhet för tryck
- Bar      Enhet för tryck, 1 Bar motsvarar 100 kPa
- Börvärde      Det värde man vill uppnå som regulatorerna arbetar efter
- Ärvärde      Det värde som jämförs med börvärdet för att beräkna styrsignalen
- k      Tryckförlust-faktor [ $\text{Pa}/(\text{kg/s})^2$ ] Materialfaktor som påverkar tryckförlusten
- KVV      Kraftvärmeverk
- Kv      Ventilkoefficient [ $\text{Pa/g}^2$ ]
- NOx      Kväveoxid
- ÖH      Överhettare





# 1. Inledning

Nedan förklaras främst vilka de huvudsakliga arbetsuppgifterna kommer vara i denna studie. En bakgrundsbeskrivning om Rya Kraftvärmeverk ingår också för att ge allmän information om storleken på anläggningen och med det få en insikt i hur viktigt ett effektivt kylsystem är

## 1.1 Bakgrund

Kraftverk som använder sig utav ångturbiner vill ha optimal temperatur på den ånga som förs in i turbinen. En optimal temperatur innebär inte att ångan skall vara så het som möjligt, då en för varm ånga kan skada material och minska verkningsgraden. Vill man inte köra anläggningen på full kapacitet är även en svalare ånga att föredra. Ett kylsystem är därför nödvändigt för att hålla ångan på rätt temperatur.

Göteborgs Energi AB driver Rya Kraftvärmeverk på Hisingen. Det är en anläggning som har kapacitet att ge ut 1250 GWh/år och 1450 GWh/år med elektricitet respektive värme, vilket motsvarar ungefär 30 % av Göteborgs värme- och elbehov [4]. Elproduktionen kommer från tre gasturbiner och en ångturbin. Ångturbinen drivs av het ånga med temperatur runt 540 °C som bland annat värms upp utav ångpannor [3]. Det kylsystem som hjälper till att balansera temperaturhöjningen som ångpannorna ger består av två kylvattenflöden där mängden kylvatten som släpps igenom bestäms av ventiler som kan öppnas olika mycket. Dessa ventiler styrs för tillfället med tre stycken PID-regulatorer.

Det är viktigt att temperaturen inte överstiger 542 °C med mer än max ett fåtal grader då det kan leda till att utrustningen skadas. Därför är det mycket viktigt att systemet är stabilt och inte svänger över för mycket. Skulle regulatorerna vara för snabba kan systemet ta skada, och vid långsam reglering tar det längre tid för systemet att komma upp i önskad temperatur vilket inte är önskvärt. Man har anledning att tro att regulatorerna inte är optimala för det arbete de utför. Att använda sig av den bästa möjliga utrustningen är såklart önskvärt ur många synpunkter. En bättre regulator kan till exempel öka stabiliteten hos systemet under temperaturändringar, eller kanske till och med förbättra elproduktionen som i sin tur ger en positiv miljöpåverkan.

## 1.2 Syfte

Arbetet går ut på att undersöka om förbättringar kan göras på kylvattenregulatorerna, och se om den nuvarande regulatoruppsättningen kan optimeras genom att ta bort en av de kaskadkopplade regulatorerna per kylsystem.

Uppdraget skall leda till en modell av reglersystemet och en undersökning om förbättringar kan göras.

## 1.3 Avgränsningar

Hela ångturbinssystemet består av tre ångpannor [3] som alla innehåller var sitt kylsystem. Pannorna skall vara mer eller mindre identiska vilket gör att arbetet endast riktar in sig på en utav dessa.

Hela systemet i ångpannan är komplext med många olika variabler att ta hänsyn till. Exempel på dessa variabler är tryck, vatten- och gasflöden, temperaturer, ventilberoenden, rörlängder och så vidare. Detta leder till vissa förenklingar i modelleringen av systemet. Eftersom mycket av arbetet kretsar kring modellen påverkar dessa förenklingar de slutgiltiga resultaten markant.

En stor avgränsning är att det inte är möjligt att testa det verkliga systemet utan återkoppling från utsignal till insignal. De nuvarande regulatorerna kan inte kopplas bort under drift, vilket gör att all data som används är data från ett redan reglerat system. Detta eftersom att testköra ett system av den här magnituden skulle kosta mycket pengar och kan skada komponenterna. Det hämmar mängden alternativ som kan användas vid parametrisering och modellering. Att se på en oreglerad process ger information om hur systemet beter sig och utifrån detta kan metoder användas för att modellera upp ett system med återkoppling. Det är därför inte heller realistiskt att provköra nya regulatorer mot den verkliga anläggningen utan långa tester och noggranna simuleringar.

## 1.4 Precisering av frågeställningen

- Är den nuvarande regleringen optimal?
- Fungerar kylsystemet utan flödesregulatorn?
- Går det att skapa en bra modell med Thermolib?

## 2. Teoretisk bakgrund

Här presenteras information om Rya KVV och de verktyg som har använts.

### 2.1 Kraftverket i helhet

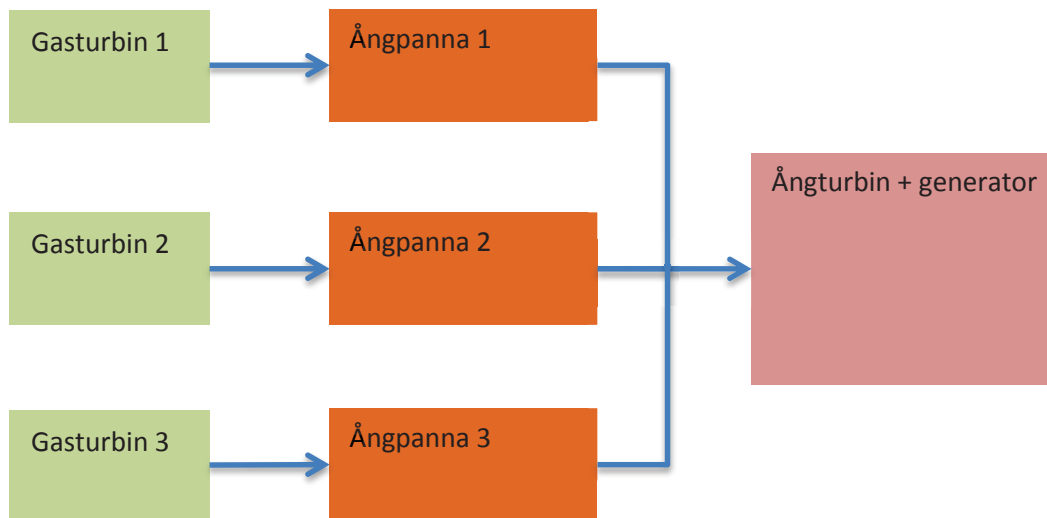
Rya kraftvärmeverk är en av Göteborgs Energis anläggningar för produktion av fjärrvärme och el. Anläggningen är placerad längs med Göta älv intill Rya skog.

Rya KVV:s huvudsakliga uppgift är att producera fjärrvärme och el med naturgas som bränsle. Detta är ett betydligt miljövänligare alternativ än till exempel kolkraftverk. Att en hög verkningsgrad kan nås med naturgas bidrar också till en miljövänligare process. Anläggningen har totalverkningsgrad på ca 92.5%, att en så hög verkningsgrad kan nås beror på att systemet innehåller tre stycken gasturbiner i ena änden och en ångturbin i andra änden som alla används för att producera el [3]. Naturgasen levereras via ledningar ifrån Danmark och vid nödfall kan kraftvärmeverket även drivas av dieselolja. Syntet och biogas kan också användas som bränsle efter vissa modifikationer på anläggningen.

Rya KVV står idag för ca 35 % av all fjärrvärme och ca 30 % av all el som Göteborg använder vilket motsvarar ca 1450 GWh/år för värme och 1250 GWh/år för el [3].

Systemet är byggt på det sättet att produktionen av fjärrvärme och el är beroende av varandra och därför måste båda produceras samtidigt. Detta är anledningen till att anläggningen endast är igång på den kalla delen av året då fjärrvärme behövs. Under resterande delen av året hålls anläggningen startklar ifall ett extra behov av el och värme skulle uppkomma. Rya KVV kan starta upp sitt system utan att vara uppkopplad till något annat nät. Det betyder att Rya KVV kan tillföra Göteborg med el även om ett avbrott i riksnätet har inträffat. Detta kallas för ö-drift.

Anläggningen har tre stycken delsystem som sammankopplas till ångturbinen. Dessa delsystem består av en gasturbin och en ångpanna per styck. Det innebär att anläggningen utan problem kan köras i flera olika tillstånd, beroende på hur mycket el och värme som önskas, genom att koppla bort ett eller två av delsystemen. Anläggningen är därför flexibel. I varje panna finns även tillsatseldning som ökar temperaturen och maximerar elproduktionen från ångturbinen vid varje given värmeproduktion.



Figur 1, Förenklad översikt av systemet.

Om endast el behövs, av någon anledning, kan värmen som inte är önskvärd kylas bort i älven. Det är ej möjligt att kyla bort hur mycket som helst eftersom det påverkar naturen. I miljötillståndet som Göteborg Energi AB tillhandahåller för Rya KVV är det endast tillåtet att kyla maximalt 209 MW.

## 2.2 Systemet och produktion

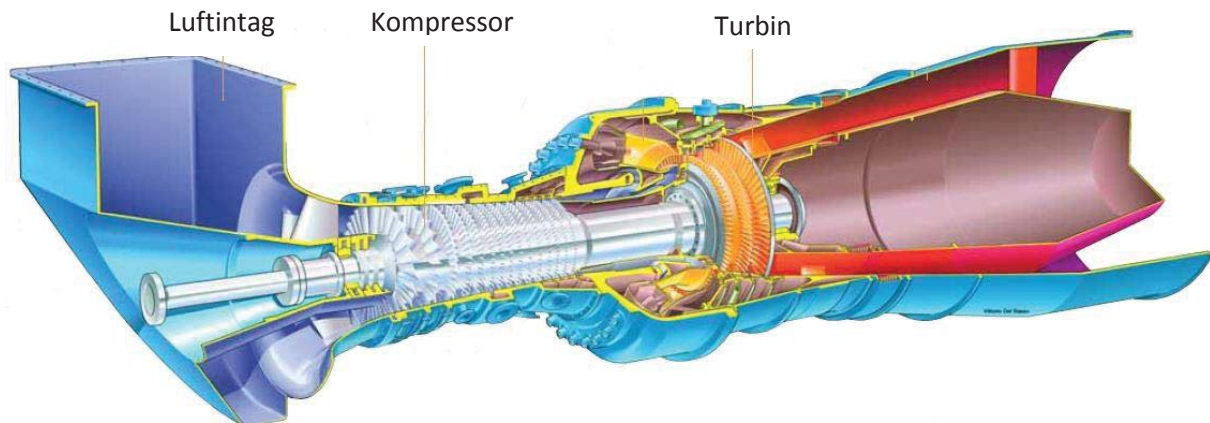
### 2.2.1 Gasprocessen

I ena änden av varje ångpanna sitter det en Gasturbin av modellen Siemens SGT 800. Detta är en välbeprövad och pålitlig turbin som används i liknande system världen över.

Naturgas matas in i gasturbinens brännkammare där den blandas med luft som har sugits in genom gasturbinens tak. Innan luften når brännkammaren höjs trycket via en kompressor och temperaturen på luften ökar till ca 400 °C. Väl i brännkammaren så förbränns gas- och luftblandningen till rökgas och får en temperatur på ca 1200 °C. Högsta möjliga temperatur vill nås här, eftersom högre temperatur ger en högre verkningsgrad på elproduktionen via gasturbinen. Temperaturen är begränsad till 1200 °C eftersom materialen inte klarar högre temperaturer och för höga halter NO<sub>x</sub> bildas [3].

Rökgasen flödar genom turbindelen där den expanderar och driver på turbinaxeln, som i sin tur driver elgeneratorn och kompressorn som används vid luftupptaget. Väl i turbinen tappar rökgasen en stor del av sin temperatur och kommer ut på andra sidan med en temperatur på ca 538 °C. Denna ände av turbinen är sammankopplad med en avgaspanna där rökgasen tillsatseldas upp till ca 1000 °C för att maximera elproduktionen. Efter tillsatseldningen flödar rökgaserna genom två stycken ekonomiser där vattnet från ångprocessen flödar åt motsatt håll och tar upp stora delar av värmen. Därefter blandas rökgaserna med ammoniak i gasform för att sedan flöda genom en katalysator. Katalysatorn renar gasen och förminskar mängden NO<sub>x</sub> med ca 70 %. Kväveoxiden reagerar med den

tillförda ammoniakånga och bildar vanligt kväve vilket är ofarligt för naturen. När avgaserna når slutet av processen har de en temperatur på ca 70 °C [3].

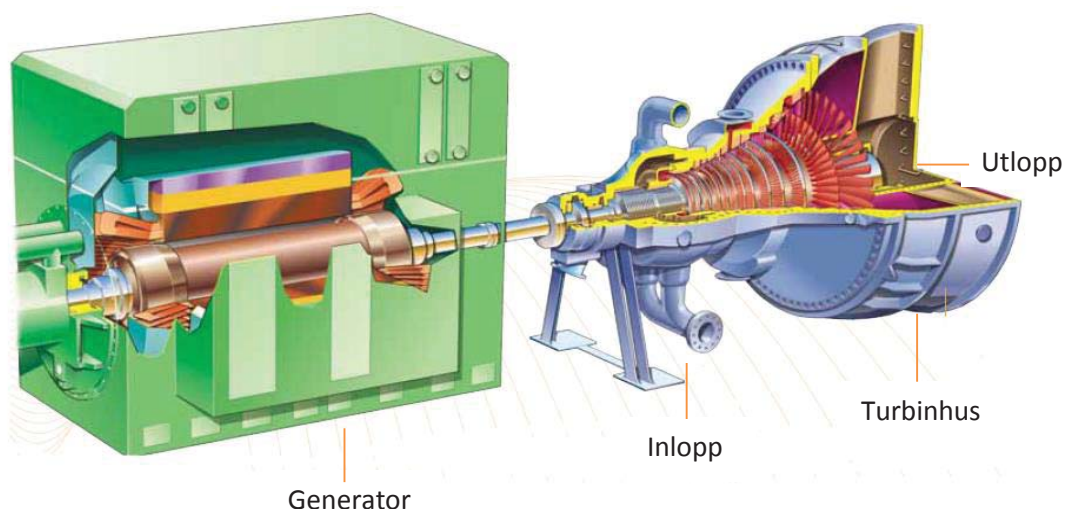


Figur 2, Gasturbin [3].

### 2.2.2 Ångprocessen

Innan vattnet hettas upp av rökgaserna från gasprocessen, pumpas det upp till ett tryck på ca 100 bar. Därefter flödar det genom två ekonomiser där det absorberar en stor del värme från rökgaserna. Sedan samlas vattnet upp i en ångdom där ånga och vatten separeras. Det vatten som ännu inte har omvandlats till ånga under upphettningen, flödar runt i systemet ännu en gång och denna cykel fortsätter tills det blivit varmt nog för att förångas. Den del av vatten som har blivit ånga överhettas till 540 °C med hjälp av tre stycken överhettare och två stycken nedkylningssprayer [3]. Den första nedkylningssprayer sitter mellan ÖH1 och ÖH2 och den andra sitter mellan ÖH2 och ÖH3.

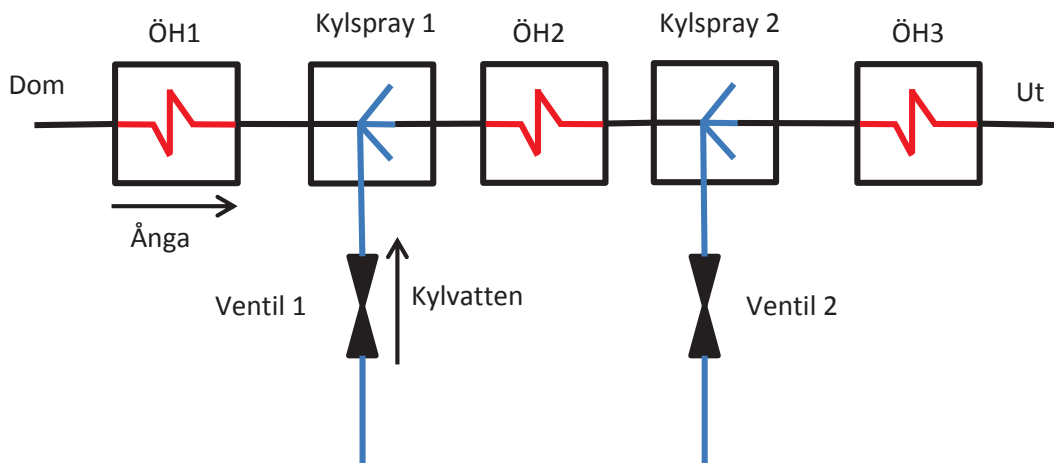
Efter ÖH3 sammanförs ångan med ångan från de andra avgaspannorna och sedan flödar det genom en ångturbin av modellen Siemens SST-900. Denna ångturbin är precis som gasturbinerna, en välbeprövad och pålitlig produkt. Väl inne i ångturbinen flödar ångan med en hastighet på ca 700 km/h när den träffar skovlarna som används för att driva på turbinaxeln. Turbinaxeln är sammankopplad med en rotor som i sin tur driver en elgenerator [3].



Figur 3, Ångturbin med tillhörande generator [3].

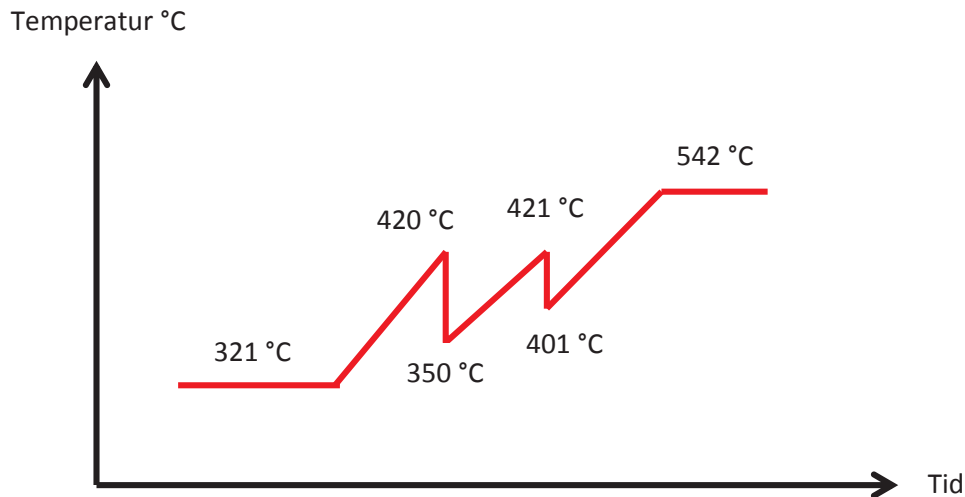
Ångan har nu bytt form till vatten igen och går igenom en reningsprocess för att sedan flöda igenom systemet på nytt.

Det totala systemet består av tre delsystem som alla är sammankopplade och använder en gemensam ångturbin. Temperaturerna från de olika delsystemen måste stämma överens för att ångturbinen skall klara av denna typ av inflöde. Det räcker inte med endast en överhettare, det blir för opålitligt och ostabilt. Istället används tre överhettare med nedkylningssprayer mellan dem, för att bättre kontrollera uttemperaturen.



Vid nedkylningssprayerna förblandas ångan, som har värmts upp av rökgaserna, med vatten som har en betydligt lägre temperatur.

8



Figur 5, Graf som visar hur temperaturen förändras av överhettare och nedkylning.

## 2.3 MATLAB och Simulink

MATLAB är uppdelat i två stycken huvuddelar, ett interaktivt gränssnitt och ett programmeringsspråk av typen högnivå. Tillsammans skapar dessa delar ett verktyg för bland annat numeriska beräkningar, algoritmutveckling, dataanalys och reglerteknik. MATLAB är ett väletablerat verktyg som används av universitet och företag världen över. Främst inom matematik och teknik.

Det finns ett stort utbud med tilläggsprogram som kan användas till MATLAB. Dessa kan underlätta arbetet för användaren stort, eftersom det anpassas efter dennes behov och blir mer personligt. MATLAB klarar även av att förstå algoritmer och kod som är skriven med språken java, C och C++ [1].

Företaget bakom MATLAB heter MathWorks, det är ett stort och väletablerat bolag med över 3000 ingenjörer som bland annat arbetar med förbättring och vidareutveckling av deras produkter. Vid sidan av MATLAB är en annan av deras största produkter Simulink. Simulink är ett verktyg där användaren visuellt kan bygga upp en modell med hjälp av färdiga block. Med hjälp av ett stort bibliotek av färdiga block är det stor chans att användaren skall klara av att skapa en korrekt modell som representerar motsvarande verkliga system. Det finns även ett stort utbud av tillägg för Simulink om det ursprungliga biblioteket inte räcker till.

Modellering och analys med Simulink är ett mer kostnadseffektivt sätt att testa och validera ett system än att experimentera med det verkliga systemet. Det finns även möjlighet att koppla samman verkliga system med Simulink system vilket gör det möjligt att testa sig fram med olika typer av regelsystem och styrningslösningar innan all hårdvara är inkopplad och korrekt [1]. Det är även betydligt enklare att utföra ändringar i en modell än att göra det på verklig hårdvara.

MATLAB och Simulink är delvis sammankopplade. Det betyder att man kan använda algoritmer och data från MATLAB i simulinkblock och att testresultat och analysdata går att spara som vektorer i MATLAB för att sedan kunna användas i andra tillämpningar. Det finns block i Simulink som kan skraddarsys efter behov. Dessa block använder sig av funktioner från MATLAB [1].



## 2.4 Thermolib

Thermolib är ett tillägg (även kallat Toolbox) till Simulink som används för modellering och utveckling av termodynamiska system. Thermolib är framtagen för att underlätta och effektivisera arbetet för processingenjörer. Syftet är att Thermolib skall sköta alla termodynamiska beräkningar och analyser så att användaren skall kunna spara tid och fokusera på modellens helhet.

Thermolib innehåller färdiga block för olika termodynamiska processer. Dessa block är anpassade så att de ska representera verkliga motsvarigheter så korrekt som möjligt. De innehåller bland annat termodynamiska funktioner som beräknar eventuella förändringar i systemet såsom tryck, flöde och temperaturskillnader. Användaren bestämmer själv startvärdena och sedan sköter blocken själva alla förändringar som sker under processens gång [2].

De vanligaste komponenterna som används i termodynamiska system idag är representerade med ett block i Thermolib. Några exempel på sådana komponenter är ventiler, turbiner, pumpar och förbrännare. Dessa block går att modifiera så att användaren kan matcha dem med de verkliga komponenterna som skall användas. Om dessa block inte räcker till, finns det även stora möjligheter för användaren att modifiera blocken eller sammanfoga dem med egenbyggda block av MATLAB funktioner. Thermolib-blocken kan även sammankopplas med blocken från Simulinks vanliga bibliotek [2].

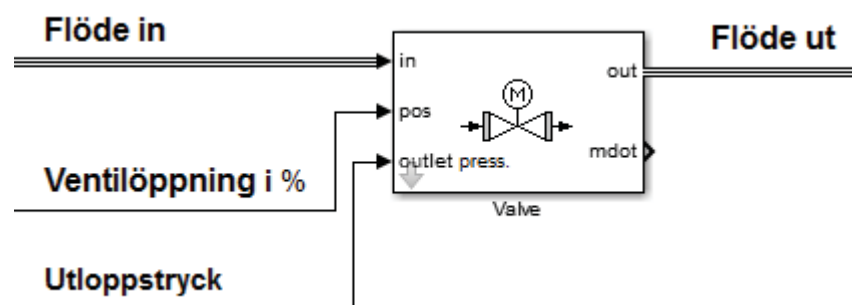
Med Thermolib följer det även med en stor databas med termofysikaliska egenskaper för de vanligaste ämnena som idag används i processindustrin [2]. Användaren kan själv utöka denna databas med fler ämnen om så önskas.

Thermolib är som sagt väldigt komplext och avancerat och klarar av att hantera system som innehåller flöden som är en blandning av olika ämnen. Det klarar även av att hantera flöden som är i flera faser. Alltså flöden som innehåller både vätska och gas.

## 2.5 Thermolibblock

Det finns en stor mängd block i Thermolib som beskriver komponenter och delar i termodynamiska processer. I detta kapitel beskrivs de block som används för att skapa den modell som används i detta projekt

### 2.5.1 Ventilblock

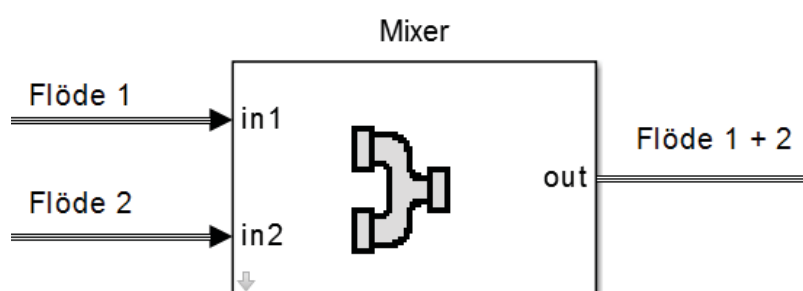


Figur 6, Ventilblock med tillhörande inflöden och signaler.

För att bestämma hur stort flöde som skall in i en process används ett block som heter valve. Detta block representerar en ventil och klarar av att modellera fyra olika typer av ventiler. Varav tre är passiva och en är aktiv. De passiva ventiltyperna beräknar alla tryckfallet som sker på flödet när det passerar genom ventilen. Skillnaden på de tre olika passiva typerna är att de använder sig av olika beräkningssätt. Den aktiva typen beräknar flödet beroende på det utloppstryck användaren själv har bestämt [10].

Hur mycket ventilen skall släppa igenom bestäms genom hur stor öppningen är. I detta block används procent där 0 % motsvarar helt öppen och 100 % motsvarar helt stängd. Antalet procent skrivs decimalt. 50 % skrivs alltså som 0.5.

## 2.5.2 Blandningskammare

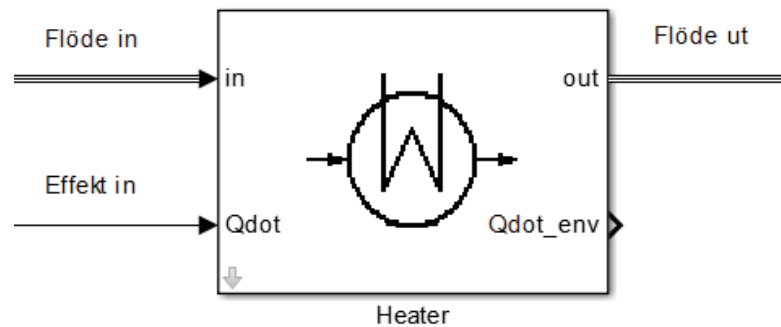


Figur 7, Blandningskammare med tillhörande flöden.

För att kunna blanda två olika flöden behövs blocket som kallas för Mixer. Detta är ett block som representerar en adiabatisk blandningskammare där två olika flöden blandas och blocket beräknar sedan trycket, temperaturen och massflöde på utloppet.

Mixerblocket kan ställas in på två olika sätt. Typ 1 kan helt enkelt blanda två medium oberoende av vilken fas de befinner sig i och beräkna korrekt temperatur, tryck och massflöde på utflödet [2]. Typ 2 är en mer avancerad version som även klarar av att beräkna ration av gas och vätska på utflödet om molration på mediumerna är definierade.

### 2.5.3 Överhettare

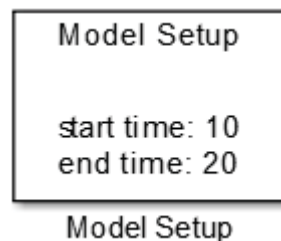


Figur 8. Överhettare med tillhörande flöden och signaler

För att höja temperaturen på ett flöde finns ett block som kallas för Heater. Användaren bestämmer hur mycket temperaturen ska förändras genom att mata in hur mycket effekt denna vill tillföra eller utvinna. Temperaturen höjs om den tillföra effekten är positiv och den sänks om den tillförda effekten är negativ.

Det finns även möjlighet att bestämma hur stort tryckfallet skall vara under överhettningen och även hur mycket värme som skall förloras till omgivningen [10]. Värme till omgivningen beräknas med hjälp av storlek på överhettaren och temperatur i omgivningen.

### 2.5.4 Model setup

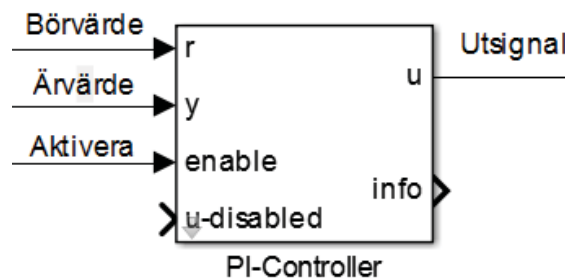


Figur 9, Model setup blocket.

För att kunna skapa en modell med Thermolib är blocket Model setup ett måste. Detta block ser till att all termodynamisk data och variabler inkluderas i arbetsområdet. Användaren matar in vilka filer och ämnen som skall användas och model setup laddar in dessa från ett bibliotek som medföljer vid installationen av thermolib [2]. Dessa filer innehåller data om kemiska och termodynamiska egenskaper för olika ämnen vid olika tillstånd. Användaren kan själv ändra i dessa filer för att tillföra eller ta bort data.

Model setup ser alltså till att alla data som krävs för att de andra blocken som används i modellen skall fungera korrekt, ligger inkluderade i arbetsområdet. Modelsetup ser även till att energibalans och flödesbalans kan uppstå.

## 2.5.5 PI regulator



Figur 10, PI regulator med tillhörande in och ut signaler.

I thermolib finns även block som föreställer en PI regulator. En PI regulator innehåller en förstärkande del P och en integrerande del I. I regulatorn används dessa delar för att beräkna en utsignal beroende på hur stor skillnad det är mellan börvärdet och ärvärdet. Regulatorns mål är att skicka ut en utsignal så att dessa två värden blir identiska.

En PI regulator använder sig av algoritmen nedan för att beräkna en utsignal [7].

$$u(t) = K \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt \right] \quad (1)$$

$u(t)$  = utsignal.

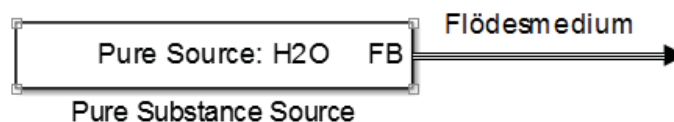
$e(t)$  = börvärde - ärvärde.

$T_I$  = integrationstid.

$K$  = förstärkning.

Det är  $K$  och  $T_I$  som bestämmer hur stabil och snabb en regulator är. Användaren matar in dessa själv.

## 2.5.6 Flödeskälla

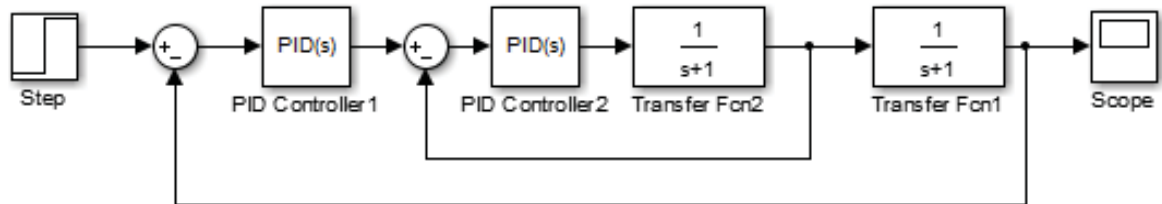


Figur 11, Flödeskälla med utflöde.

Pure substance source blocket används som källa för de olika flödena som används. I detta block kan användaren bestämma vilket ämne, tryck, temperatur och fas som skall användas i flödet.

## 2.6 Kaskadreglering

Kaskadreglering är mycket vanligt förekommande inom processindustrin och används även på Rya KVV. I kaskadreglering finns en yttre och en inre loop som samverkar för att ta bort fel i systemet där utsignalen från första regulatorn blir börvärdet till den andra regulatorn. I reglering med enkel återkoppling kan en störning ge stora fel då den inte börjar bekämpas förrän den påverkar utsignalen. Om man istället mäter signalen innan den passerat hela systemet kan felet upptäckas tidigare och rättas till med hjälp av en ”inre” regulator [7].



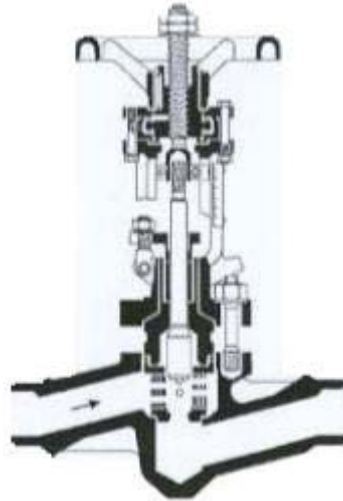
Figur 12, Exempel på enkel kaskadreglering uppbyggd i Simulink.

## 2.7 Parametrisk identifiering

Parametrisk identifiering är ett sätt att bestämma en viss modellstrukturs parametrar. Som utgångspunkt kan man ha en fysikalisk modell av systemet och utifrån den skraddarsy en modell vars parametrar har en fysikalisk tolkning [5].

## 2.8 Ventil

Ventilerna som används är manövreringsventiler ZK 210 från företaget Siemens Industrial Turbomachinery AB. ZK 210 är en slitstark ventil som är enkel att underhålla vilket gör att den passar i industri- och kraftverksanläggningar [6].



Figur 13, Manövreringsventil ZK 210-D/14 DN 25 med ratt [6].

## 2.9 Bernoullis ekvation

Bernoullis ekvation är en approximation av förhållandet mellan hastighet, tryck och höjd hos inkompressibla fluider [10]. Ur denna ekvation kan följande samband tas fram:

Tryckskillnaden före och efter en förträngning är proportionell mot flödet i kvadrat[7]. Alltså:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = kQ^2 \quad (2)$$

## 3. Metod

För att genomföra uppdraget krävs en förståelse för systemet som en helhet. Det innebär en god förståelse för termiska processer samt kaskadreglering av sådana processer. Metodiken blir därför följande.

1. Införskaffa allmän information
2. Insamling av data
3. Modellering av kylsystemet
4. Validering av modell
5. Regulatorförändringar

### 3.1 Införskaffa allmän information

Att bekanta sig med det kylsystem som används på Rya KVV är första steget i detta projekt. Detta innefattar att förstå kaskadreglering samt lite mer detaljerad karakteristik om de ventiler och regulatorer som används, och även att förstå termodynamiken i kylanordningen.

### 3.2 Insamling av data

För att kunna ta fram parametrar och jämföra simulering med verklighet behövs verklig data från kraftverket. Detta skickades från handledaren på Göteborg Energi AB i Excel-ark. Ögonblicksbilder skickades också från Göteborg Energi AB. Från dessa data kunde grafer tas fram för att se samband mellan olika variabler i systemet. Dessa data används senare vid validering av modellen.

### 3.3 Modellering av kylsystemet

Skapa en fungerande modell i Thermolib som är inom ramarna för vad som är en godkänd modell. Modellen skall bete sig mer eller mindre som det verkliga systemet med vissa förenklingar.

### 3.4 Validering av modell

Ställa in modellen så att den fungerar så likt det verkliga systemet som möjligt. Här ställs även regulatorparametrarna in så att modellen reglerar korrekt.

## 3.5 Regulatorförändringar

Ta bort flödesregulatorn helt och hållet och se om regleringen fungerar bättre eller likvärdigt med endast två kaskadkopplade regulatorer istället för tre.

Denna metod kommer ge ett tillförlitligt resultat eftersom den besvarar frågeställningen. Modelleringen som följer från metodiken kommer bli så pass exakt att det tydligt kommer ge tillförlitliga resultat då ändringar och justeringar görs i regulatorerna.

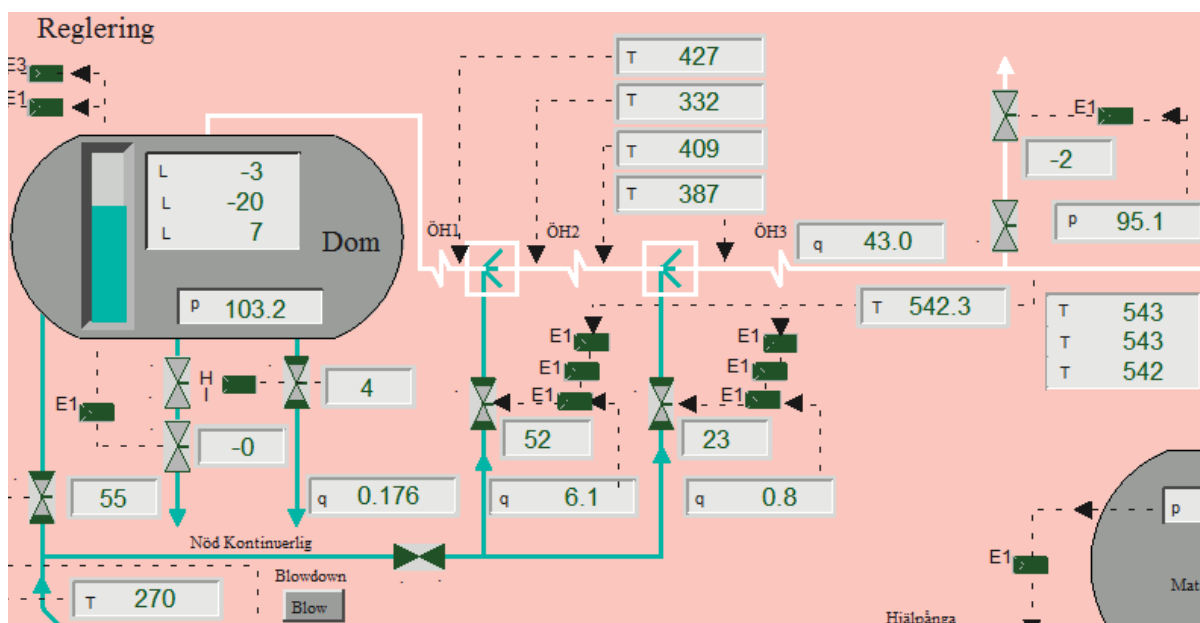


## 4.Genomförande

Följande kapitel beskriver i detalj hur arbetsgången var och i vilken ordning arbetet utfördes.

### 4.1 Skapa förståelse för systemet

En viktig del i att förstå ångpannsystemet är att förstå samband mellan alla de olika flödeshastigheterna, temperatur och tryck. Första steget blev då att, med hjälp av termodynamik, beräkna de teoretiska flödeshastigheterna i kylledningarna med hjälp av given data. Ett gränssnitt användes på anläggningen för att få fram uppmätt data.



Figur 14, Gränssnitt som används för att se värden i ångpannan. I bilden är Q massflöde och siffrorna 52 och 23 är hur många procent ventilerarna är öppna.

Figur 14 är en ögonblicksbild av ångpannan där massflödena i kylvattnet är uppmätta. Det ser ut på sådant vis att kylsprayerna ligger mellan tre överhettare som skall få upp temperaturen till det värde som börvärdet säger. Vissa variationer kommer uppstå med de teoretiskt beräknade flödena i kylvattnet eftersom det tar tid att justera systemet efter en börvärdesändring på temperaturen.

Ett tillägg i Excel användes för att beräkna ångan och vattnets entalpier vid olika stadier med hjälp av givna temperaturer och tryck. Detta skrevs på följande vis.

$$h = h_{2o\_enthalpy\_t\_p}(T, P)$$

Där  $T$  och  $P$  är kända från gränssnittet.

Den effekt som bildas kan skrivas som en funktion av massflöde och entalpi.

$$E = \dot{m} * h \quad (3)$$

Genom detta kan man få energibalanser eftersom

$$\dot{m}_{ut} = \dot{m}_3 + \dot{m}_{k2} \quad (4)$$

och

$$\dot{m}_{ut} * h_{ut} = \dot{m}_3 * h_3 + \dot{m}_{k2} * h_{k2} \quad (5)$$

Ekvation (3) och (5) ger:

$$\begin{cases} \dot{m}_{ut} = \dot{m}_3 + \dot{m}_{k2} \\ \dot{m}_{ut} * h_{ut} = \dot{m}_3 * h_3 + \dot{m}_{k2} * h_{k2} \end{cases} \Rightarrow \dot{m}_{k2} = \frac{\dot{m}_{ut}}{(h_3 - h_{k2})} * (h_3 - h_4)$$

När  $\dot{m}_{k2}$  är känd får man  $\dot{m}_3$ . På samma sätt fås flödet i kylledning 1.

$$\begin{cases} \dot{m}_2 = \dot{m}_1 + \dot{m}_{k1} \\ \dot{m}_2 * h_2 = \dot{m}_1 * h_1 + \dot{m}_{k1} * h_{k1} \end{cases} \Rightarrow \dot{m}_{k1} = \frac{\dot{m}_2}{(h_{k1} - h_1)} * (h_2 - h_1)$$

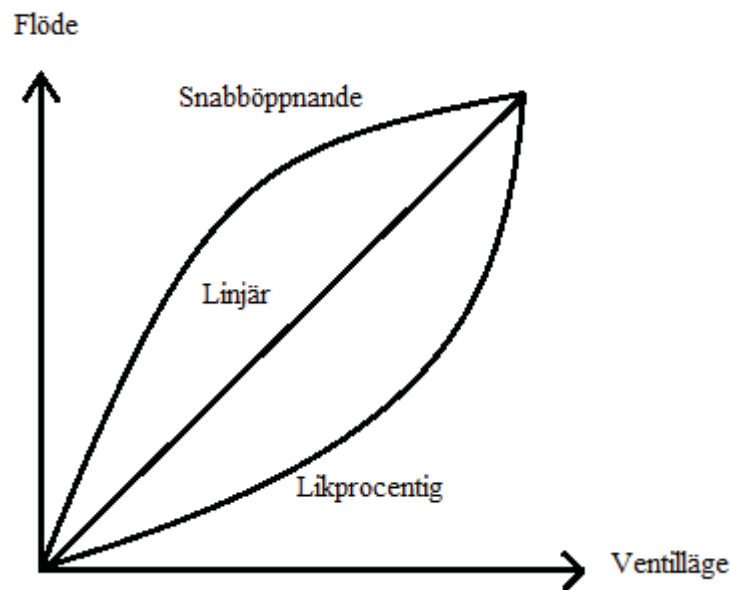
Eftersom endast det sista flödet är känt, som kan ses i figur 14, från start så fick beräkningarna ske i omvänd ordning. Alltså fick kylvattenflödet för ventil två beräknas före flödet i ventil ett.

När det stod klart hur man fick fram kylvattenflödena sattes detta in i ett Excelark med mer ögonblicksdata för att försöka se ett samband mellan flödena och ventilöppningarna. Detta eftersom sambandet inte är linjärt.

| Ventilöppning 1 [%] | Ventilöppning 2 [%] | m <sub>kyl1</sub> [kg/s] | m <sub>kyl2</sub> [kg/s] |
|---------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|
| 9                   | 1                   | 0.75                     | 0.33                     |
| 14                  | 2                   | 0.79                     | 0.33                     |
| 31                  | 23                  | 3.49                     | 1.07                     |
| 39                  | 2                   | 4.06                     | 0.30                     |
| 52                  | 23                  | 6.73                     | 1.51                     |
| 52                  | 29                  | 7.04                     | 2.16                     |
| 52                  | 38                  | 7.10                     | 2.83                     |
| 52                  | 19                  | 7.04                     | 1.42                     |
| 54                  | 20                  | 6.78                     | 1.00                     |

Tabell 1, Tabellen visar ventilöppningar och respektive flöden för några ögonblick. Man kan se att flödena inte ökar linjärt med ventilöppningarna.

Ventiler kan grovt ha tre olika karakteristiker.



Figur 15, De vanligaste karakteristikerna för ventiler [8].

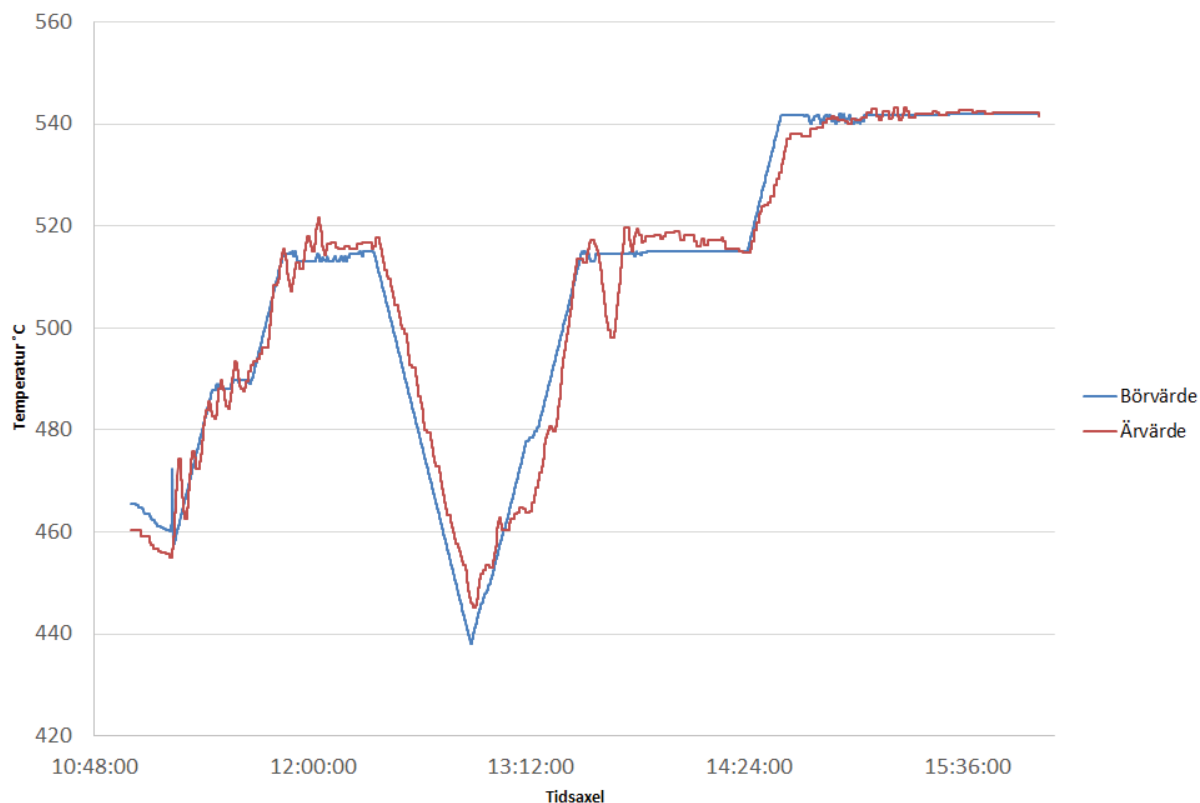
Utifrån de data som räknades fram är det tydligt att ventilen är likprocentig. Nästan alla ventiler som används inom processindustrin är av just den karaktäristiken.

## 4.2 Datainsamling

För att skapa en grundmodell användes data från ett par utvalda ögonblick i processen. Dessa data användes för att kunna skapa en grov modell som sedan kan utvecklas och byggas vidare på. Det är omöjligt att se hur systemet beter sig vid förändringar och hur det påverkas under en längre tid om man endast använder sig av data från ett ögonblick. För att vidareutveckla modellen, samlades data istället in i större tidsspann. Dessa tidsspann var ofta i storleksordning av 24 timmar med data insamlad en gång i sekunden. När data finns för en längre period kan grafer bildas som tydligt visar hur förändringar påverkar systemet. Dessa grafer är ett bra verktyg för att kunna jämföra modellen med det verkliga systemet.

För att ställa in alla parametrar i modellen var det viktigt att titta på data från flera olika ställen i processen. Vid inställning av ventiler, är det hur stort flöde som strömmar igenom ventilen vid en viss öppningsgrad viktigast. Före och efter en överhettare är det viktigt att se hur mycket temperaturen har förändrats för att se hur stor effekt överhettaren tillför. De data som är allra viktigast är uttemperaturen. Det är uttemperaturen som skall kontrolleras och styras i slutändan, och huvuduppgiften för modellen är att simulera ett system som kan kyla denna temperatur. Därför är denna datapunkt viktig så att man lätt kan se hur stor skillnad det är på modell och det verkliga systemet.

När grafer skapas från data som är insamlad över ett längre spann är det möjligt att få en helhetsbild hur snabbt, och korrekt systemet är. Ett exempel är skillnaden mellan börvärde och ärvärde. Nedan är en graf i figur 16 där man kan se att det sker en fördröjning för uttemperaturen att nå det värde som har önskats.



Figur 16, Är- och Börvärde över tid. Det är tydligt att ärvärdesförändringarna sker några minuter efter ändringar sker på börvärdet och att insvängningstiden varierar.

## 4.3 Modellering

För att kunna utföra tester och förändringar krävs en modell som är lik det verkliga systemet. Detta är ofta en väldigt tidskrävande uppgift och i vissa fall kan det ta flera år att skapa en fullständigt korrekt modell av ett system.

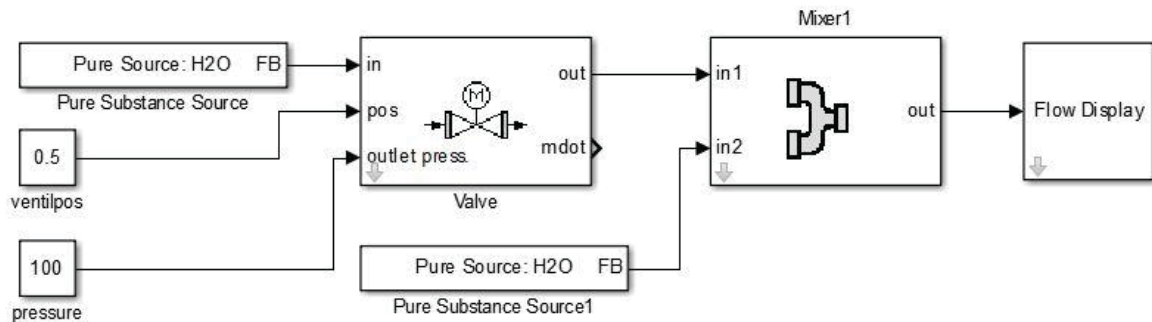
I de första stadierna av modellering brukar man vanligtvis titta på ett oreglerat system. Då kan man utföra ett stegsvar och en överföringsfunktion kan utvecklas utifrån detta. Överföringsfunktionen är kort och gott en funktion som beskriver hur systemet fungerar och reagerar på olika insignaler. När en bra överföringsfunktion finns, kopplas ofta en regulator samman med denna.

I detta projekt var det inte möjligt att utföra modellering på traditionellt vis, istället fick alternativa vägar utforskas. Möjligheten till att utföra ett stegsvarsexperiment på det oreglerade systemet var obefintlig då det är för dyrt och kan skada utrustningen. De data som istället fanns att tillgå till, var stora mängder insamlad driftdata från kylsystemet. Göteborg Energi samlar kontinuerligt in data vid drift som de sparar i ett stort bibliotek där det finns möjlighet att utforska olika scenarion. Driftdata är dock insamlad ifrån ett redan reglerat system. Därför gick det inte att använda System control toolbox för att skapa överföringsfunktioner som grunden av modellen kan baseras på. Istället användes ett tilläggsprogram till Simulink som heter Thermolib. Detta tillägg innehåller en mängd termodynamiskt anpassbara block som kan användas för att bygga en modell. Dessa block kan konfigureras så att de stämmer överens med driftdata, vilket gör att en modell som representerar verkligheten kan utformas.

Dessa block användes för att återskapa alla komponenter som finns i processen. Översiktsskissen i figur 14 användes för att välja ut de block som behövdes.

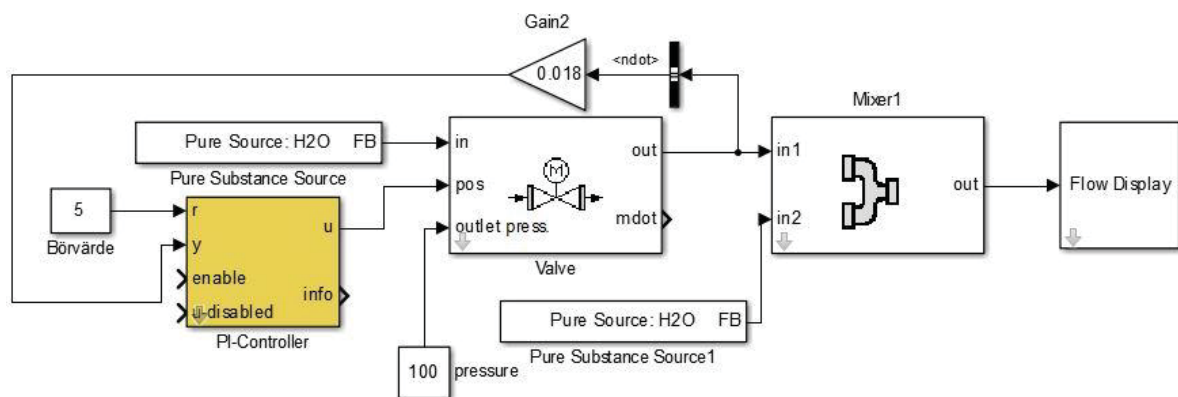
Vid skapandet av en modell är första steget att skapa en väldigt grov grundmodell som sedan kan utvecklas till en mer sofistikerad och avancerad version. Nedan beskrivs stegen från en grundmodell till den slutgiltiga modellen som finns att se i Bilaga 1 och 2.

Första steget var att undersöka hur blocken fungerar och beter sig. Nedan i figur 17 är en enkel modell som består av två flödeskällor, en ventil och en blandningskammare där de två flödena blandas. De två flödena ställs in så att de båda är vatten men har olika temperatur, fas, tryck och massflöde. Genom att använda olika värden är det möjligt att se hur flödena blandas vid olika ventilöppningar. I detta stadiet är det inte viktigt att ventilen fungerar exakt som den verkliga processen, det räcker bara att den fungerar på ungefär samma sätt.



Figur 17, Två flöden som blandas via en ventil och en blandningskammare.

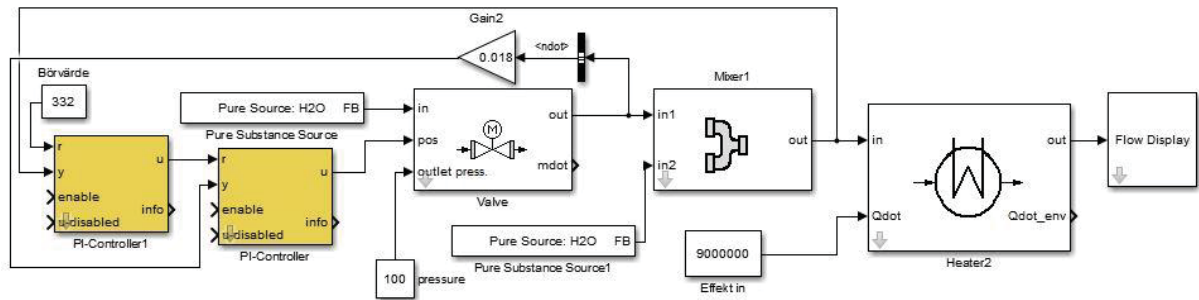
Modellen i Figur 17 är grunden för hela den slutgiltiga modellen. Nästa steg är att koppla in en PI regulator som reglerar hur stort flöde ventilen släpper igenom.



Figur 18, En PI regulator kopplas samman med ventilen.

PI regulatoren jämför massflödet efter ventilen med börvärdet och skickar sedan ut lämplig signal för att styra ventils öppning. Vanligtvis ställs regulatoren in med en förstärkning och integrationstid som gör processen optimal. I det här fallet ödslades ingen tid på att ställa in regulatoren, eftersom systemet är långt ifrån den slutgiltiga modellen och det finns inget behov av att denna delprocess skall reglera korrekt i ett så här tidigt stadiet.

I figur 19 är modellen i nästa steg. Där kan man se att modellen har utökats med en överhettare och en andra PI regulator. Denna regulator reglerar temperaturen efter blandningskammaren och utsignalen som denna regulator skickar ut blir börvärdet för den första regulatoren. Det kallas för kaskadreglering när två eller fler regulatorer kopplas samman på detta vis.



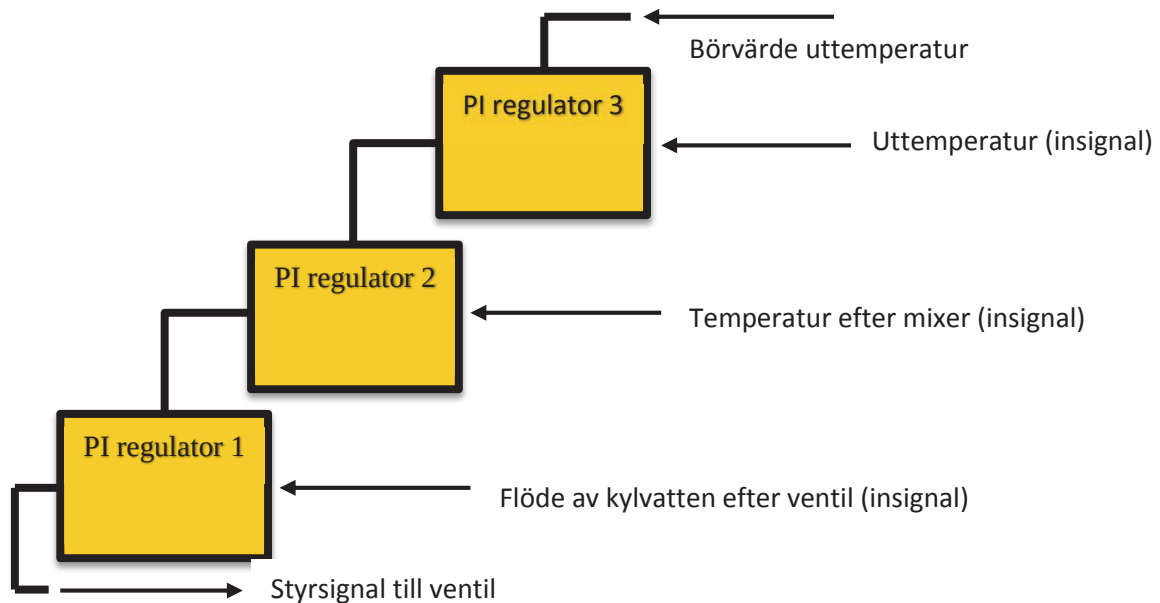
Figur 19, En andra PI regulator kopplas samman med den första PI regulatorn.

De två PI regulatorerna är nu sammankopplade och påverkar varandra. Styrningen av systemet har inte längre endast en faktor som det styrs av. Det har två, flödet ut ur ventilen och temperaturen på flödet efter det har blandats med flödet från den andra flödeskällan i blandningskammaren. Överhettaren kopplas in efter blandningskammaren där den ska höja temperaturen på flödet. Med hjälp av en konstant, som kopplas samman med överhettaren, kan effekten som tillförs till flödet bestämmas.

Det verkliga systemet på Rya KVV innehåller tre stycket kaskadreglerade PI regulatorer per kylsystem. Modellen i figur 19 behöver alltså utökas med en tredje PI regulator. Denna regulator använder sig av uttemperaturen i slutet av hela systemet. Därför går det inte att lägga till den tredje regulatorn i nästa steg utan att koppla samman det andra kylsystemet med det första kylsystemet som har modellerats upp och visas i figur 19. Det andra kylsystemet är i princip identiskt med det första kylsystemet. I figur 20 har kylsystemen sammankopplats och en tredje PI regulator har kopplats in i båda delsystemen.

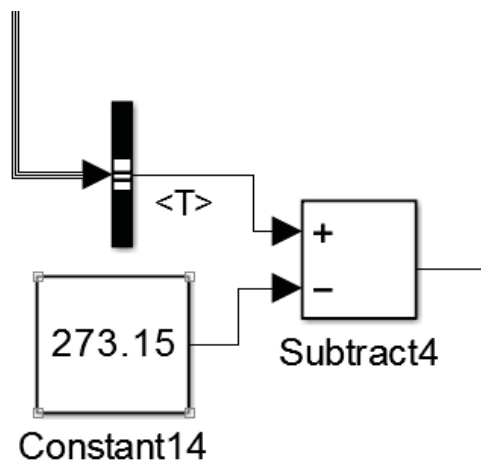


Figur 21 klargör hur PI regulatorerna är sammankopplade och vilka signaler de får in och skickar ut.



Figur 21, Bilden visar hur det nuvarande reglersystemet fungerar med in och utsignaler.

Sammankopplingen mellan alla termodynamiska block sker med så kallade bussignaler. Dessa innehåller flera olika datatyper så som temperatur, tryck och entalpi. All denna information behövs för att blocken skall kunna utföra korrekta termodynamiska beräkningar. En PI regulator klarar dock inte av att använda information ifrån en bussignal. De vill endast ha en signal med ett värde. Simulinkblocket Demux används för att separera en utvald signal ifrån bussen. I figur 22 separeras temperaturdaten utifrån bussen för att sedan kunna användas som signal in i en PI regulator.



Figur 22, Demuxblocket separerar temperaturdaten ur bussignaler. Temperaturen är i enhet Kelvin och därför omvandlas den till Celsius.

Nu innehåller modellen de block som behövs för att motsvara det verkliga systemet. Modellen har dock inte samma beteende som det verkliga systemet utan det måste finjusteras med hjälp av insamlad data ifrån den verkliga processen. Detta genomförs i kapitlet Validering mot data.



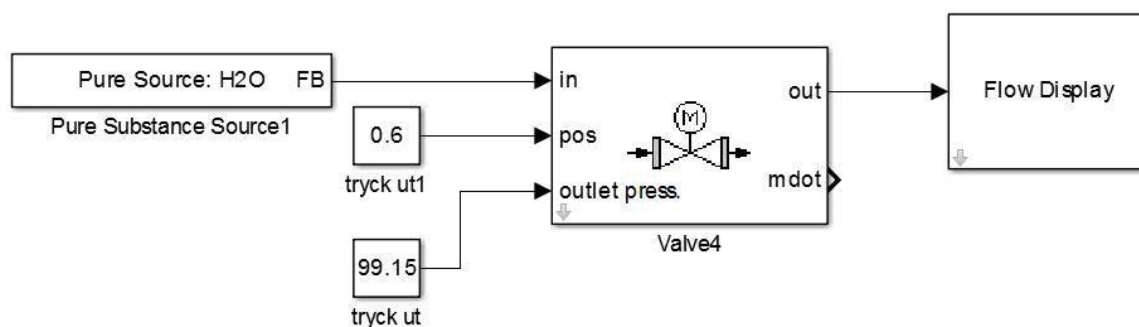
## 4.4 Validering och kalibrering mot data

I det här kapitlet optimeras modellen med hjälp av insamlad driftdata.

### 4.4.1 Ventilen

Ventilblocket är det block som är viktigast att det representerar verkligheten. Dess egenskaper påverkar hela systemet och därför är det en förutsättning för att hela systemet skall agera korrekt att ventilerna är korrekt inställda. Vid inställning av ventilen fokuserar man främst på hur stort flöde som strömmar igenom ventilen vid olika öppningsgrader.

Göteborg Energi samlar kontinuerligt in data under drift. Det finns alltså en stor mängd data med olika scenarion som kan användas vid inställning av ventilblocken. För att underlätta arbetet, genereras grafer som visar massflödet av kylvatten vid olika procent av öppningar. De båda kylsystemen använder en ventil av modell ZK 210 [6]. Även om ventilerna är av samma typ har de inte exakt likadan karakteristik. Därför behöver de ställas in var för sig. En simpel modell används för att dimensionera ventilblocken, i denna finns det endast ett ventilblock, en källa och ett par konstanter med. I figur 23 visas denna modell.



Figur 23, Enkel modell för att bestämma ventilkarakteristik.

Ventilblocken är inställda på att vara av typen aktiv. Det innebär att de beräknar massflödet som strömmar ut ur ventilen, beroende på ventilsens karakteristik och det bestämda utloppstrycket.

Ventilens karakteristik bestäms med hjälp av två vektorer där användaren kan bestämma olika Kv värden för olika öppningsgrader. Detta sker vid konstant tryckskillnad i systemet. Dessa två vektorer hör ihop och i sin helhet bestämmer de hur stort flöde som skall släppas igenom ventilen vid olika öppningsgrader. I figur 24 presenteras de två vektorerna för ventilen i det första kylsystemet. Kv värdet 9 motsvarar ventilöppningen 0, 15.33 motsvarar 0.4 och så vidare. För att komma fram till just dessa värden användes modellen i figur 23 tillsammans med grafen i figur 25 som innehåller data som hör till ventilen i det första kylsystemet.

Lookup table Kv [m3/hr] as a function of valve position[0-1]

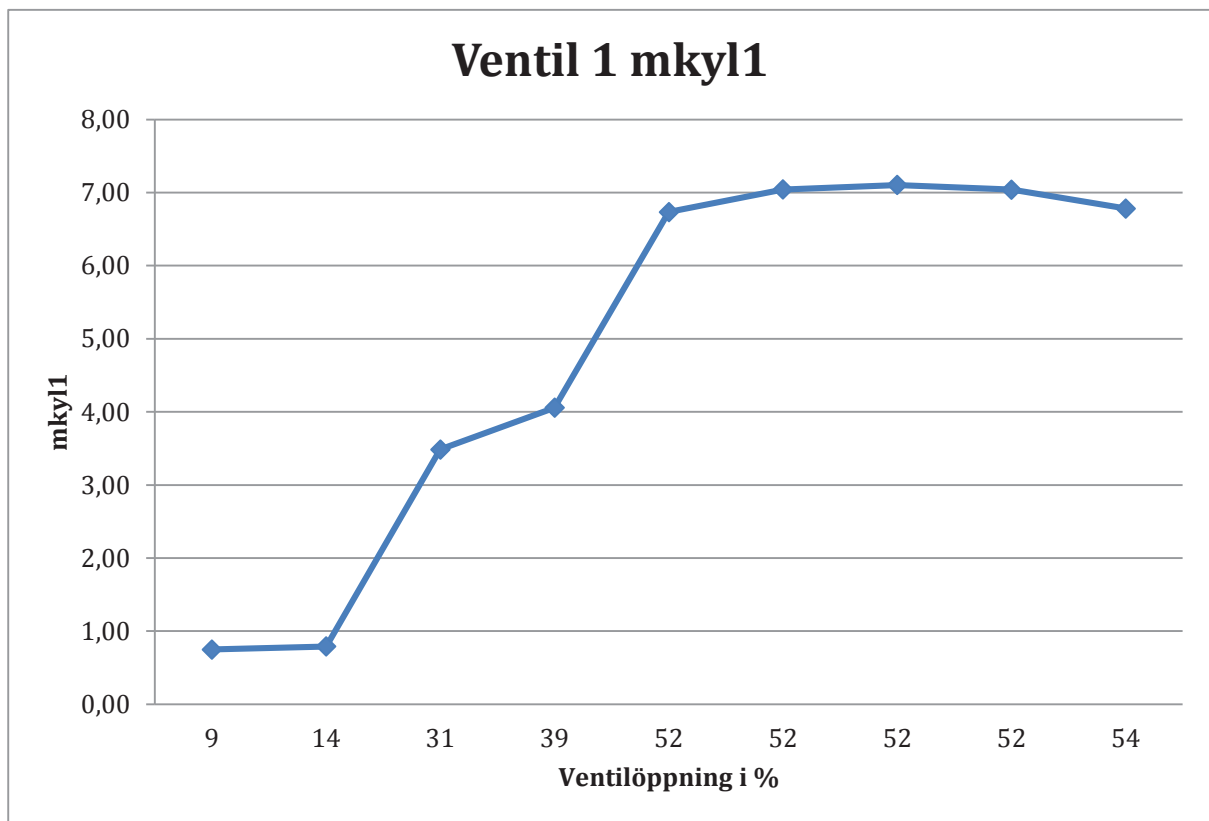
[9 15.33 14.4 8.6 7.5 3.9 1.2 0]

Valve position vector [0-1]

[0 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1]

Figur 24, Ventilvektorer för ventil 1.

I grafen nedan beskrivs egenskaperna för ventil 1.



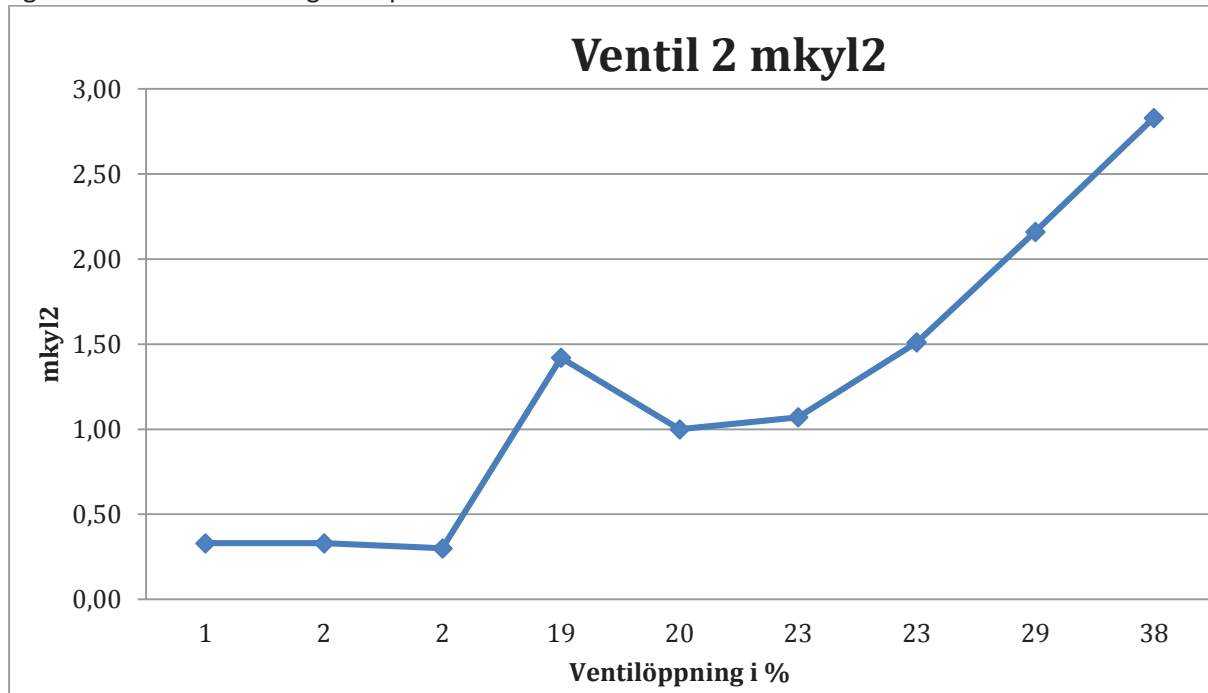
Figur 25, Y-axeln representerar massflödet. X-axeln representerar ventilöppningen i %.

De två ventilerna har som sagt inte samma karakteristik. Därför används annan data för att bestämma egenskaperna hos ventilen i det andra kylsystemet. I figur 26 presenteras de vektorer som bestämmer ventilens karakteristik. Dessa vektorer fungerar på samma sätt som vektorerna för ventilen i det första kylsystemet. Kv värdet 9 motsvarar ventilöppningen 0, 6.7 motsvarar 0.6 och så vidare. För denna ventil användes grafen i figur 27 för att ställa in Karakteristiken.

| Lookup table Kv [m3/hr] as a function of valve position[0-1] |  |  |  |  |  |  |
|--------------------------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| [9 6.7 4.3 2.4 1.2 0]                                        |  |  |  |  |  |  |
| Valve position vector [0-1]                                  |  |  |  |  |  |  |
| [0 0.6 0.7 0.8 0.9 1]                                        |  |  |  |  |  |  |

Figur 26, Ventilvektorer för ventil 2.

I grafen nedan beskrivs egenskaperna för ventil 2.



Figur 27, Y-axeln representerar massflödet. X-axeln representerar ventilöppningen i %.

Det är många faktorer som spelar in i hur stort flöde som släpps igenom vid varje ventilöppning. Detta medför att figur 25 och 27 får svårbegripliga utseenden då de data som används är hämtade från olika tillfällen. Ventilkaraktistiken kan ändå ställas in med hjälp av dessa då de ger en tillräckligt bra bild av hur de verkliga ventilerna fungerar.

#### 4.4.2 Överhettare, Blandningskammare och resten av systemet.

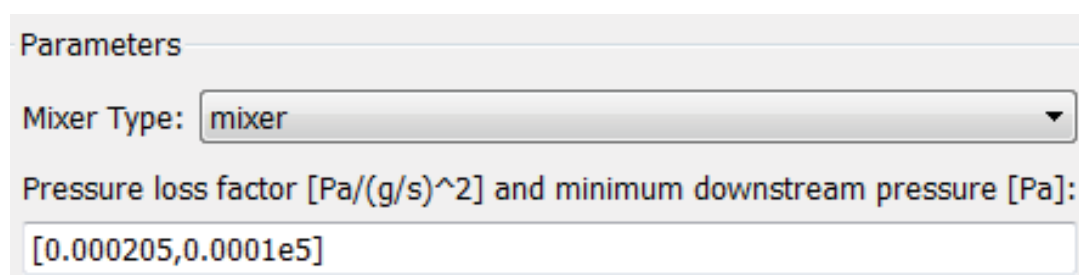
Nästa steg efter att ventilerna är inställda, är att ställa in de resterande blocken som inte påverkar systemet lika mycket. Systemet skall ha en tryckskillnad på 8 bar mellan inloppet av första ventilen i figur 20 och slutet av systemet. Anledningen till att tryckskillnaden skall vara just 8 bar är på grund av att det är ett medeltryck av tryckskillnaden på systemet i Rya KVV som ligger mellan 5-10 bar.

Ett domtryck på 103.2 bar ställdes in i flödeskällan och ett utloppstryck från ventilerna sattes till 99.15 bar. För att få ett tryckfall från 99.15 bar till 95 bar efter att flödet har kylts ner en andra gång, fick en tryckförlustfaktor "k" inrättas i blandningskammaren i det andra kylsystemet.

Tryckförlustfaktorn beräknades med Bernoullis ekvation. Enligt modellen var det en tryckskillnad på 4.15 bar och ett maximalt massflöde på 44.933 kg/s. En ommöblering av ekvation (2) alltså:

$$k = \frac{\Delta P}{\dot{m}^2} = \frac{4.15 \text{ bar}}{(44.933 \text{ kg/s})^2} = 0.000205 \text{ Pa/(g/s)}^2$$

Tryckförlustfaktorn  $k$  matades sedan in i blandningskamarblocket enligt figur 28.



Parameters

Mixer Type:

Pressure loss factor [Pa/(g/s)<sup>2</sup>] and minimum downstream pressure [Pa]:

Figur 28, Inmatning av trycklustfaktor i blandningskammare.

Överhettarna och Kv- värdena i ventilerna rättade sig efter dessa tryck då de bestämmer flödena respektive temperaturerna i systemet. Detta eftersom det var ett ungefärligt medeltryck utifrån de data som använts. Eftersom ingen av regulatorerna använder tryck som insignal så blev det viktigare att se så temperaturer och framför allt flöden stämde med driftdata som från Göteborg Energi har samlats in.

När trycken var bestämda kunde effekttillförseln till överhettarna dimensioneras. Effekten ställdes in så att rätt temperatur efter överhettarna erhöles. För att veta vilken temperatur som skall uppnås efter överhettarna användes ögonblicksbilden i figur 14.

### 4.4.3 Regulatorer

När alla termodynamiska block var testade och inställda så skall PI regulatorerna ställas in så att de reglerar korrekt. Parametrarna för PI regulatorerna som används på Rya KVV är givna i tabell 1.

| Regulator        | P   | I   | MV min | MV Max |
|------------------|-----|-----|--------|--------|
| Kyl1-Regulator 1 | 0.4 | 15  | 0      | 6.2    |
| Kyl1-Regulator 2 | 0.8 | 20  | 0      | 550    |
| Kyl1-Regulator 3 | 1   | 180 | 0      | 750    |
| Kyl2-Regulator 1 | 0.2 | 15  | 0      | 7.8    |
| Kyl2-Regulator 2 | 0.8 | 30  | 0      | 600    |
| Kyl2-Regulator 3 | 0.8 | 120 | 0      | 750    |

Tabell 2, Regulatorparametrarna som används på Rya KVV samt mätvärdenas max och mingränser för respektive regulator.

Dessa värden går dock inte att överföra direkt till den modell som har skapats med Thermolibblock. Signalerna mellan de kaskadkopplade regulatorerna måste skalas så att de stämmer överrens med det värde som de skall reglera först. Exempelvis har regulator3-kyl1 mätområde på 0-750 °C och har ett utsignalsområde på 100 %. Ett reglerfel på 3 °C motsvarar då 0.4 % på utsignalen, vilket i sin tur motsvarar 1.78 °C i börvärde på regulator2-Kyl1.

Här visas skalningen som sker mellan regulatorerna och signalen in i ventilen.

- Regulator3-Kyl1 utsignal 0-100% motsvarar börvärde 0-445 °C på Regulator2-Kyl1
- Regulator2-Kyl1 utsignal 0-100% motsvarar börvärde 0-6.2 kg/s på Regulator1-Kyl1
- Regulator1-Kyl1 utsignal 0-100% motsvarar 0-1 i *ventilöppning*.
- Regulator3-Kyl2 utsignal 0-100% motsvarar börvärde 0-445 °C på Regulator2-Kyl2
- Regulator2-Kyl2 utsignal 0-100% motsvarar börvärde 0-7.8 kg/s på Regulator1-Kyl2
- Regulator1-Kyl2 utsignal 0-100% motsvarar 0-1 i *ventilöppning*.

För att få till en bra skalning av utsignalerna från regulatorerna och en korrekt förstärkning behövs en kvot mellan de olika mätvärdena tas fram. Integrationsdelen behöver inte förändras utan där kan samma integrationstid användas för modellen som i systemet på Rya KVV.

Förstärkningen för regulatorerna i modellen bestäms enligt följande, kvoten av mätvärdena mellan regulatorerna multipliceras med de förstärkningarna som används på Rya KVV och ger en förstärkning som är anpassad för modellen, enligt följande:

$$P = \frac{MV \text{ max föregående regulator}}{MV \text{ max efterkommande regulator}} * \text{förstärkning på Rya KVV} \quad (6)$$

Beräkning av förstärkningar blir enligt ekvation (6):

Regulator3-Kyl1:

$$P = \frac{550}{750} * 1 = 0.7333$$

Regulator2-Kyl1:

$$P = \frac{6,2}{550} * 0.8 = 0.00902$$

Regulator1-Kyl1:

$$P = \frac{1}{6,2} * 0.4 = 0.0645$$

Regulator3-Kyl2:

$$P = \frac{600}{750} * 0.8 = 0.64$$

Regulator2-Kyl2:

$$P = \frac{7,8}{600} * 0.8 = 0.0104$$

Regulator1-Kyl2:

$$P = \frac{1}{7,8} * 0.2 = 0.0256$$

Dessa förstärkningar matas in i tillhörande regulatorblock. I figur 29 presenteras hur inmatningen går till.

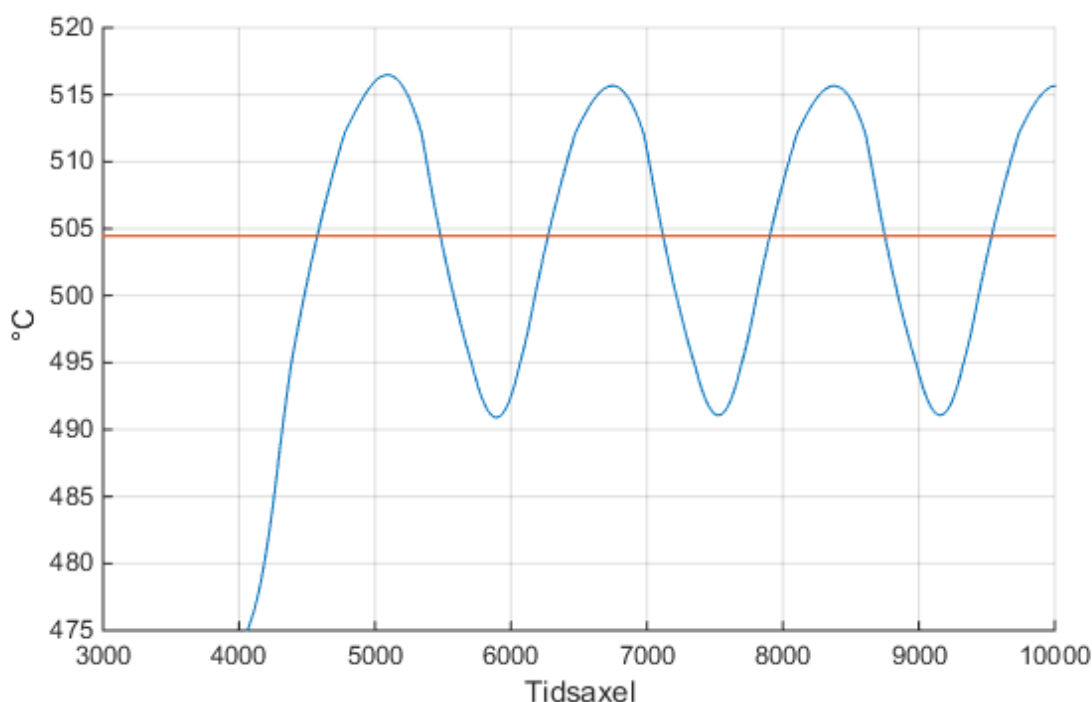
| Parameters              |                                     |
|-------------------------|-------------------------------------|
| Proportional gain (Kr): | <input type="text" value="0.7333"/> |
| Reset time (Tn):        | <input type="text" value="180"/>    |
| Minimum actuator value: | <input type="text" value="0"/>      |
| Maximum actuator value: | <input type="text" value="445"/>    |
| Initial output:         | <input type="text" value="0.5"/>    |

Figur 29, Regulator3- Kyl1 ställdes in med dessa parametrar

Det är även möjligt att använda sig av gain-block mellan PI regulatorerna och låta dessa representera omvandlingsfaktorerna. På så sätt kan samma regulatorparametrar användas som de i Rya KVV.

#### 4.4.4 Justering av regulatorer

Förstärkningarna som beräknades i ekvation 6 matades in i PI regulatorerna i modellen tillsammans med integrationstiderna i Tabell 1. Förstärkningen i regulator nr. 1 i både kyl-1 och kyl-2 fick dock sänkas med en faktor 10, eftersom regulatorerna reglerade för snabbt för att resten av modellen skall hinna med. De nya parametrarna i regulator nr. 1 resulterade i ett ostabilt system. Nedan i figur 30 visas insvängningsförloppet.



Figur 30, Insvängningsförlopp med börvärde på 504.4 °C. Röd=börvärde, Blå = ärvärde.

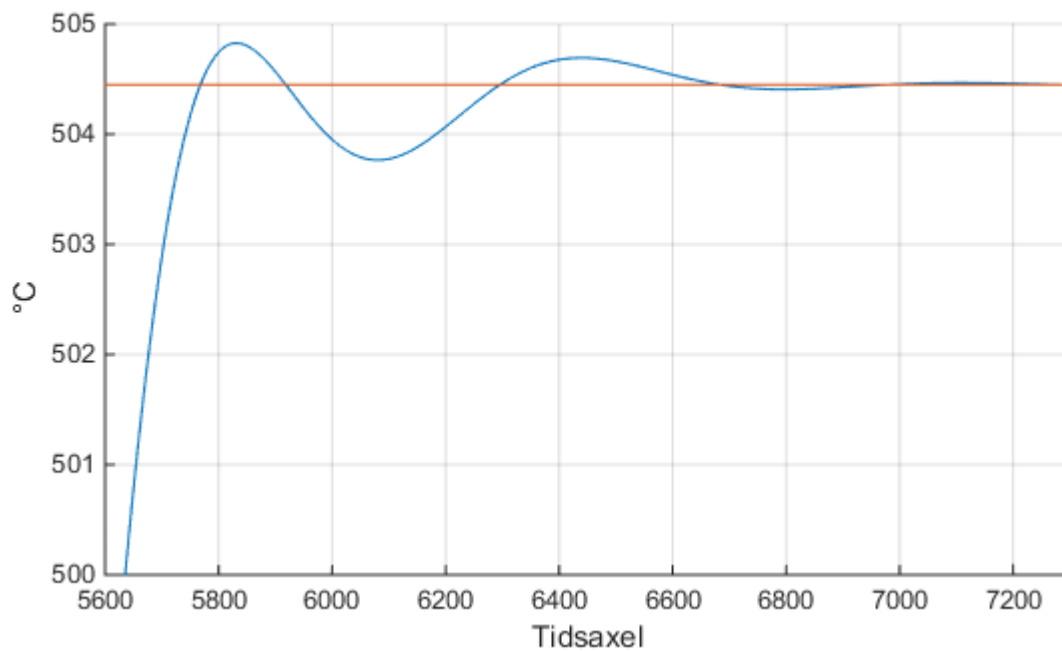
Eftersom modellen inte är en perfekt kopia av det verkliga systemet, var det naturligt att vissa dimensioner inte skulle stämma överens. Regulator nr. 3 i kylsystem 2 stegrade iväg sin utsignal betydligt fortare än regulator nr. 3 i kylsystem 1. Ventilen släppte då igenom maximalt med kylvatten innan kylsystem 1 hade börjat släppa igenom något kylvatten alls. För att få de båda ventilerna mer samkörda förminskades därför förstärkningen i regulator nr. 3 i kylsystem 2 till 0.4. Nu började båda kylsystemen reglera ungefär samtidigt.

För att göra modellen snabbare vid börvärdesändringar justerades förstärkningen på flödesregulatorerna. De sattes så nära den uträknade förstärkningen som möjligt utan att systemet blev ostabilt.

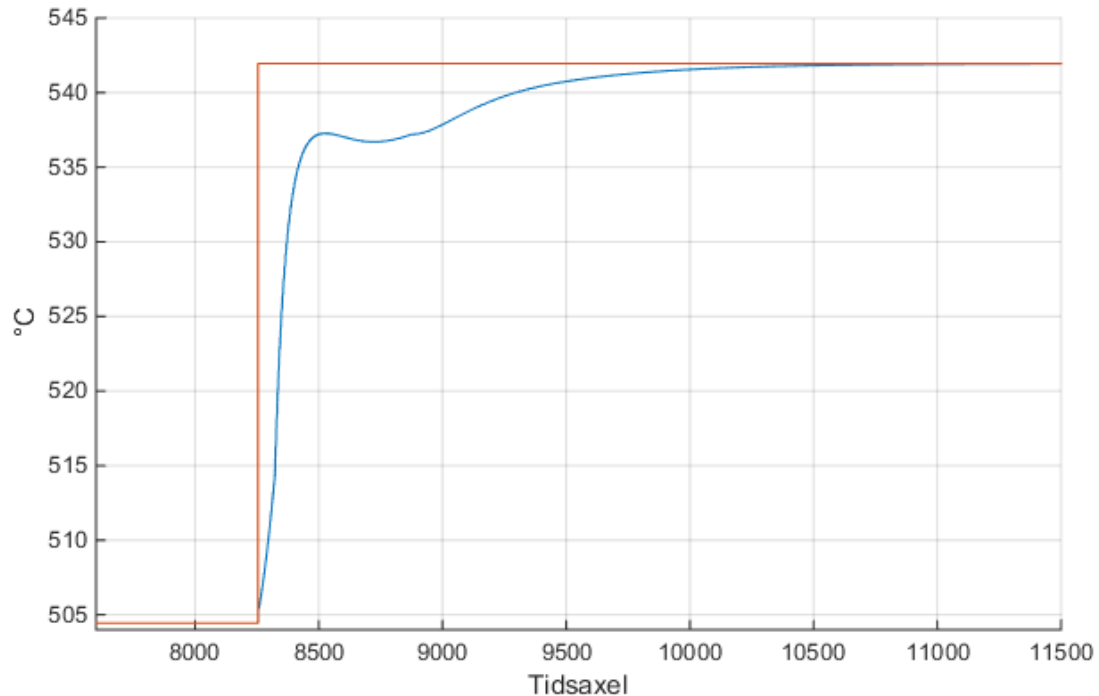
Regulator1-kyl1:  $P = 0.03$

Regulator1-kyl2:  $P = 0.01$

Med dessa nya förstärkningar i flödesregulatorerna presterar modellen bättre. I figur 31 visas insvängningen med dessa parametrar och i figur 32 visas en graf för en stegvis börvärdesändring från 504.4 °C till 542 °C.



Figur 31, vägningsförlopp för de nya parametrarna med börvärde på 504.4 °C.



Figur 32, stegformad börvärdesändring med slutgiltiga parametrar.



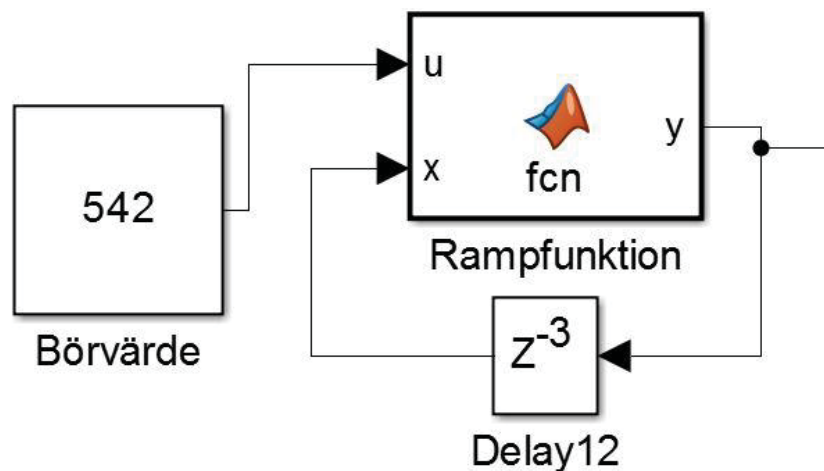
Nedan i tabell 2 är de parametrar som används i systemet.

| Regulator       | P       | I   |
|-----------------|---------|-----|
| Regulator1-Kyl1 | 0.03    | 15  |
| Regulator2-Kyl1 | 0.00902 | 20  |
| Regulator3-Kyl1 | 0.7333  | 180 |
| Regulator1-Kyl2 | 0.01    | 15  |
| Regulator2-Kyl2 | 0.0104  | 30  |
| Regulator3-Kyl2 | 0.4     | 120 |

Tabell 3, Regulatorparametrarna som valdes.

## 4.5 Börvärdesrampning

Än så länge har stegformade börvärdesändringar använts (se figur 32 ovan). På Rya KVV sker dock rampning av börvärdesförändringar. För att nå så trovärdiga resultat som möjligt lades ett funktionsblock in efter det block som bestämmer börvärdet i modellen. Detta block innehåller kod som får börvärdet att öka långsamt och stadigt. Denna kod presenteras i figur 34.



Figur 33, MATLAB funktionsblock som innehåller koden som presenteras i figur 31 och används för att skapa en rampning när det sker förändringar på börvärdet.

Från den insamlade datan kunde en ramphastighet räknas ut till en ungefärlig ökning av 25 °C på 900 sekunder. Delay12-blocket i figur 33 är ett fördröjningsblock och bestämmer hur lång tid det tar innan utsignalen, alltså börvärdet, ändras. Är fördröjningstiden inställd på exempelvis "1" tar det en sekund för funktionsblocket att öka utsignalen med en grad. Detta innebär att för 25 °C på 900 sekunder blir det följande kvot:

$$\text{Fördröjningstid} = \frac{900}{25} = 36$$

Att göra gradvisa steg i rampningen visade sig ge lite för "hackiga" ökningar i graferna, därför ändrades stegen till en tiondels grad medan fördröjningstiden minskades med en faktor 10. Fördröjningsblocket kan dock bara använda sig utav heltal vilket gjorde att vi valde tre som

fördröjningslängd. Detta gör att börvärdesrampningen är någon snabbare hos det verkliga systemet. Hade avrundningen skett uppåt till fyra hade systemet blivit något mer likt det verkliga men långsammare. Eftersom flera tester och kontroller behövde göras valdes snabbhet framför en något mer verklig modell.

Här följer den kod som styr utsignalen.

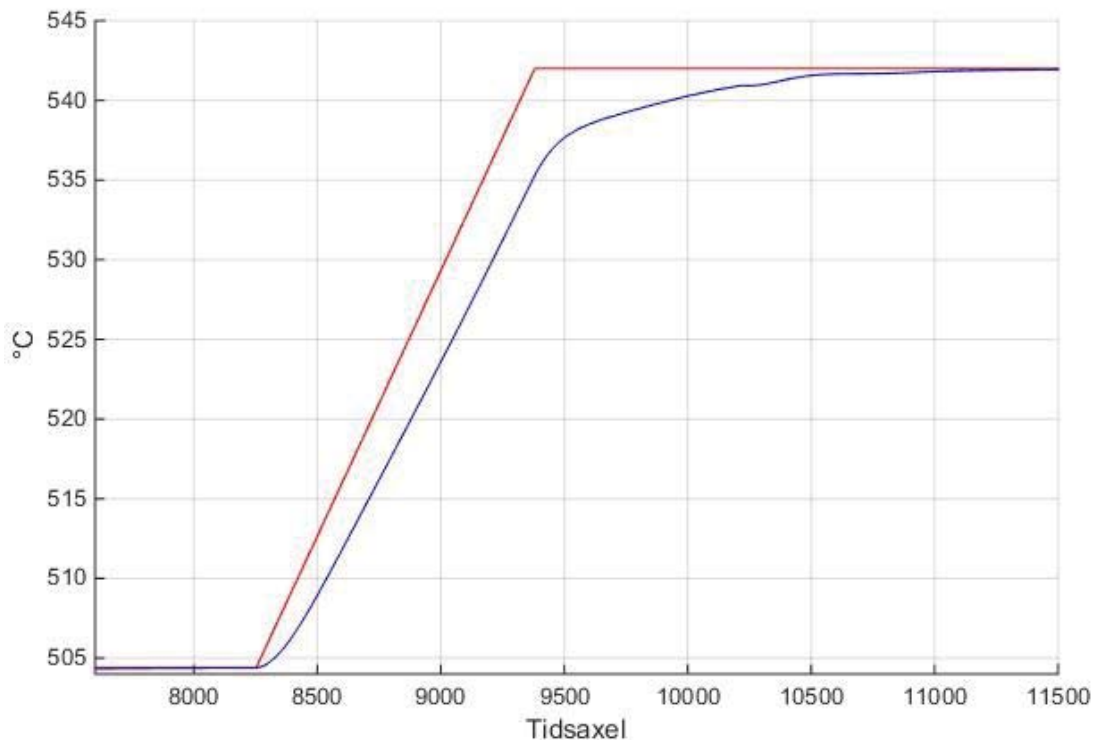
```

1 function y = fcn(u,x)
2     %#codegen
3
4     if x==0;           %först när x=0
5         y=475;         %sätt startvärde till 475 grader
6         x=y;
7     end
8
9     if u>x             %som börvärdet är större än x
10        x=x+0.1;        %öka x med 0.1
11    end
12
13    if u<x             %som börvärdet är mindre
14        x=x-0.1;        %minska x med 0.1
15    end
16
17    y=x;

```

Figur 34, Kod för börvärdesrampning i ett MATLAB funktionsblock

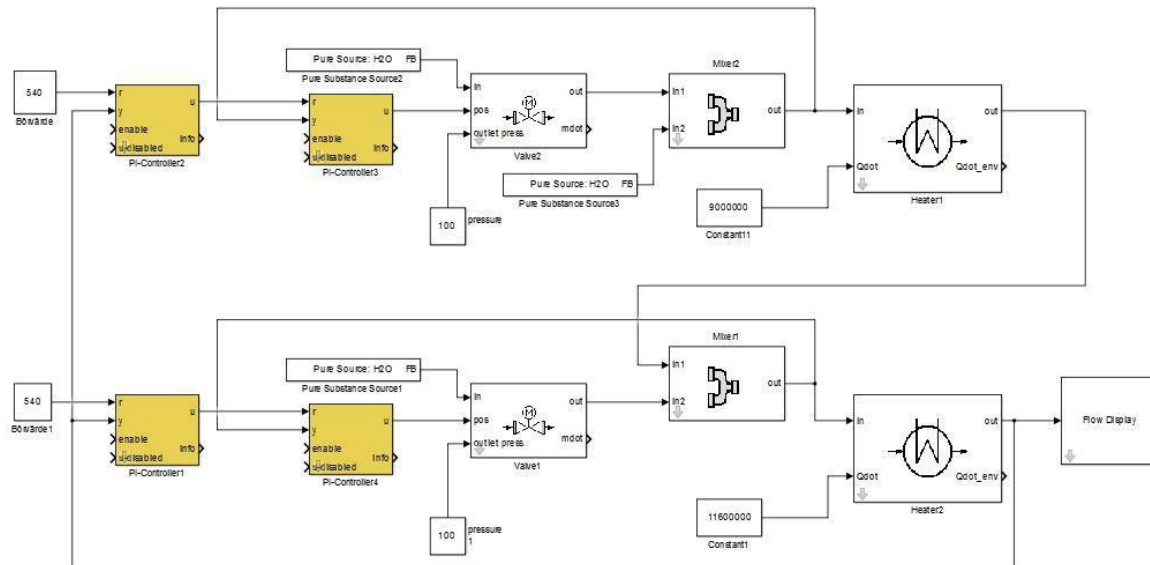
En jämförelse med figur 32 gjordes för att visa skillnaderna som blev när bytet gjordes till rampning.



Figur 35, Graf som visar en börvärdesförändring med rampning.

## 4.6 Eliminering av Flödesregulatorn

Det var nu dags att se hur systemet betedde sig då flödesregulatorn var borta.



Figur 36, Förenklad modell av hela systemet med 2 regulatorer på vardera kylsystem.

Regulator2 blev nu den som direkt styrde *ventilöppningen*, alltså måste dess förstärkning och utsignalspann ändras enligt ekvation 6.

$$\text{Regulator2-kyl1:} \quad P = \frac{1}{550} * 0.8 = 0.0014545$$

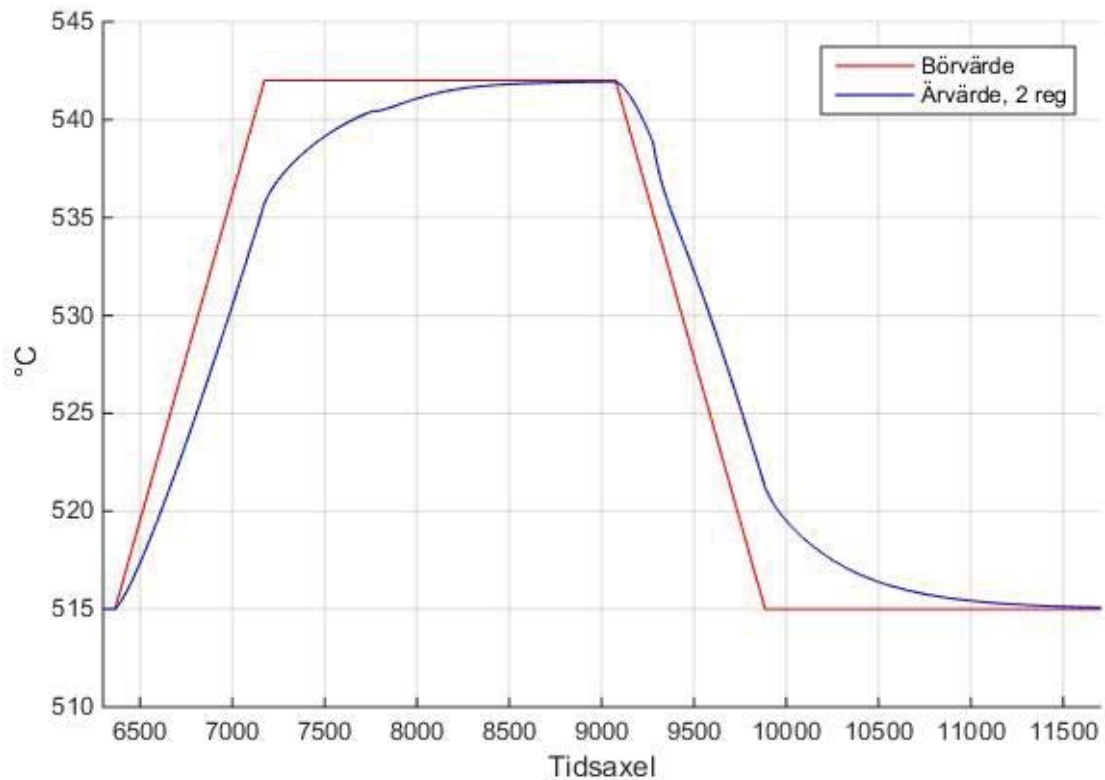
$$\text{Regulator2-kyl2:} \quad P = \frac{1}{600} * 0.8 = 0.0013333$$

Spannen där utsignalerna får verka blir samma som de var i flödesregulatorn innan. Det vill säga 0-0.4 respektive 0-0.6. Efter sista regulatorn tas ett minus utsignalerna för att passa med ventilerna. Detta betyder att första ventilen kan röra sig mellan helt stängd och 60 % öppen medan andra ventilen rör sig mellan helt stängd och 40 % öppen. Ventilerna kan aldrig öppnas mer än såhär i det verkliga systemet.

Även med två regulatorer på varje kylvattenflöde fick förstärkningarna minskas något för att få ett stabilt system. Tester gjordes för att se vid vilka förstärkningar som systemet inte längre blev instabilt. Följande förstärkningar togs fram:

$$\text{Regulator2-kyl1:} \quad P = 0.00106$$

$$\text{Regulator2-kyl2:} \quad P = 0.00096$$



Figur 37, Representation av börvärdesförändringar då två kaskadkopplade regulatorer används vid kylvattenflödena.

## 4.7 Tester

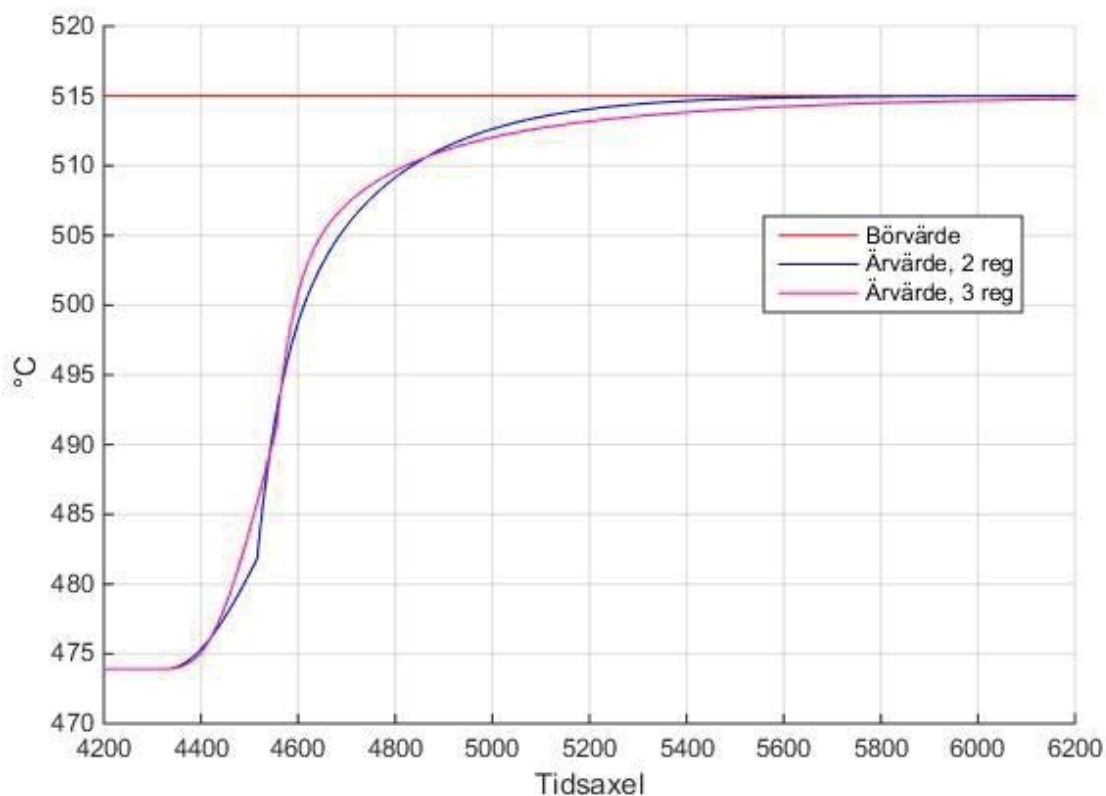
För att nu kunna jämföra systemet med tre och två regulatorer lades båda modellerna in i samma arbetsyta och gavs samma börvärdesändringar. De tester som genomfördes involverade beteende vid insvängningstid och börvärdesändringar. Det var vid denna tidpunkt dags att se om systemet förbättrats, försämrats eller blivit oförändrat då en regulator tagits bort.

De tester som gjordes var främst börvärdesändringar inom spannet 500-542 °C, fast för att få fram påtagliga skillnader mellan de olika systemen gjordes även ändringar under 500 °C.

## 5.Resultat

I resultatkapitlet kommer de resultat visas som kom fram då tester genomfördes på systemet med två respektive tre regulatorer. Här visas alltså vilka skillnader som finns mellan de två versionerna av systemet.

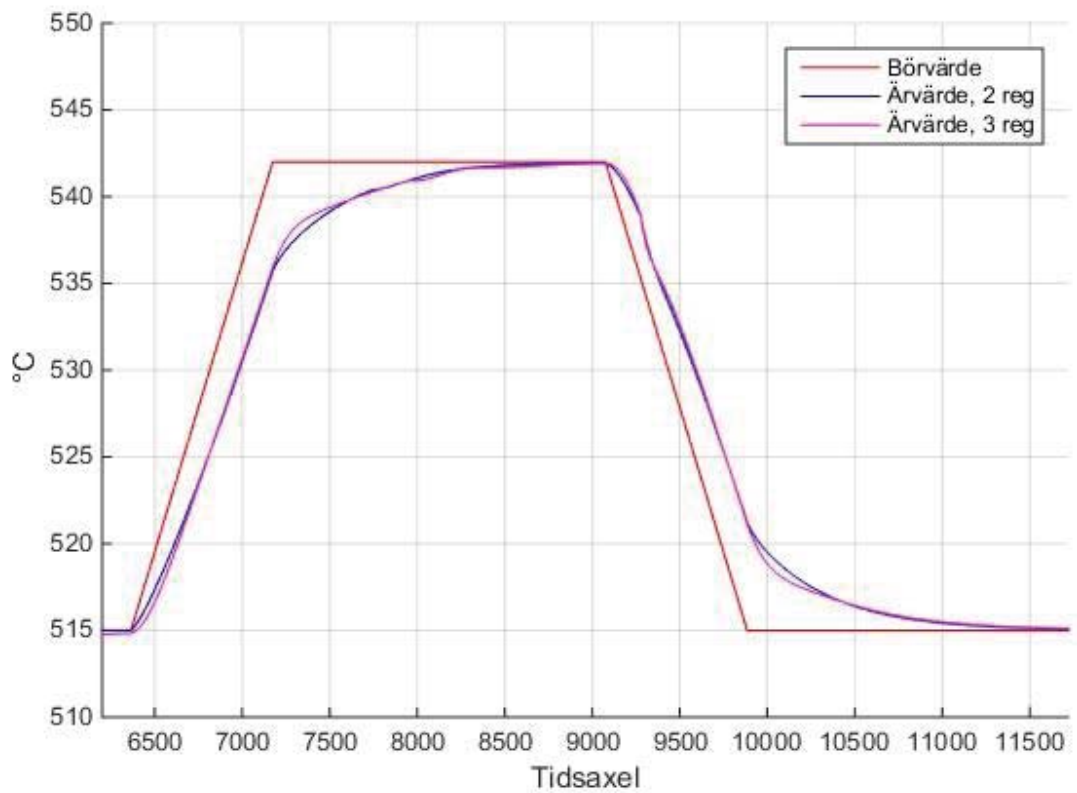
Nedan visas en första jämförelse mellan de båda kaskadreglerade systemen.



Figur 38, jämförelse mellan insvängningstider med börvärdet 515 °C.

Insvängningstiderna skilde sig inte märkbart. Systemet med två regulatorer svänger in något jämnare och snabbare medan det andra systemet gör en mer tvärt insvängning.

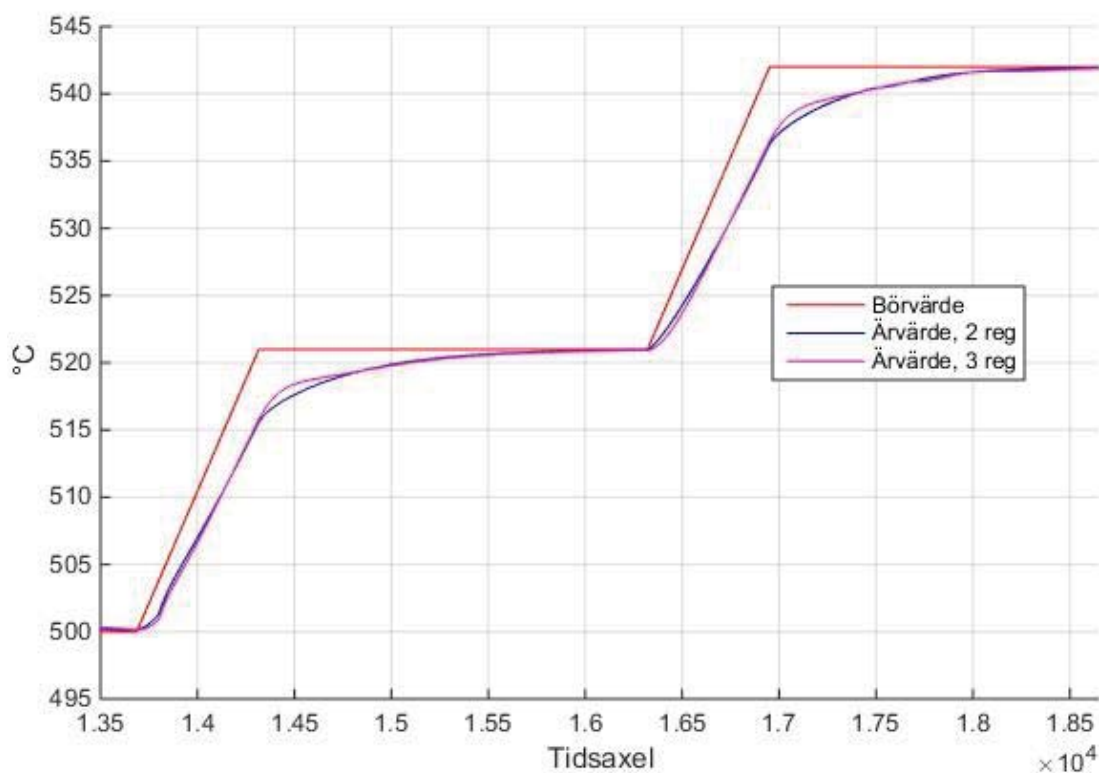
Nästa naturliga test var att se på beteendet vid börvärdesändringar. Här ändrades börvärdet från 515 °C till 542 °C och sedan tillbaka till 515 °C igen. I figur 39 går det att jämföra de två olika systemen med varandra.



Figur 39, Börvärdesändringar mellan 515 °C och 542 °C.

Även här var systemen nästan identiska när det gäller hastighet. Endast små skillnader inträffade under förloppet.

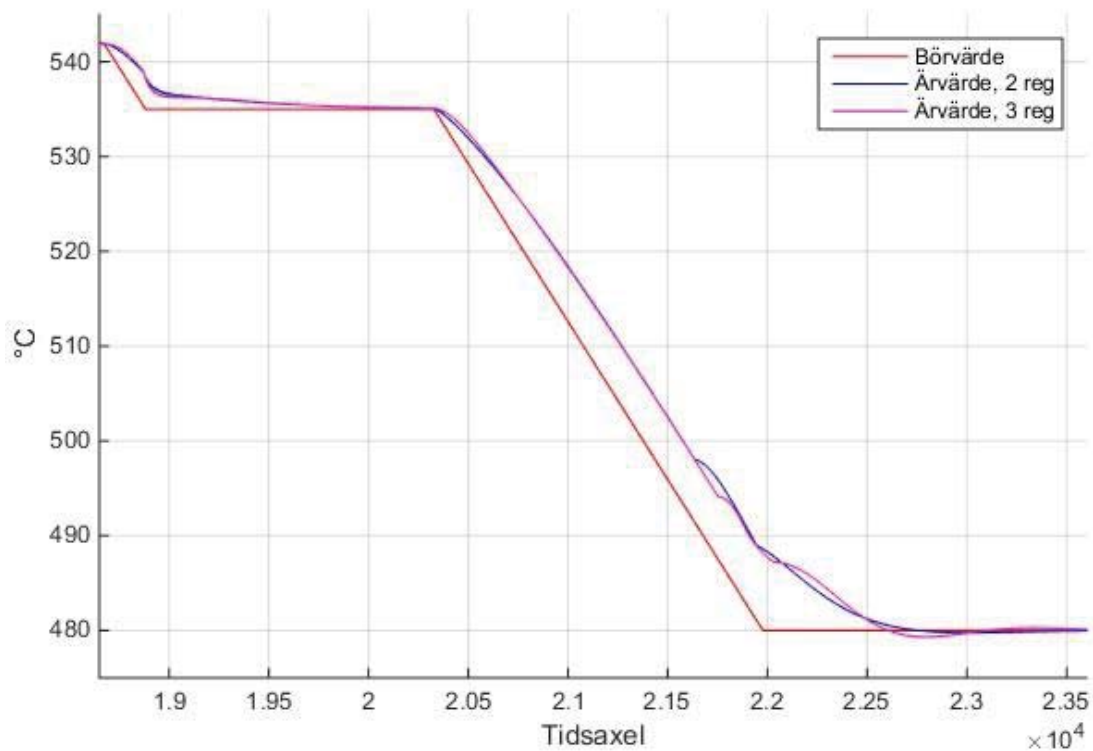
För att få en mer utförlig bild av hur stor skillnad det är mellan systemen utfördes en rad fler börvärdesförändringar. I figur 40 ger en börvärdesförändring från 500 °C till 521 °C och sedan till 542 °C.



Figur 40, 500 °C - 521 °C - 542 °C.

Här är det ingen större skillnad på de olika systemen och de beter sig som tidigare. Hastigheten för systemen att stabilisera sig är i princip identiska och det finns endast små skillnader som påträffas vid insvängningen av börvärdet.

I figur 41 sker en börvärdesförändring från 542 °C till 535 °C och sedan till 480 °C.



Figur 41, 542 °C - 535 °C - 480 °C.

Här är det större skillnad än tidigare börvärdesförändringar. Vid första börvärdesförändringen betar sig systemen som tidigare. Men när temperaturen sänks till 480 °C blir båda systemen mer instabila och betar sig inte längre likadant.

För en bild med flera börvärdesändringar se Bilaga 3.

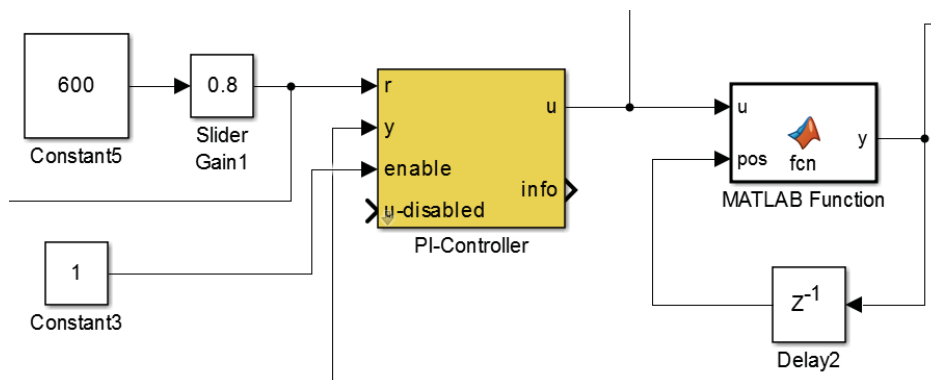


## 6. Diskussion och slutsats

Här diskuteras en alternativ lösning samt begränsningarna som gjorde att modellen blev som den blev. En liten fördjupning av resultaten görs också.

### 6.1 Diskussion kring alternativ modellösning

Istället för att skala signalerna mellan regulatorerna genom att ändra förstärkningen så gjordes även ett test där parametrarna var samma som de på Rya KVV. För att få systemet att reglera ordentligt gjordes "skalningen" istället i ett funktionsblock. Detta var under ett tidigt stadium i modelleringen när arbetsgången inte var helt utstakad.



Figur 42, Utsignalen från regulatorn går in i funktionen för rätt skalning till ventilen.

Den kod som skrevs bedömer insignalen och ser ifall ventilöppningen skall öka eller minska. För att komma ihåg vad ventilöppningen var till nästa gång, är utsignalen från funktionen återkopplad.

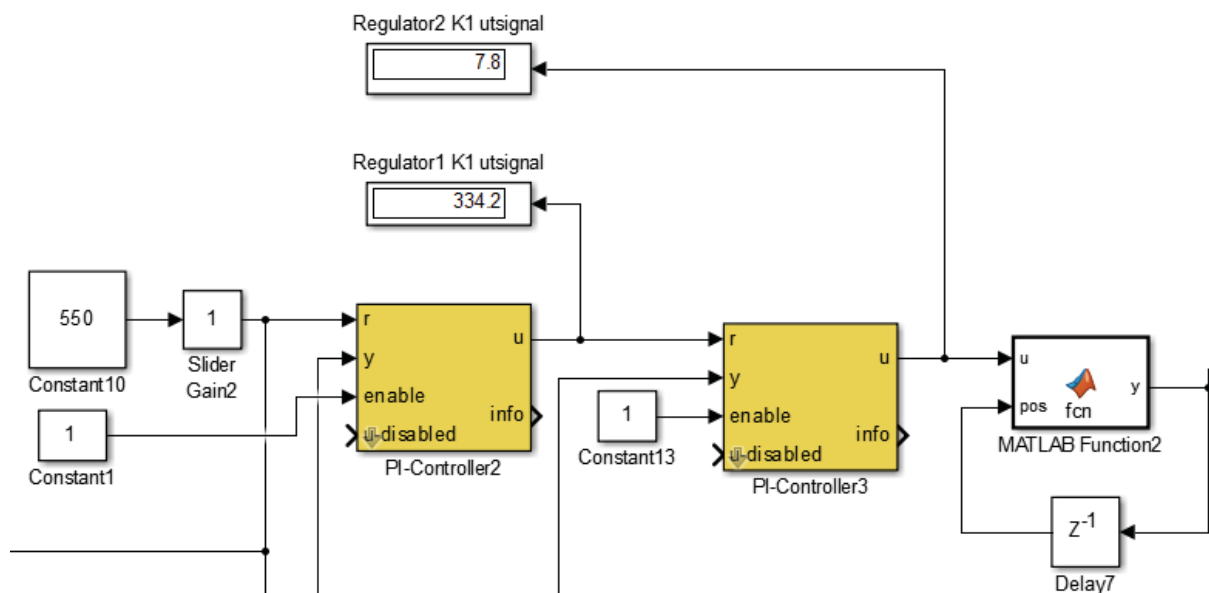
```
MATLAB Function2* x MATLAB Function* x +
1 function y = fcn(u,pos)
2 %#codegen
3
4 if u > 0                                %som u är större än 0
5     if pos <= 0.999                    %och om pos är mindre än 0.999
6         pos = pos+0.001;                %kyla mindre!
7     end
8 end
9
10 if u == 0                             %som inget fel
11     pos=pos;                           %ventil är samma som innan
12 end
13
14 if u < 0                               %som u är mindre än 0
15     if pos >= 0.001                    %och om pos är större än 0.001
16         pos = pos-0.001;                %kyla mer!
17     end
18 end
19 if pos <=0.4                           %öppning max 59%
20     pos = 0.41;
21 end
22 y=pos;                                %utsignalen = pos
```

Figur 43, Den slutgiltiga koden i funktionsblocket för ventil 1. koden är identisk till ventil 2 förutom att max öppningsgräns istället för 39%.

Om ett negativt tal kommer in i funktionsblocket betyder det, vid P-reglering, att ärvärdet är större än börvärdet från föregående regulator. Alltså är temperaturen för hög och behöver sänkas. *Pos* måste då minska för att öppna ventilen till dess att kylflödet är på rätt nivå, och tvärt om då det är en positiv insignal. *Pos* har en maxgräns som nås runt 60 % för ventil 1 respektive 40 % för ventil 2. Detta eftersom ventilerna inte öppnar mer än så i det verkliga systemet. För varje cykel ökar eller minskar då *pos* med 0.001 så länge inte insignalen visar 0, då behåller *pos* samma värde som innan.

Detta funktionsblock låg till grund för det funktionsblock som användes till börvärdesrampningen. En följd av detta blir att ventilerna inte kan öppnas snabbare eller långsammare beroende på hur stor eller liten insignalen är. Det märktes dock att *pos* ändrades så pass snabbt att koden i fråga var tillräckligt precis för att användas vid en simulering.

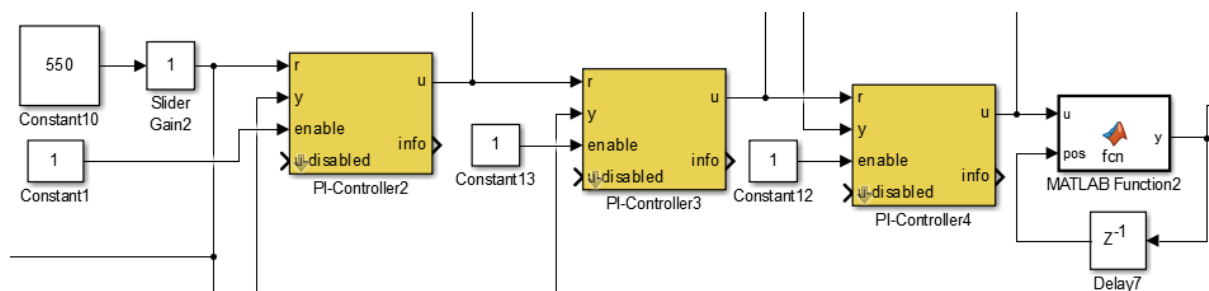
För att få samma system som det verkliga behövdes tre regulatorer per kylvattenflöde. Modellen behövde alltså vidgas. Ett andra kylflöde implementerades på samma sätt som det första. Sen lades det in en andra regulator, den utav dem som har temperaturen efter sprayerna som insignal.



Figur 44, Testmodell med de två första regulatorerna.

För att få modellen att reglera som det var tänkt behövde egentligen bara ändringar göras i funktionsblocket då vi visste vad insignal och börvärde skulle vara för värden för varje regulator.

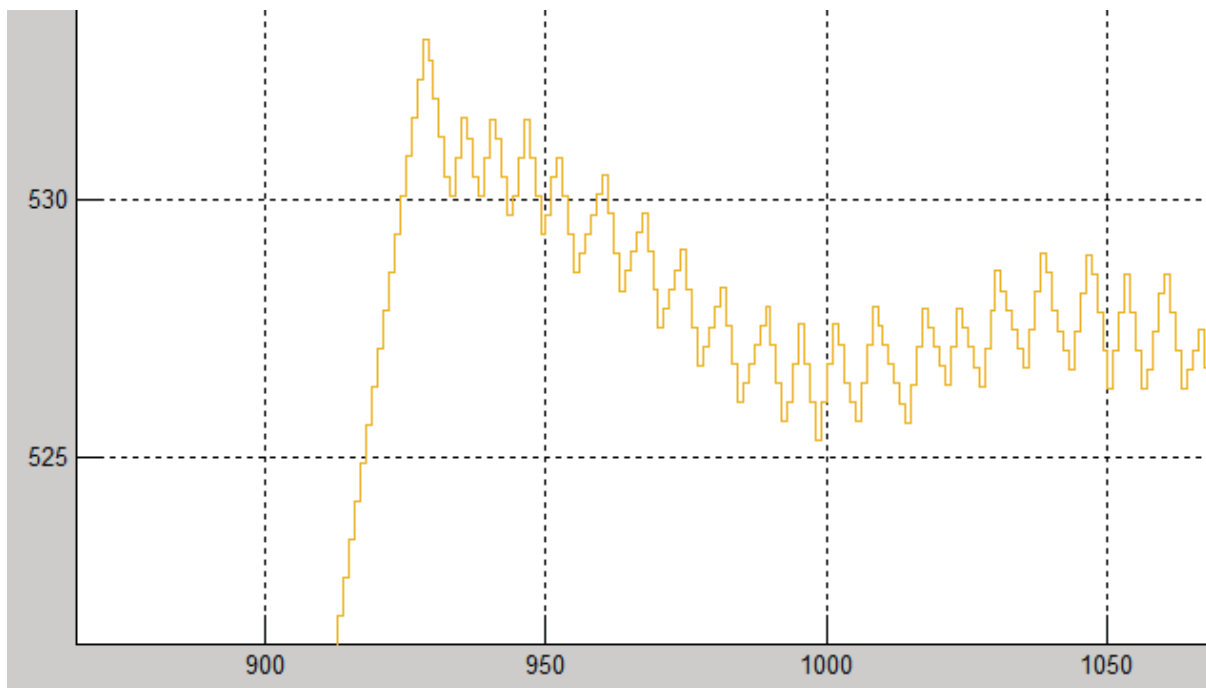
Till sist implementerades även den sista regulatorn med kylflöde som insignal. Efter ytterligare justeringar i funktionsblocket fungerade även denna modell som blev den slutgiltiga.



Figur 45, Testmodell med alla tre regulatorerna.

De parametrar som används i det riktiga systemet användes även i modellen till en början. En hög integrationstid hos den första regulatören användes för en långsam men stabil insvängning. Insvängningstiden vid start av systemet som en sådan integrationstid medför är onödigt lång i en simulering. En betydligt kortare I-del sattes därför i första regulatören för en snabbare start och mer effektiv testning. Systemet förblev stabilt trots denna ändring.

Problemet med denna representation av systemet var att endast den första regulatören kollade på rätt värden. Regulator 1 och 2 ställdes in att bara arbeta inom spannen -1 och 1 eftersom detta var allt som krävdes för att styra *pos* med hjälp av funktionsblocket. Modellen reglerade temperaturen snabbt men inte särskilt stabilt. Eftersom utsignalen aldrig blev 0 så skiftade istället *pos* mellan att öka och minska vilket ledde till "hackiga" mätvärden.



Figur 46, Uttemperaturen som funktion av tiden gav hackiga utsignaler.

Hade uppdraget varit att skapa en P-regulator som bara tittar på uttemperaturen som ärvärde hade detta system fungerat bättre.

## 6.2 Diskussion kring förenklingar i modellen samt modellkvalitet

Nedan följer vilka förenklingar som gjordes i modellen och hur hög kvalitet den slutgiltiga modellen höll. Förenklingar gjordes främst som en följd av tidsbrist.

### 6.2.1 Tryckventilen

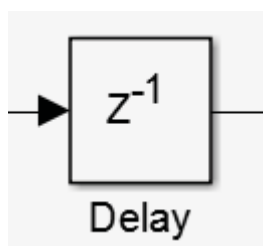
Det visade sig bli en allt för svår uppgift att få all data att stämma vid olika tryck. I ett system som detta var det så mycket som påverkades av en tryckförändring. Allt från flödena i de aktiva ventilerna till temperaturen på ångan. Det fanns inte tillräckligt mycket tid till att ändra modellen så den blev noggrann även vid tryckändringar. Ett konstant domtryck på 103.2 bar sattes istället med ett sluttryck på 95 bar och 99.15 bar över kylsprayerna. Den ventil som från början skulle ändra trycket förblev alltså endast en konstant.

Vi behöll dock ventilen i modellen då den trots allt tjänade ett syfte att sätta ett konstant tryck.

### 6.2.2 Fördröjning i systemet

Det är omöjligt att hetta upp ett medium direkt. Det tar alltid en viss tid att öka eller minska temperaturen på exempelvis vattenånga. I Thermolib användes exempelvis ett block som kallas heater för att värma upp ångan. Detta skedde direkt utan fördröjning vilket såklart inte är fallet i ett riktigt system. Även kylvattnet hade en direkt verkan på uttemperaturen. Detta kan möjligtvis förklara de små ojämnheter som uppstod under temperaturförändringar. Så fort ventilerna öppnades sjönk uttemperaturen direkt, vilket kan leda till att ventilerna måste stänga direkt och så vidare.

Ett sätt att tackla detta problem var att sätta in fördröjningsblock i systemet på lite olika platser för att likna fördröjningar i överhettare och kylvatten.



Figur 47, Fördröjningsblock.

Fördröjningsblocken var dock inte optimala och de skapade en hel del felmeddelanden när modellen skulle köras. De hade trots detta en väsentlig del i vårt modellerande och hjälpte oss göra modellen något mer verklighetstrogen.

### 6.2.3 Tryckfall i ledningar

Precis som att det är fördröjningar i ett verkligt system finns det alltid även ett tryckfall i ledningar och komponenter. Eftersom man i Thermolib inte arbetar med riktiga rör och ledningar utan bara databussar fick man själv se till så det fanns någorlunda genuina tryckfall. Tryckförlustfaktorn i Mixer 2 och tryckventilerna fick vara substitut för denna sortens förenkling. Detta ledde till en "hackig" tryckförlust där hälften förlorades vid ett tillfälle och hälften vid ett annat och inte lite under loppets gång. Denna förenkling ansågs dock bli bra till slut eftersom värdena stämde överens med de data som insamlades.

### 6.2.4 Ytterligare diskussion

Då tester gjordes med stegvisa börvärdesändringar skiftade ärvärdena mycket i början av sin ned- och uppstigning. De såg ut att nästan vara instabila då de skiftade mycket fort mellan stora spann till dess att de jämnade ut sig och landade på börvärdet. Detta var mest troligt en följd av att systemet reglerade för fort. Fördröjningsblocken som användes var som sagt inte helt optimala på att simulera fördröjningar. När fördröjningstider ändrades skiftade balansen i modellen och för att slippa ändra alla parametrar så behölls de nuvarande fördröjningsblocken som de var. Då börvärdesrampningen implementerades blev dessa skiftningar betydligt mindre till den grad att de knappt syns i graferna. Om förstöring av graferna görs så syns det fortfarande snabba ändringar eftersom modellen reglerar för fort. Detta problem ansågs dock vara väldigt obetydligt då rampning användes.

## 6.3 Slutsats

Det framkom ytterst små skillnader mellan att köra modellen med tre eller två regulatorer. Tiden det tog vid insvängning och ändringar av börvärdet var vid alla temperaturer väldigt lika. Ett sådant system är alltså lika snabbreglerande med tre regulatorer som med två.

En skillnad, som främst sågs vid stegvisa börvärdesändringar, var att modellen med tre regulatorer var stabilare. Då rampning av börvärdet användes var skillnaderna minimala men det är möjligt att tre kaskadkopplade regulatorer även då utgör ett mer stabilt system än då två kaskadreglerade regulatorer användes. Med stabilare menas att det krävs mindre ändringar i två-reglersystemet för att den skall börja självsvänga. Tre-reglersystemet är alltså något mer tolerant.

Eftersom det verkliga systemet är något långsammare än modellen som tagits fram, på grund av ramp- och reglerhastigheten, är det möjligt att en kaskadreglering med tre regulatorer är överflödig. Systemet är redan så pass stabilt att ett ännu långsammare system knappast skulle göra det instabilare. Eftersom modellen är en grovt förenklad representation av det verkliga systemet på Rya KVV är det inte rimligt att utföra några förändringar endast baserat på denna rapport. Vidare efterforskning och utveckling av modellen bör utföras innan tillräckligt pålitliga resultat kan uppnås. Det råder dock inget tvivel om att Thermolib är ett kraftfullt verktyg, och med rätt kunskap och tillräckligt med tid går det att skapa modeller som är mycket lika verkligheten.

Förbättringar på det verkliga systemet lyckades inte göras. Däremot konstateras att ett reglersystem utan flödesregulatorn mest troligt kommer fungera minst lika bra som ett reglersystem med flödesregulatorn. Den nuvarande regleringen är alltså inte optimal. Om man lyckas utveckla en förbättrad reglering, efter vidare efterforskningar, kan det i längden leda till högre energieffektivitet vilket naturligtvis är önskvärt ur miljösynpunkt.

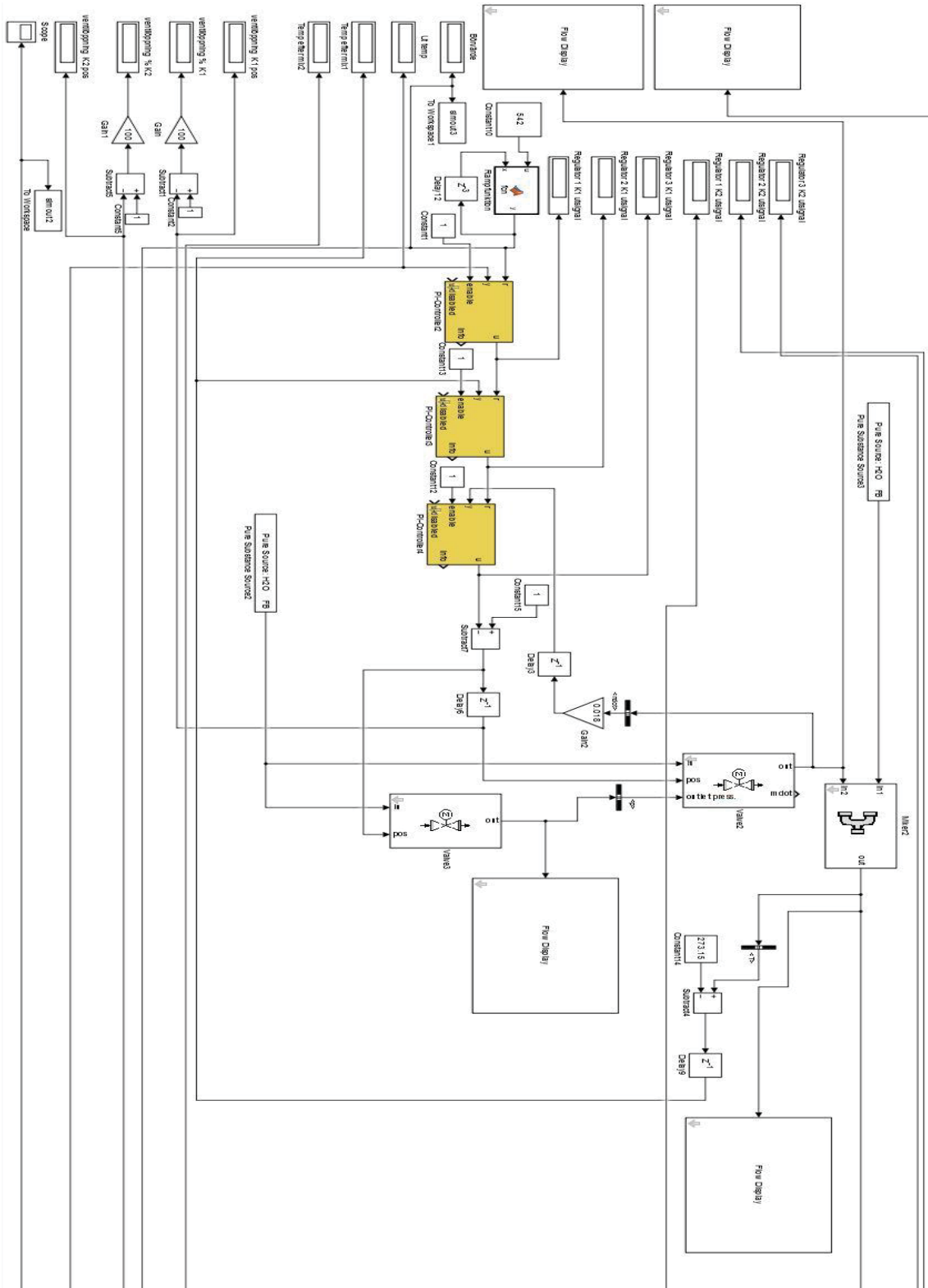
Ett viktigt faktum att ta med sig från det här arbetet är att verkligheten aldrig stämmer överens med teorin. En modell kan aldrig bli en perfekt kopia av det verkliga systemet vilket innebär att tolkningar av resultat måste göras. Det gäller att ha en god uppfattning om vad som är bra och vad som är dåliga resultat för att veta om den simulering man just genomfört var lyckad eller inte.

## 7.Referenser

- (1) MathWorks hemsida – About MathWorks  
[http://se.mathworks.com/company/?s\\_tid=gn\\_co](http://se.mathworks.com/company/?s_tid=gn_co) (Acc 2015-04-03)
- (2) Thermolib GETTING STARTED release 5.3
- (3) Göteborgs viktigaste miljöprojekt  
<http://www.goteborgenergi.se/Files/dok/Informationsmaterial/Broschyrer/Teknisk%20information%20om%20Rya.pdf?TS=634009613227826250> (Acc 2015-04-28)
- (4) Rya Kraftvärmeverk – en anläggning för framtiden  
[http://www.goteborgenergi.se/Om\\_oss/Var\\_verksamhet/Produktionsanlaggningar/Rya\\_Kraftvarmeverk](http://www.goteborgenergi.se/Om_oss/Var_verksamhet/Produktionsanlaggningar/Rya_Kraftvarmeverk) (Acc 2015-04-28)
- (5) Kompendium Identifiering för MEI Mekatronikprojekt, Göran Hult, 2014
- (6) 3 Underhåll och teknisk dokumentation för manövreringsventil, Siemens Industrial Turbomachinery AB, 2005
- (7) Modern Reglerteknik, Bertil Thomas, 2008
- (8) Praktisk Processreglering, Tore Hägglund, 2008
- (9) Reglerteknik, Krister Forsman, 2005
- (10) Third edition of Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences, Y. Çengel, R. Turner, J. Cimbala, 2008

## Bilaga 1

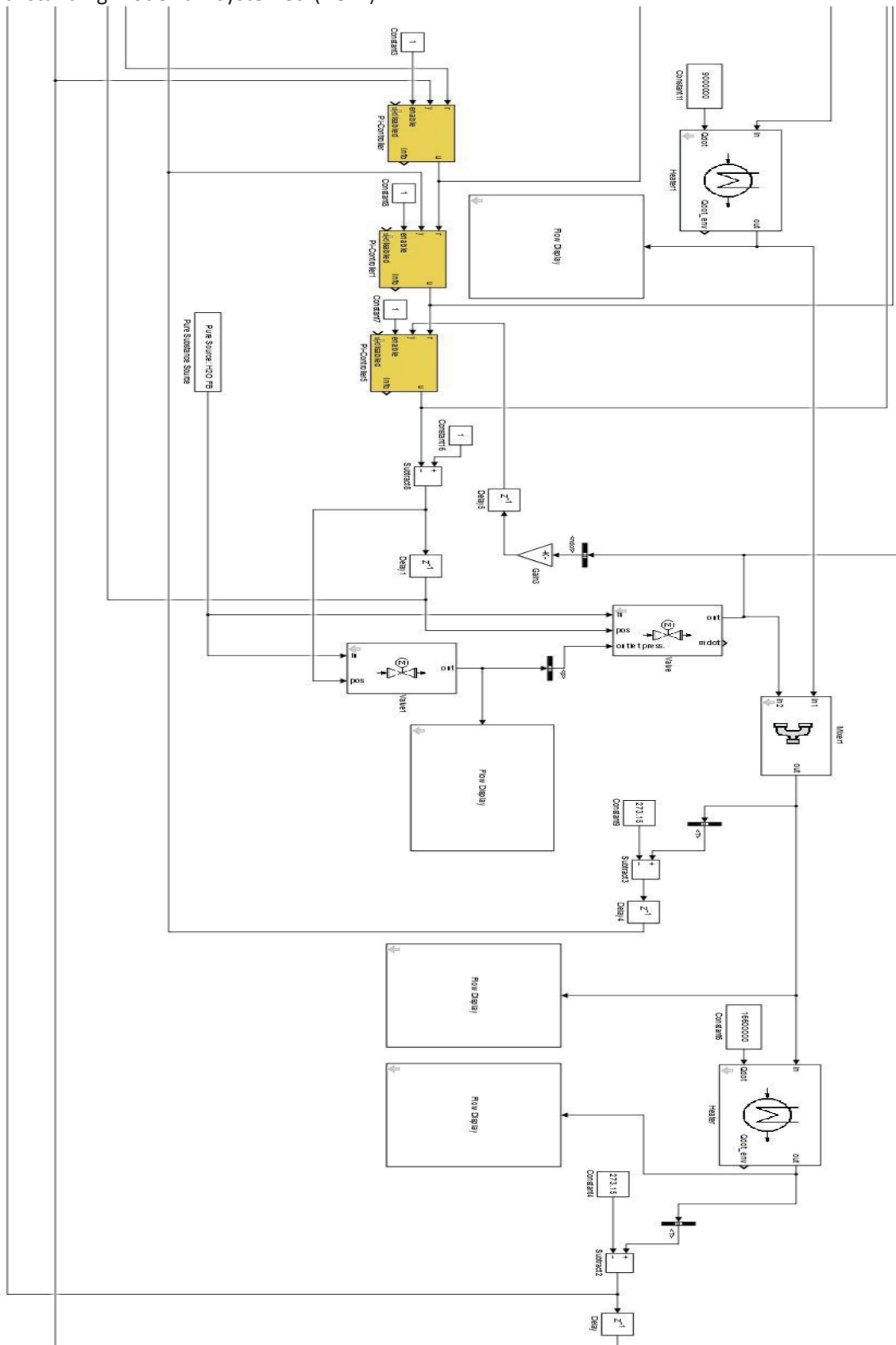
## Fullständig modell av systemet. (Del 1)





## Bilaga 2

Fullständig modell av systemet. (Del 2)



# Bilaga 3

Resultat vid flera börvärdesändringar.

