



Høgskulen
på Vestlandet

BACHELOROPPGAVE:
GEOTERMISK
BOREVÆSKEREGULERING VED HJELP
AV SCL-PROGRAMMERING FOR PLS

Malin Stølsvik
Elín Haugsdal Kvinge

29. mai. 2019

Dokumentkontroll

| | |
|--|--|
| <i>Rapportens tittel:</i> BO19E-23 Geotermisk borevæskeregulering | <i>Dato/Versjon</i> 29. mai. 2019/4.0 |
| | <i>Rapportnummer:</i> B019E-23 |
| <i>Forfattere:</i> Malin Stølsvik Elín Haugsdal Kvinge | <i>Studieretning:</i> 16HEAU |
| | <i>Antall sider m/vedlegg</i> 79 |
| <i>Høgskolens veileder:</i> Emil Cimpan | <i>Gradering:</i> Åpen |

| | |
|---|----------------------------------|
| <i>Oppdragsgiver:</i> Cybernetic Drilling Technologies AS – CDT | <i>Oppdragsgivers referanse:</i> |
| <i>Oppdragsgivers kontaktperson(er) (inkludert kontaktinformasjon):</i> Helge Reigstad Telefon: 5555 8820 Email-adresse: helge.reigstad@cdt.no | |

| Revisjon | Dato | Status | Utført av |
|----------|----------|---|-----------|
| 1.0 | 15.01.19 | Forprosjekt | Begge |
| 1.1 | 30.01.19 | Forbedring av forprosjekt | Begge |
| 2.0 | 05.04.19 | Lagt til arbeidet med reguleringsalgoritmen | Begge |
| 3.0 | 21.05.19 | Ferdigstilling av rapport | Begge |
| 4.0 | 29.05.19 | Endring av oppgavetittel | Begge |

Forord

Denne rapporten er et resultat av emnet ELE150. Oppgaven er utført i samarbeid med Cybernetic Drilling Technologies. Målet med oppgaven var å lage en reguleringsalgoritme for tilsetning av fortynnings- og fortykningsmiddel til borevæske slik at egenskapene til væsken optimaliseres. Det var ønsket at sluttproduktet skulle være en helautomatisert løsning hvor reguleringsalgoritmen implementeres ved bruk av PLS. Videre skulle systemet kunne styres via et HMI-panel. Dette innebar at vi har måttet kombinere kunnskap fra ELE106 – Reguleringsteknikk 2 og ELE105 – Industrielle styresystemer - da nærmere bestemt SCL-programmering. Prosjektet har vært utfordrende, spennende og lærerikt, og det har vært spesielt givende å se at vi har fått bruk for kunnskap vi har tilegnet oss i løpet av studietiden.

Vi ønsker å rette en takk til CDT som har stilt med oppgaven, spesielt Helge Reigstad og Gerhard Nygaard som har bistått med verdifull hjelp knyttet til feilsøking av måleinstrumenter. Vi ønsker også å rette en stor takk til Lars Manger Ekroll som har hjulpet oss med gjennomføring av det praktiske arbeidet i prosjektet. Til slutt vil vi takke vår veileder, Emil Cimpan, for god veiledning i arbeidet med reguleringsalgoritmen.

Sammendrag

Når man hører ordet brønnboring tenker man gjerne på olje- og gassindustrien, men i flere land borer de også brønner for å kunne utvinne såkalt geotermisk energi. Geotermisk energi er energi lagret i jorden i form av varme. Denne typen energi er miljøvennlig og fornybar, men er foreløpig lite utbredt. Borevæsken har en svært sentral rolle under utvinning av både olje- og gass, og geotermisk energi. Noen av de viktigste oppgavene til væsken er å kjøle og forhindre friksjoner mellom utstyr og borehullsveggen, i tillegg til at den skal trekke med seg borekaks opp fra hullet. Boreprosessen avhenger av at væsken har de absolutt korrekte verdiene og egenskapene, selv når boringen er stanset. En borevæske med korrekte reologiske egenskaper kan forhindre at utblåsninger eller borehulls-kollapser oppstår. Underveis i prosessen er det derfor viktig at væske-egenskapene kontinuerlig sjekkes og korrigeres. Så lenge boring foregår, og væsken trekker med seg borekaks fra hullet, vil egenskapene til borevæsken endres ut ifra hvilke formasjoner det bores gjennom. Mer teori om geotermisk energi og brønnboring finnes i *Appendiks D - Litteraturstudie*.

Per dags dato sjekkes de reologiske egenskapene til borevæsken manuelt ved at det tas ut prøver av borevæsken. Videre utføres ulike tester for å kunne fastslå væskens egenskaper. Dersom denne prosessen hadde vært automatisert ville det vært mulig å kontinuerlig overvåke borevæsken samtidig som risikoen for menneskelige feil ville blitt redusert. En helautomatisert løsning vil også kunne være med å redusere borekostnader - noe som er spesielt viktig dersom det skal bli realistisk å bore etter geotermiske brønner i Norge. Det er nettopp dette oppgaven vår baserer seg på.

Oppgaven går ut på å kontinuerlig overvåke og regulere de reologiske egenskapene til borevæsken ved hjelp av PLS styring og sensorbruk. Vår oppdragsgiver, CDT, har utviklet et eget sensorsystem kalt ISPS – Instrumental StandPipe System. Systemet blir brukt for kontinuerlig måling av tetthet og reologi av borevæske. Sensorsystemet er tatt i bruk på flere offshore borerigger. I tillegg til å benytte dette var det nå ønskelig å få til en automatisk regulering ved tilsetning av fortykning- og fortykningsmiddel slik at borevæskens egenskaper optimaliseres.

En forminket modell av ISPS-systemet var allerede bygget av tidligere bachelorstudenter, men etter en gjennomgang av modellen ble det oppdaget at utbedringer måtte gjennomføres. Det ble derfor brukt mye tid på praktisk arbeid knyttet til dette. Arbeidet som er blitt utført er beskrevet under kapittel 4 - Realisering av valgt løsning.

Det er i tillegg utviklet et PLS program som tar for seg styringen og reguleringen av systemet ved hjelp av et HMI-panel.

Innholdsfortegnelse

| | |
|---|----|
| Dokumentkontroll | 2 |
| Forord | 3 |
| Sammendrag | 4 |
| Innholdsfortegnelse | 5 |
| Figur oversikt | 8 |
| Tabell oversikt | 9 |
| 1 Innledning | 10 |
| 1.1 Organisering av rapporten | 10 |
| 1.1.1 Appendiks A – Teori knyttet til strømningslære | 10 |
| 1.1.2 Appendiks B – Simulering av prosessen | 10 |
| 1.1.3 Appendiks C – Reguleringsalgoritme | 10 |
| 1.1.4 Appendiks D – Litteraturstudie | 10 |
| 1.1.5 Appendiks E – Feilsøking av viskositet | 10 |
| 1.1.6 Appendiks F – Forkortelser og ordforklaringer | 10 |
| 1.1.7 Appendiks G – Prosjektledelse og styring | 10 |
| 1.1.8 Appendiks H – Brukerdokumentasjon | 11 |
| 1.1.9 Appendiks I – Koblings skjema | 11 |
| 1.1.10 Appendiks J – Liste over vedlegg | 11 |
| 1.2 Oppdragsgiver | 11 |
| 1.3 Problemstilling | 11 |
| 1.4 Hovedidé for løsningsforslag | 12 |
| 2 Kravspesifikasjon | 13 |
| 2.1 Simulering av prosessen i TIA-portal ved bruk av SCL | 13 |
| 2.2 PLS-program ved bruk av SCL | 13 |
| 2.3 Mikseanlegg | 13 |
| 3 Analyse av problemet | 14 |
| 3.1 Utforming av mulige løsninger | 15 |
| 3.1.1 Løsningsalternativ 1 – opprinnelig rørlengde | 15 |
| 3.1.2 Løsningsalternativ 2 – forkortet rørlengde | 15 |
| 3.1.3 Vurderinger i forhold til verktøy og HW/SW komponenter | 15 |
| 3.2 Konklusjon | 15 |
| 4 Realisering av valgt løsning | 17 |
| 5 Testing | 19 |

| | | |
|-------------|---|----|
| 5.1 | Testing av systemet for å finne regulatorparametre til PI regulator | 19 |
| 5.1.1 | Regulatorparametre ved hjelp av Ziegler Nichols tabell | 21 |
| 5.1.2 | Regulatorparametre ved hjelp av Cohen Coon | 22 |
| 5.1.3 | Implementering av PID reguleringsalgoritme | 23 |
| 5.2 | Testing av implementert reguleringsalgoritme | 25 |
| 5.2.1 | Test 1: Test av systemet med implementert reguleringsalgoritme | 26 |
| 5.2.2 | Test 2 – Test av systemet med implementert reguleringsalgoritme | 26 |
| 5.3 | Test av systemet ved tilsetning av Xanthan Gum | 28 |
| 5.3.1 | Test med tilsatt fortykningsmiddel | 29 |
| 6 | Diskusjon | 31 |
| 7 | Konklusjon | 33 |
| 8 | Referanser | 34 |
| Appendiks A | Strømningslære | 36 |
| Appendiks B | Simulering av prosessen | 39 |
| B.1 | Simulator V1 | 39 |
| B.2 | Simulator V2 | 41 |
| B.3 | Resultater fra simulator | 43 |
| Appendiks C | Reguleringsalgoritme | 44 |
| C.1 | Pictorial diagram av systemet | 44 |
| C.2 | Blokkdiagram av reguleringsløyfen | 44 |
| C.3 | Modellering av pumpeprosessen | 45 |
| C.4 | Transferfunksjoner for systemet | 47 |
| C.5 | Plottet flowrate og pådrag | 48 |
| C.6 | Regulatorparametre - Ziegler Nichols | 53 |
| C.7 | Regulatorparametre – Cohen Coon | 55 |
| C.8 | Utledning av reguleringsalgoritme (PID-regulator) | 58 |
| C.9 | Implementering av PID regulator til program | 62 |
| Appendiks D | Litteraturstudie | 63 |
| D.1 | Geotermi | 63 |
| D.2 | Borevæske | 65 |
| Appendiks E | Feilsøking av viskositet | 67 |
| Appendiks F | Forkortelser og ordforklaringer | 69 |
| Appendiks G | Prosjektledelse og styring | 70 |
| G.1 | Prosjektorganisasjon | 70 |

| | | |
|-------------|---|----|
| G.2 | Fremdriftsplan | 70 |
| G.3 | Risikoliste | 71 |
| Appendiks H | Brukerdokumentasjon | 72 |
| H.1 | Styring av systemet | 72 |
| H.2 | Drifts- og vedlikeholds dokumentasjon | 75 |
| Appendiks I | Koblingsskjema | 76 |
| Appendiks J | Liste over vedlegg | 79 |

Figur oversikt

| | |
|---|----|
| Figur 1 - Systemskisse av modellen | 14 |
| Figur 2 - Vertikalt rør bygget inn i kasse | 14 |
| Figur 3 - Demontering av kasser for rørstykkene | 17 |
| Figur 4 - Festeordning for trykktransmitter | 18 |
| Figur 5 - Komplette modul etter ombygging | 18 |
| Figur 6 - Blokkdiagram over reguleringsløyfen | 19 |
| Figur 7 - HMI hovedskjerm | 19 |
| Figur 8 - Graf over måleresultater ved 45% pådrag | 21 |
| Figur 9 - Fortynnings- og fortykningsmiddel tank | 23 |
| Figur 10 - Blokkdiagram over reguleringsløyfen | 25 |
| Figur 11 - HMI - Pictorial diagram | 25 |
| Figur 12 - Resultat test 1 - implementert reguleringsalgoritme | 26 |
| Figur 13 - Ønsket reguleringstest | 26 |
| Figur 14 - Ønsket reguleringstest med tilhørende flowrate | 27 |
| Figur 15 - Resultat test 2 - implementert reguleringsalgoritme | 27 |
| Figur 16 - Graf for oversikt over prosessen når fortykningsmiddel ble tilsatt | 28 |
| Figur 17 - Ønsket reguleringstest med fortykningsmiddel | 29 |
| Figur 18 - Resultat av regulering etter tilført fortykningsmiddel | 29 |
| Figur 19 – Illustrasjon over hvordan trykk endrer seg i et rør | 36 |
| Figur 20 – Bernoullis likning – Illustrasjon er hentet fra wikipedia [16] | 36 |
| Figur 21 - Laminær flow i rør – Illustrasjon er hentet fra wikipedia [17] | 37 |
| Figur 22 - Turbulent flow i rør – Illustrasjon er hentet fra wikipedia [17] | 37 |
| Figur 23 - Moody Diagram – Illustrasjon hentet fra wikipedia [6] | 38 |
| Figur 24 - Skjerm bilde fra Simulator versjon 1 | 39 |
| Figur 25 - Skjerm bilde for Simulator versjon 2 | 41 |
| Figur 26 – Pictorial diagram av systemet | 44 |
| Figur 27 – Blokkdiagram - reguleringsløyfen | 44 |
| Figur 28 – Oppdatert blokkdiagram | 45 |
| Figur 29 - Transferfunksjon til systemet for hvert pådrag | 47 |
| Figur 30 – Plottet flowrate – pådrag 30%-40% | 48 |
| Figur 31 – Plottet flowrate – pådrag 42%-61% | 49 |
| Figur 32 – Plottet flowrate – pådrag 74%-85% | 50 |
| Figur 33 - Blokkdiagram over reguleringsløyfen | 58 |
| Figur 34 – Geotermisk Energi, illustrasjon hentet fra [10] | 63 |
| Figur 35 – Kostnatsøking knyttet til boring av brønner – Illustrasjon hentet fra [11] | 64 |
| Figur 36 – Illustrasjon av borerigg hentet fra tidligere bacheloroppgave (2015) [18] | 65 |
| Figur 37 - Viskositetssjekk for borevæske utført for hånd hentet fra ndla.no [19] | 65 |
| Figur 38 - Graf for sammenligning av målinger fra simulator og fysisk system | 67 |
| Figur 39 - Beregninger i Excel, Laminær utregning av Darcy | 68 |
| Figur 40 - Beregninger i Excel, Turbulent utregning av Darcy | 68 |
| Figur 41 - Fremdriftsplan | 70 |
| Figur 42 - HMI, Hovedskjerm for styring | 72 |
| Figur 43 - Manuell styring | 73 |
| Figur 44 - HMI, Pop-up vindu for tilsetning | 73 |

| | |
|--|----|
| Figur 45 - HMI, Automatisk regulering | 73 |
| Figur 46 - Pop-up vindu for Loggføring..... | 74 |
| Figur 47 -HMI, graf over ønsket og nåværende strømningsrate..... | 74 |
| Figur 48 - HMI, visning av graf for viskositet | 75 |

Tabell oversikt

| | |
|---|----|
| Tabell 1 - Oversikt over forsterkning, tidskonstant og tidsforsinkelse..... | 21 |
| Tabell 2 - Ziegler Nichols tabell | 22 |
| Tabell 3 - Oppsummert oversikt over Ziegler Nichols regulatorparametre | 22 |
| Tabell 4 - Cohen Coon tabell | 22 |
| Tabell 5 - Oppsummert oversikt over Cohen Coon regulatorparametre | 22 |
| Tabell 6 - Resultater fra simulatormålinger..... | 43 |
| Tabell 7 - Forsterkning, tidskonstant og tidsforsinkelse til systemet..... | 47 |
| Tabell 8 - Oppsummering test 1 - pådrag 45% | 51 |
| Tabell 9 - Tidskonstant, tidsforsinkelse og forsterkning - Test 1 pådrag 45%..... | 52 |
| Tabell 10 - Tidskonstant, tidsforsinkelse og forsterkning - Test 2 pådrag 45%..... | 52 |
| Tabell 11 - Gjennomsnitt av test 1 og test 2: Forsterkning, tidskonstant og tidsforsinkelse | 52 |
| Tabell 12 - Ziegler Nichols regulatorparametre | 53 |
| Tabell 13 - Utregning av regulatorparametre Ziegler Nichols..... | 53 |
| Tabell 14 - Oppsummerte resultater for PI-regulator Ziegler Nichols | 54 |
| Tabell 15 - Transferfunksjon for PI-regulator Ziegler Nichols | 54 |
| Tabell 16 - Cohen Coon regulatorparametre | 55 |
| Tabell 17 - Utregning av regulatorparametre Cohen Coon..... | 56 |
| Tabell 18 - Oppsummerte resultater for PI-regulator Cohen Coon | 56 |
| Tabell 19 - Transferfunksjon for PI-regulator Cohen Coon | 57 |
| Tabell 20 - Ordforklaringer | 69 |
| Tabell 21 - Risikoanalyse..... | 71 |
| Tabell 22 - Oversikt over koblinger i styreskap | 78 |
| Tabell 23 - Tabell over vedlegg..... | 79 |

1 Innledning

1.1 Organisering av rapporten

Denne rapporten er bygd opp slik at hovedinnholdet vil bli presentert fra kapittel 2 til 7. Først vil man kunne lese litt om oppdragsgiver før problemstilling og kravspesifikasjon blir presentert. Deretter følger en analyse av problemstillingen hvor ulike løsningsalternativ drøftes. Etter dette vil realisering av valgt løsning fremlegges.

Rapporten inneholder også resultater av diverse systemtester, både med og uten implementert reguleringsalgoritme. Helt til slutt har vi to kapitler som omhandler diskusjon og konklusjon.

Flere steder i rapporten viser vi til appendikser for videre lesning. Her finner man fremgangsmåter til resultater, mer detaljerte forklaringer samt en del teori knyttet til problemstillingen.

1.1.1 Appendiks A – Teori knyttet til strømningslære

Dette kapitlet omhandler teori knyttet til strømningslære, deriblant laminær og turbulent strømning, samt hvorfor trykket endrer seg fra punkt A til punkt B i et rør.

1.1.2 Appendiks B – Simulering av prosessen

Dette kapitlet omhandler to simulatorer som er blitt laget for at man skal kunne simulere systemet. Disse er laget for å kunne forstå hvilke resultater man kan forvente seg fra de ulike måleinstrumentene i systemet. Simulatorene har blant annet blitt brukt til å avgjøre om det er mulig å redusere rørlengden på rørene i sirkulasjonssløyfen.

1.1.3 Appendiks C – Reguleringsalgoritme

Dette kapitlet omhandler hvordan man skal analysere et system for å finne tidsforsinkelse, tidskonstant og forsterkning, hvordan man skal finne regulatorparametre til ønsket regulator og hvordan man utleder en reguleringsalgoritme for en PID-regulator.

1.1.4 Appendiks D – Litteraturstudie

Dette kapitlet omhandler teori knyttet til geotermisk energi og brønnboring. Det ble bestemt at litteraturstudie skal være en del av rapporten da oppdragsgiver ønsket at vi skulle sette oss inn i disse emnene før vi startet med prosjektet.

1.1.5 Appendiks E – Feilsøking av viskositet

Dette kapitlet omhandler detaljer knyttet til feilsøking for hvorfor viskositeten ikke stemte overens med hva den var forventet å være.

1.1.6 Appendiks F – Forkortelser og ordforklaringer

Dette kapitlet omhandler forkortelser vi har brukt, og ordforklaringer til disse.

1.1.7 Appendiks G – Prosjektledelse og styring

I dette kapitlet vil man kunne lese om hvilken måte vi har valgt å fordele arbeidet på. Man finner også fremdriftsplanen som ble satt opp i starten av semesteret. I tillegg til dette omhandler kapitlet en risikoanalyse som ble foretatt for å analysere hvilke problemer det var mulig å støte på underveis i prosjektet, samt tiltak for å unngå å møte på disse problemene.

1.1.8 Appendiks H – Brukerdokumentasjon

I dette kapittelet finner man en bruksanvisning til hvordan styringen av systemet fungerer via HMI-panelet. Dette kapittelet omhandler også hva som er verdt å merke seg ved oppstart av systemet, samt hvilken programvare som trengs for å kunne bruke systemet.

1.1.9 Appendiks I– Koblingskjema

I dette kapittelet kan man finne en oversikt over koblingene i styreskapet.

1.1.10 Appendiks J – Liste over vedlegg

I dette kapittelet finner man en oversikt over hvilke vedlegg som er vedlagt denne bacheloroppgaven.

1.2 Oppdragsgiver

Cybernetic Drilling Technologies AS, forkortet CDT, er et selskap stiftet av Gerhard Nygaard i 2013. Selskapet holder til i Fabrikkgaten 5 i Bergen, og har per dags dato 5 ansatte, deltid/fulltid.

CDT utvikler og leverer automatiske styresystemer, inkludert sensorer og mekaniske komponenter, for å kunne øke effektiviteten og sikkerheten under boreoperasjoner – både under petroleumsboring og geotermisk boring.

Hovedproduktet er et sensorsystem for kontinuerlig måling av tetthet og reologi av borevæske. Sensorsystemet er i bruk på flere offshore borerigger. Det monteres gjerne flere sensorsystemer på hver borerigg, slik at man kan måle hvordan borevæsken endrer seg mens boreoperasjonen utføres.

Sensorsystemet kan knyttes opp mot boreriggens mikseanlegg. Dette gir mulighet for å regulere både tetthet og viskositet automatisk i fremtiden.

1.3 Problemstilling

Når man hører ordet brønnboring tenker man gjerne på olje- og gassindustrien, men i flere land borer de også brønner for å kunne utvinne såkalt geotermisk energi – dette spesielt på Island, Nord-California, Alpene og i New Zealand. Man håper at dette skal bli mer aktuelt i Norge i fremtiden, dersom det bores dypt nok.

Geotermisk energi er energi lagret i jorden i form av varme. Denne typen energi er miljøvennlig og fornybar. I Norge er vannkraft den mest tilgjengelige og økonomisk drivverdige ressursen vi har, dermed vil det naturligvis være vanskelig for geotermisk energi å utkonkurrere vannkraften, men den kan være et bedre alternativ enn vindkraft [1]. Dette fordi geotermisk energi ikke er avhengig av årstid eller vær – dermed er det en stabil form for energi som vil være en god buffer i energibruken vår. En annen fordel med utvinning av geotermisk energi er at anleggene bygges inn i fjellene og vil dermed ikke påvirke det ytre landskapet.

Geotermisk energi er svært lite utnyttet på verdensbasis [2]. En fordel for Norge er at norske forskningsmiljøer sitter på god kunnskap om teknologi knyttet til brønnboring og reservoarstyring på sokkelen. Denne teknologien vil være veldig nyttig i arbeidet med geotermisk energi og kan derfor bli en etterspurt eksportartikkel. Geotermisk energi innebærer å utvinne varme ved å bore kilometerdype brønner, og pumpe vann ned i dem. Jo mer sprekker i bergartene, jo bedre sirkulasjon av vannet. Det oppvarmede vannet vil bli pumpet opp igjen, og kan blant annet brukes til oppvarming. Det å bore brønner er både dyrt og tidkrevende. Derfor må boring av brønner i fremtiden effektiviseres.

Ved boring av brønner har borevæsken en sentral rolle og flere ulike oppgaver som alle er svært viktige for at boreprosessen skal foregå på en optimal måte. Væsken føres gjennom borerøret og ned mot bunnen av borehullet. I enden av borerøret vil væsken både smøre og kjøle borkronen før den videre skylles oppover mot overflaten. Når væsken spyles oppover har den som hovedoppgave å frakte med seg partikler fra grunnformasjonene som løsrives/knuses videre opp og ut av hullet. Disse partiklene er også kalt borekaks. Det er viktig at borevæsken har de rette reologiske egenskapen for den gjeldende formasjonen det bores i – dette for at væsken skal kunne holde borekaksen i suspensjon dersom det blir stans i sirkulasjonen. Samtidig skal væsken kunne legge en tynn filterkake langs borehulls-veggen for å hindre væskefasen av borevæsken i å forsvinne ut i formasjonen [3].

Oppgavene borevæsken utfører avhenger av væskens reologiske egenskaper, som vil si borevæskens flyteegenskaper. Disse påvirkes først og fremst av dens oppbygging, hvilken væskefase som brukes, hvilke reaktive og ikke-reaktive faser som blir tilsatt, samt kjemikalier som blir brukt. Etter hvert som borevæsken blir spylt gjennom borehullet vil den også påvirkes her ved at den bærer med seg borekaks og plukker opp ulike partikler etter hvert som en trenger gjennom ulike typer grunn formasjoner.

For å kontinuerlig holde væsken stabil og optimal etter forholdene må en jevnlig ta kontroller. Borevæsken er såkalt ikke-newtonsk, det vil si at viskositeten varierer avhengig av strømningshastigheten i røret.

Per nå tas det ut en prøve av borevæsken som manuelt blir testet med flere ulike instrumenter, slik at en kan konstatere de reologiske egenskapene. Dette er en prosess som tar tid da den blir håndtert for hånd. Dersom borevæskeegenskapene endrer seg imens en tar disse testene vil det ikke bli oppdaget før neste prøve er tatt. En faktor som kan påvirke målingene negativt er at det er mennesker som tar målingene og vurderer verdiene, noe som gjør det åpent for menneskelige feil. Dersom denne prosessen hadde vært automatisert, og man hadde hatt mulighet til å kontinuerlig sjekke egenskapene for væsken ville dette effektivisert arbeidet. Det ville også vær større sannsynlighet for at borevæsken hadde hatt ønskede egenskaper store deler av tiden da en kontinuerlig sjekker og utfører handling.

Det er nettopp dette oppdragsgiver ønsker at vi skal få til. Automatisere måleprosessen, slik at borevæskens egenskaper overvåkes kontinuerlig gjennom hele boreprosessen. Dette skal gjøres ved at det monteres måleutstyr direkte i sirkulasjonssløyfen. Måledata blir vurdert og videre kalkulert av en PLS, før væsken reguleres etter gitte beregninger.

Mer info om geotermisk energi og brønnboring kan en finne dette under *Appendiks D* Litteraturstudie.

1.4 Hovedidé for løsningsforslag

Oppdragsgiver presenterer et løsningsforslag basert på automatisk regulering av borevæske ved hjelp av en PLS. Borevæskens sirkulasjonssløyfe er utstyrt med flere måleinstrumenter som videre kobles opp mot en PLS. Måledataene fra måleinstrumentene vil videre bli satt inn i en reguleringsalgoritme, og ut ifra dette bestemmes den videre styringen for doseringssystemet. Doseringssystemet tilfører enten fortykning- eller fortykningsmiddel.

2 Kravspesifikasjon

Hensikten med oppgaven er i hovedsak å lage et PLS program for regulering av fortykning og fortykningsmiddel - dette for å kontrollere borevæskeegenskapene ved boring av geotermiske brønner, slik at borevæsken hverken blir for tynn eller for tykk. Reguleringen skal skje ved hjelp av en multivariabel reguleringsalgoritme som skal inneholde data fra flere sensorer.

Vi har valgt å dele opp oppgaven i tre deler. Kravene til hver del er kategorisert og definert under.

2.1 Simulering av prosessen i TIA-portal ved bruk av SCL

Ett av kravene til oppgaven er å lage en simulasjon av prosessen, for så å bygge programmet rundt dette når simuleringen gir ønskede resultater.

Denne delen består av:

- Å simulere ulike mengder av fortykning- og fortykningsmiddel slik at borevæsken får den ønskede viskositeten.
- Endring av rørlengde i simulering for å se hvilken innvirkning det vil ha på målingene sammenlignet med opprinnelig lengde.

Simuleringen skal være et hjelpemiddel for å forstå hvilke måleverdier som er reelle å forvente seg av måleinstrumentene i reguleringsløyfen.

2.2 PLS-program ved bruk av SCL

PLS programmet skal inneholde:

- En modul for avlesning av sensorer
- En modul for beregning av reguleringssystemet
- En modul for styring av doseringspumper
- HMI-skjerm: vise graf over viskositet og hva viskositeten ved forskjellige væskehastigheter er til enhver tid. Vise de tilhørende ønskede verdiene for viskositeten som et referansemål.

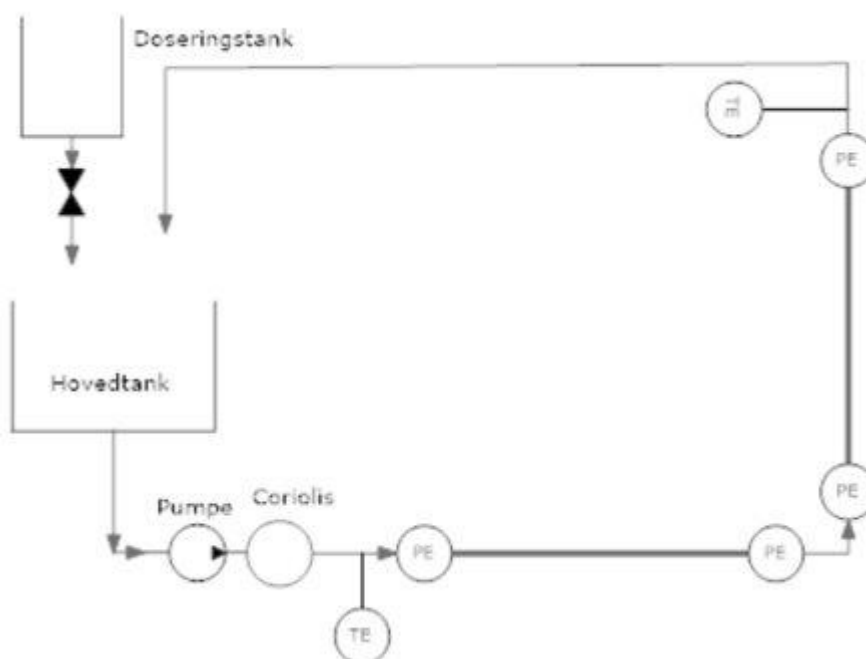
2.3 Mikseanlegg

- Rørene skal tas ut av opprinnelige kasser og monteres på en tralle slik at systemet er enklere å frakte og tar mindre plass. Rørene skal enkelt kunne fjernes fra trallen.
- Dersom simuleringen viser at en rørlengde på 2 meter vil gi gode nok resultater sammenlignet med opprinnelig lengde skal rørlengden reduseres til 2 meter.

3 Analyse av problemet

Det fysiske systemet vi skal arbeide med er utformet og satt sammen av tidligere bachelorstudenter [3]. Systemet består av to rør med en sensor i hver ende – dette for å måle differensialtrykket i hvert av rørene. Det består også av to doseringstanker for tilførsel av fortynnings- og fortykningsmiddel, samt et blandekar. Styringen av doseringstankene foregår ved hjelp av ventiler som styres av en PLS. I tillegg til dette består systemet av en Coriolis-måler for måling av massestrøm sammen med en sentrifugalpumpe.

I illustrasjonen under er det bare avbildet en doseringstank – dette fordi vi begge tankene blir brukt som fortynningsmiddelstank.



Figur 1 - Systemskisse av modellen

Vårt PLS-program skal ved hjelp av målinger fra det opprinnelige systemet regulere tilførsel av fortynnings- og fortykningsmiddel til sirkulasjonssløyfen slik at borevæsken holder ønsket viskositet.

Det er tidligere blitt erfart at både plassering og transportering av den nåværende modulen har vist seg å være komplisert – da lengden til kassen rundt rørene er omtrent 3.5 meter (se Figur 2 - Vertikalt rør bygget inn i kasse) er det svært utfordrende å flytte de. Det er derfor ønskelig å se om det er mulig å utbedre denne modulen ved å korte ned rørlengden til vertikalt og horisontalt rør. Ved hjelp av simulering kan systemet testes med ulike rørlengder. Dersom simuleringene gir nøyaktige nok resultater sammenlignet med målingene for opprinnelig rørlengde er det ønskelig å forkorte rørene.

Dette medfører to mulige løsninger: beholde opprinnelig rørlengde eller forkorte rørlengden.



Figur 2 - Vertikalt rør bygget inn i kasse

3.1 Utforming av mulige løsninger

3.1.1 Løsningsalternativ 1 – opprinnelig rørlengde

Første alternativ går ut på å bruke eksisterende modul slik den er i dag. Det vil bli utformet et PLS-program for automatisk regulering av borevæske og grafisk overvåking på skjerm.

For å kunne utbedre den eksisterende modulen så langt det er mulig, vil vi demontere kapslingen som er bygget rundt rørstykkene. Disse viser seg å være litt for store, og dermed blir vanskelig å håndtere. Rørene vil da monteres på en enkel ramme, med festemateriell som gjør det enkelt å installere dem på resten av modulen, samt raskt kunne tas av for transportering.

3.1.2 Løsningsalternativ 2 – forkortet rørlengde

Andre alternativ går også ut på å utforme et PLS-program for automatisk regulering av borevæske og grafisk overvåking på skjerm.

Dersom simulering gir de rette resultatene vil vi forkorte rørene. I tillegg, slik som i første alternativ, vil rørene bli montert direkte på en ramme med effektiv og enkel festeanordning for montering og transportering.

3.1.3 Vurderinger i forhold til verktøy og HW/SW komponenter

PLS-programmet skal programmeres i TIA portal ved hjelp av Simens SCL (Structured Control Language). Det skal også tas i bruk en HMI skjerm for grafisk overvåking av systemet, samt vise brukeren hvilken viskositet væsken har til enhver tid. Dette er en programvare og et programmeringsspråk vi er kjent med – dermed trenger vi ikke beregne tid for opplæring.

Simulink i Matlab er et program som kan være til dels enklere å lage simuleringen i da det vil være enklere å teste programmet underveis. Det viser seg at det vil være enkelt å implementere dette i TIA-portal når simuleringen er ferdig, ulempen kan være at PLSen kjører i sanntid mens Matlab kan kjøre raskere enn sanntid. Simulink er en programutvidelse i Matlab vi ikke har noe brukererfaring med – dermed må vi beregne tid for opplæring hvis vi velger å lage simuleringen der.

Det kan være effektivt å gjennomføre simuleringer i SCL-kode istedenfor Matlab, siden vi allerede kjenner SCL-språket. Grafer og simuleringer kan kopieres fra PC-skjermbilder og inn i rapporten.

3.2 Konklusjon

Simulatoren ble til slutt besluttet å sette opp i TIA Portal V15. Den var ment å skulle simulere systemet for den fysiske modulen som var bygget for prosjektet. Det ble laget to versjoner av simulatorene. Hvordan disse fungerer kan en lese om under *Appendiks B - Simulering av prosessen*. Når simulatoren var ferdigutviklet og klar for testing ble det tastet inn reelle måleverdier fra oppdragsgiver for å sjekke om simulatoren ga ut de gitte resultatene. Når dette var bekreftet kunne testmålingene starte.

Målet med målingene var å kunne sjekke hvilken påvirkning det ville ha på målingene dersom rørens lengde ble endret fra 2.5 meter til 2.0 meter. De fullstendige resultatene for målingene finnes under *Appendiks B 8Appendiks B - B.3 Resultater fra simulator*

Resultatene på målingene ble undersøkt med hensyn på hvor stort avvik tettheten beregnet av differensialtrykket hadde i forhold til oppgitt tetthet. Det ble også foretatt beregninger der differensialtrykkene hadde et måleavvik på +/- 1%. Dette for å kunne se hva tettheten da ville være.

Ved vurdering av tetthetens verdier viser det seg at den har et avvik på 0.0001-0.0003 dersom det er lagt til et måleavvik på differensialtrykkene. Etter samtaler med veileder ble det ut ifra resultatene bestemt at det å redusere rørlengden til 2.0 meter ikke ville påvirke målenøyaktigheten til systemet. Vi konkluderte derfor med å redusere rørlengden fra 2.5 til 2.0 meter.

4 Realisering av valgt løsning

Ut ifra simulators testresultater og konklusjonen over ble det bestemt, i samsvar med oppdragsgiver, at lengden for rørstykkene skulle kortes ned. Dette setter starten for arbeidet med modulen.

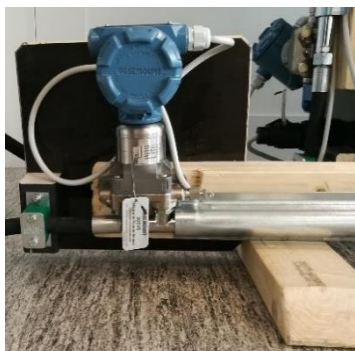
På grunn av plassmangel på bygget ble det utfordrende å få plass nok til å kunne demontere og montere rørstykkene. Til å begynne med har arbeidet med simulatorene foregått på automasjonslabben, og det var her modulen også til slutt fikk stå, kun midlertidig vel å merke da den tok mye plass. På grunn av kassenes utforming og lengde gjorde det at røret som skulle stå vertikalt ikke fikk plass med den takhøyden som var i rommet, og generelt for de fleste rommene i bygget. Det har tidligere vært behov for å ta ned himlingsplater for at røret skal få stå i rett stilling slik at modulen kan kjøres. Dette ble ikke godt tatt imot av statsbygg som er ansvarlige for bygget, som mener at himlingsplatene ikke skal fjernes samt at det er fare for at røranlegg eller sprinklersystem kan komme til skade. Det ble derfor nødvendig å finne et alternativt rom for å få utført arbeidet. Det endte tilsatt med at Lars Ekroll, som har hovedansvaret for elkraft-labben, valgte å stille elkraft-labben til disposisjon, hvor det også var god tilgang på nødvendig verktøy. Han har vært svært behjelpelig gjennom hele arbeidet som er utført i forbindelse med oppgaven, både med nødvendig utstyr men også med svært nyttig kunnskap og lærdom relatert til vårt arbeid.

Med plass til å arbeide på, og utstyr tilgjengelig, er demontering av kassene første steg i ombyggingsprosessen. Så fort rørene er ute av kassene blir det gjort en vurdering av rørkoblingene. I samråd med Lars Ekroll, Overingeniør ved elektroinstituttet, viser det seg å være svakheter og mangler ved koblingene. Det er brukt koblinger og tettinger for flere ulike typer metaller og bruksområder. Det er blant annet brukt klemringer beregnet for kopper til røret i systemet som er av stål. Rørene som er laget i stål kunne også med stor fordel ha vært produsert i rustfritt materiale, da det viser seg at det er en del rust på hele innsiden av rørene. Det er også brukt hydraulikkslanger i sammenkoblingene mellom rørene, i tillegg til mellom modulen og rørene. Det finnes ingen begrunnelse eller referanser til hvorfor det er blitt brukt slanger som skal kunne holde et trykk på opptil 350Bar. Siden det ikke foreligger en grunn til at disse er blitt valgt velger vi å ikke bytte dem ut, da det kan ha en innvirkning på trykkmålingene.



Figur 3 - Demontering av kasser for rørstykkene

Omtrent alle rørkoblingene ble gjort om – unødvendige rørstusser ble fjernet og erstattet med de nødvendige koblingsdelene. Som følge av dette vil lengden på systemet bli kortet ned enda litt mer. Færre koblinger gir også et sterkere system, samt minker sannsynlighetene for at lekkasjer kan oppstå. Ved god veiledning fra Lars Ekroll ble det montert korrekte koblinger tilpasset systemet for å sikre et tett system. Når alle koblinger var på plass kunne rørene kuttet ned til 2 meter. Dette ble utført ved hjelp av en rørkutter.



Figur 4 - Festeordning for trykktransmitter

Det er laget løsninger for montering av rørene til trallen under transport, samt løsning for montering av rørene når systemet kjøres. Rørene er montert på en lekter i tre og skjermet med et beslag for å beskytte dem mot slag og andre ytre påvirkninger. I hver ende av lekteren er det montert en finerplate som støtter og skjermer trykktransmitterne og temperatur-følerne.

Systemet krever at et av rørene står oppreist i vertikal retning og det andre må ligge horisontalt. Derfor er det montert en festeordning på den vertikale delen slik at den kan henges direkte på vognen ved hjelp av stigen på kortsiden. Den horisontale delen plasseres på gulvet med to støtter til å holde den stødig med trykk-transmitterne oppreist avbildet på **Feil! Fant ikke referanseilden..** For transport er det montert to hekter på hver av kortsidene til trallen, her skal det horisontale røret plasseres i. Når modulen er parkert og klar for å kjøres kan disse hektene vippes inn så de ikke stikker ut og er til hinder for de som er i nærheten.

Når dette er på plass gjenstår den elektriske delen av systemet. Det er montert et styreskap hvor all strømforsyning og signalstyring til systemets komponenter foregår, men det forela ingen dokumentasjon for koblingene. Det er ikke klart om dette er levert inn med tidligere oppgaver, da det ikke finnes et godt nok system for håndtering av vedlegg fra tidligere bacheloroppgaver. Det ble derfor nødvendig å gå over hele ledningsnett for å kunne lokalisere hvilke komponenter som var koblet til hva, for å i det hele tatt kunne få en oversikt over hvordan systemet henger sammen. Det var montert koblingsplugger til kassene, som var montert rundt rørene. Her ble det nødvendig å bruke en motstandsmåler for å kontrollere hvilke komponenter som var koblet til hvilke rekkeklemmer i styringskapet. Her burde det også vært en bedre ordning for tilkoblingen da ledningene henger løst og ubeskyttet på baksiden av pluggen.



Figur 5 - Komplette modul etter ombygging

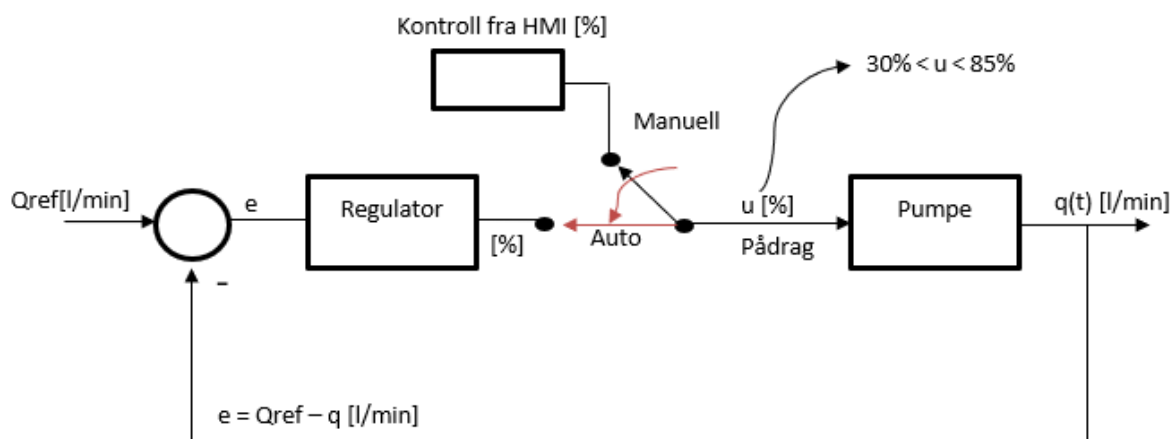
Hele ledningsnett ble gjennomgått ledning for ledning for å kunne lokalisere alle sammenkoblingene.

5 Testing

Det vil først bli foretatt flere tester av systemet slik at en til slutt kan konstatere regulatorparameterne til en PI-regulator. Deretter vil den ferdig utledede reguleringsalgoritmen presenteres. Til slutt vil resultater etter implementert reguleringsalgoritme presenteres.

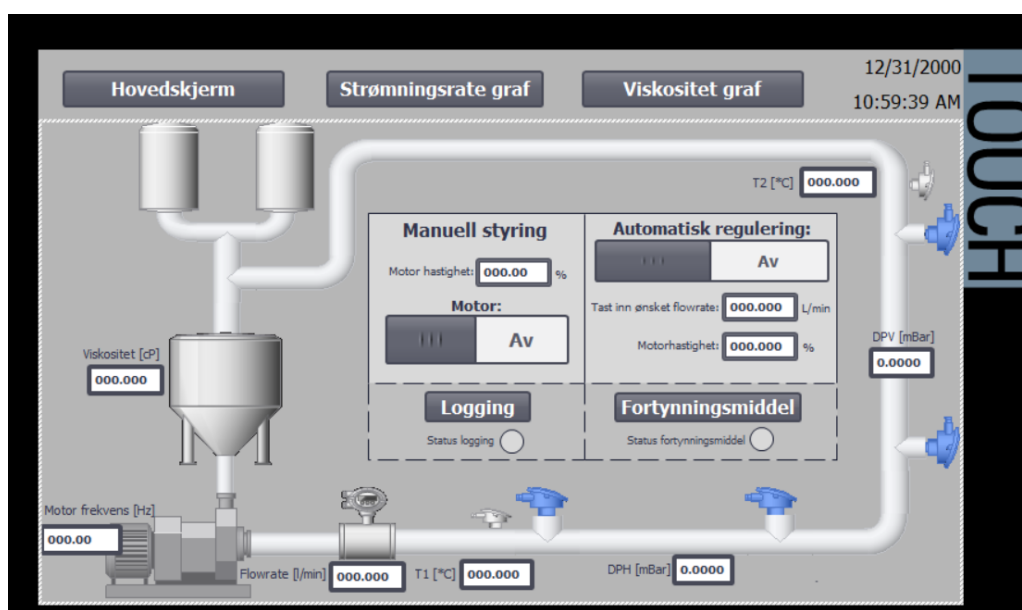
5.1 Testing av systemet for å finne regulatorparametre til PI regulator

Før man kan utarbeide en reguleringsalgoritme må man foreta gjentakende tester av systemet. For å vite hvilke komponenter det er ønskelig å studere resultatene til er det nødvendig å tegne opp et blokkdiagram som inneholder de komponentene som skal ta del i reguleringen.



Figur 6 - Blokkdiagram over reguleringsløyfen

Blokkdiagrammet ble tegnet i samarbeid med veileder. Det skulle være mulig å kjøre systemet manuelt og automatisk. Dersom systemet skal kjøres manuelt skal pumpen startes ved hjelp av et inntastet pådrag (se Figur 7). Pådragene som ble påført systemet under denne testingen lå mellom 30%-85%. Disse grensene ble valgt fordi pumpen trenger et pådrag på 30% for å kunne starte, i tillegg til dette er det ikke er ønskelig å regulere pumpen på maks (100%) da reguleringen der ikke vil være like god.



Figur 7 - HMI hovedskjerm

Ut ifra blokkdiagrammet (Figur 6) ser en at det er flowraten [l/min] som skal reguleres. For å se hvordan flowraten endret seg med økende pådrag ble det implementert en mulighet for å logge til CSV-fil. Dette ble gjort ved å opprette historical data i HMI-panelet. Når HMI-panelet var ferdig utviklet startet den videre testingen av systemet.

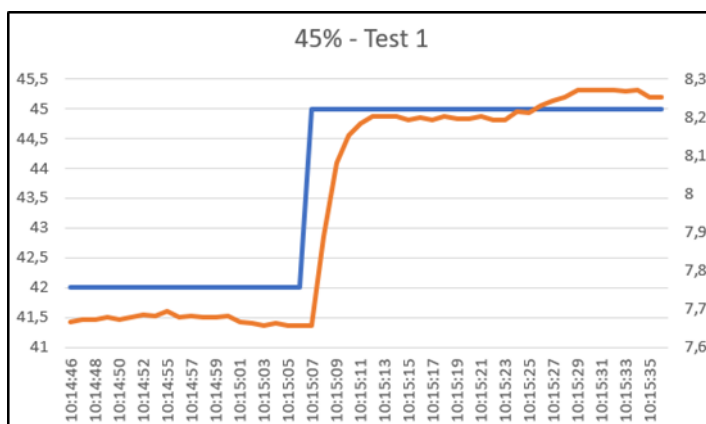
Underveis i testingen ble det oppdaget at forholdet mellom trykket i det vertikale og i det horisontale røret økte med flowraten – dette stemte ikke da forholdet mellom differensialtrykkene skal være omtrent lik uansett flowrate. Vi måtte derfor starte feilsøking før den videre testingen av programmet kunne fortsette. Vi startet med å sjekke om kablene på innsiden av sensorene var løse – dette fordi det var et problem som tidligere var møtt på. Det viste seg alt var slik det skulle. Vi foretok deretter en testkjøring av systemet med begge rørene liggende horisontalt. Dersom begge to rørene ligger horisontalt og det ikke er noe strømning i rørene skal i teorien trykket i begge rørene vise 0 bar – noe det gjorde. Deretter ble systemet kjørt opp til full flow – ved full flow skal i teorien differensialtrykkene være lik i begge rørene, men i vårt tilfelle var trykket i det vertikale røret omtrent to ganger større enn trykket i det horisontale røret. Vi tenkte da at sensorene burde vært kalibrert. I påvente av svar fra skolen og oppdragsgiver om de hadde HART kalibreringsverktøy tilgjengelig startet vi med å regne vi oss frem til et forholdstall. Utregningen av forholdstallet ble utført ved å kjøre systemet opp til full flow, differensialtrykket på det horisontale og det vertikale røret ble så notert. Deretter ble trykket i det vertikale røret delt på trykket i det horisontale. Forholdstallet mellom disse ble 1.85. Trykket i det vertikale var altså 1.85 ganger større enn trykket i det horisontale røret. For å sjekke om forholdstallet stemte ved alle pådragene ble det implementert i programmet. Etter flere tester viste det seg at forholdet mellom trykkene nå var slik det skulle uansett flow. Det var en del tvil rundt det at trykket i det vertikale røret var 1.85 ganger større enn i det horisontale, men etter samtaler med oppdragsgiver ble vi enige om å bruke dette forholdstallet da verken skolen eller oppdragsgiver hadde HART kalibreringsverktøy.

Et annet uforutsett problem vi møtte på under testing var at viskositeten i systemet økte med flowraten. Dersom vi hadde hatt en ikke-newtonsk væske i blandingstanken hadde det vært riktig at viskositeten skulle øke med flowraten – men siden blandingstanken besto av en newtonsk væske (i vårt tilfelle vann) der viskositeten skulle være den samme uansett flowrate stemte ikke dette. Etter mye feilsøking alene og med oppdragsgiver fant vi ut at det var feil å anta at vi alltid hadde laminær strømning i systemet, da det også vil oppstå turbulent strømning. CDT har utviklet en måte å kunne skille mellom laminær og turbulent strømning, selv i transition området (for mer info om dette se *appendiks A – strømningslære*). Siden denne teknologien er hemmelig for offentligheten og vi ikke kunne benytte den fikk vi i starten av prosjektet beskjed om å anta at vi alltid hadde laminær strømning. Etter å ha studert resultater fra Excel (se *Appendiks E*) og simuleringen i TIA-portal fant vi ut at det vil være et turbulent strømningsmønster i røret dersom vann kjøres gjennom systemet. Dette fordi den indre diameteren på rørene var mye mindre enn først antatt. Sett ut fra denne formelen, $Re = \frac{\rho \cdot Q \cdot D}{\mu \cdot A}$, ser man at diameteren påvirker Reynoldstallet. Dersom $Re < 2300$ er strømningen laminær, dersom $Re > 3000$ er strømningen turbulent, og dersom $2300 < Re < 3000$ er strømningen i transition området - vi kan her ikke vite om strømningen er laminær eller turbulent.

Etter å ha implementert formel for turbulent strømning til systemet holdt viskositeten seg nå konstant uansett flowrate.

Når alle måleverdiene var under kontroll kunne den videre testingen av systemet starte. Det ble foretatt flere tester som alle ble logget til fil. Resultatene ble studert og etter samtaler med veileder ble vi enig om å ta gjennomsnittet av to tester for å konstatere forsterkning, tidsforsinkelse og tidskonstant til hvert pådrag – dette fordi testene som ble tatt ga såpass like resultater. Dersom det hadde vært større forskjell mellom testene ville det vært behov å ta gjennomsnittet av flere tester.

Til høyre er et eksempel på hvordan grafene ble sende ut etter at flowrate og pådrag ble plottet. Pådraget er den blå grafen – som i dette tilfelle økte fra 42% til 45%. Flowraten er den oransje grafen. Ut ifra grafene ble det lest av verdier som til slutt kunne fastslå forsterkning, tidskonstant og tidsforsinkelse til systemet for hvert av pådragene. Hvordan dette arbeidet ble utført kan en lese om under 8C.5 Plottet flowrate og pådrag. De oppsummerte resultatene er:



Figur 8 - Graf over måleresultater ved 45% pådrag

| U (%) | k (Forsterkning) | T (Tidskonstant) | τ (Tidsforsinkelse) |
|-------|------------------|------------------|--------------------------|
| 30 | 0,17595563 | 2 | 4 |
| 35 | 0,19743981 | 3 | 1 |
| 40 | 0,18724771 | 2 | 2 |
| 42 | 0,18368603 | 2 | 1.5 |
| 45 | 0,18312634 | 3 | 1.5 |
| 50 | 0,18708015 | 2 | 1 |
| 61 | 0,17796118 | 2 | 1.5 |
| 74 | 0,14048639 | 2.5 | 1 |
| 85 | 0,09939677 | 2.5 | 1.5 |

Tabell 1 - Oversikt over forsterkning, tidskonstant og tidsforsinkelse

Når resultatene ovenfor var ferdig beregnet kunne beregningen av regulatorparameterne starte. Etter samtaler med oppdragsgiver og veileder ble det bestemt at systemet skulle bruke en PI-regulator.

Regulatorparameterne for PI-regulator ble beregnet både ved hjelp av Ziegler-Nichols tabell og Cohen Coon tabell.

5.1.1 Regulatorparametre ved hjelp av Ziegler Nichols tabell

Forsterkning, tidskonstant og tidsforsinkelse for hvert av pådragene ble satt inn i regulatorparameterne for PI-regulator. For mer detaljer knyttet til utregning av Ziegler Nichols regulatorparameterne se under 8C.6 Regulatorparametre - Ziegler Nichols. Resultatet er presentert under.

| | K_p | T_r | T_d |
|---|--------------------------|-------|-------|
| P | $\frac{T}{K \cdot \tau}$ | | |

| | | | |
|-----|------------------------------------|---------|-----------|
| PI | $\frac{0.9 \cdot T}{K \cdot \tau}$ | 3τ | |
| PID | $\frac{1.2 \cdot T}{K \cdot \tau}$ | 2τ | 0.5τ |

Tabell 2 - Ziegler Nichols tabell

| U [%] | K_p | T_r |
|-------|----------|-------|
| 30 | 2.55746 | 12 |
| 35 | 13.67505 | 3 |
| 40 | 4.80646 | 6 |
| 42 | 6.53288 | 4.5 |
| 45 | 9.82927 | 4.5 |
| 50 | 9.62154 | 3 |
| 61 | 6.74304 | 4.5 |
| 74 | 16.01578 | 3 |
| 85 | 15.09103 | 4.5 |

Tabell 3 - Oppsummert oversikt over Ziegler Nichols regulatorparametre

5.1.2 Regulatorparametre ved hjelp av Cohen Coon

Forsterkning, tidskonstant og tidsforsinkelse for hvert av pådragene ble satt inn i regulatorparameterne for PI-regulator. For mer detaljer knyttet til utregning av Cohen Coon regulatorparameterne se under 8C.7 Regulatorparametre – Cohen Coon. Resultatet er presentert under.

| | K_p | T_r | T_d |
|-----|---|--|---------------------------------------|
| P | $\frac{v_0}{K_0 \cdot \tau_0} \left[1 + \frac{\tau_0}{3v_0} \right]$ | | |
| PI | $\frac{v_0}{K_0 \cdot \tau_0} \left[0.9 + \frac{\tau_0}{12v_0} \right]$ | $\frac{\tau_0 [30v_0 + 3\tau_0]}{9v_0 + 20\tau_0}$ | |
| PID | $\frac{v_0}{K_0 \cdot \tau_0} \left[\frac{4}{3} + \frac{\tau_0}{4v_0} \right]$ | $\frac{\tau_0 [32v_0 + 6\tau_0]}{13v_0 + 8\tau_0}$ | $\frac{4\tau_0 v_0}{11v_0 + 2\tau_0}$ |

Tabell 4 - Cohen Coon tabell

| U [%] | K_p | T_r |
|-------|----------|---------|
| 30 | 3.03106 | 2.93877 |
| 35 | 1.94151 | 1.97872 |
| 40 | 5.25151 | 2.27586 |
| 42 | 6.98655 | 2.01562 |
| 45 | 10.28433 | 2.48684 |
| 50 | 10.06698 | 1.65789 |
| 61 | 7.21131 | 2.01562 |
| 74 | 16.60896 | 1.83529 |
| 85 | 15.92942 | 1.51428 |

Tabell 5 - Oppsummert oversikt over Cohen Coon regulatorparametre

5.1.3 Implementering av PID reguleringsalgoritme

Etter at regulatorparameterne var beregnet var neste steg å sette opp en algoritme for PI-regulatoren samt implementere koden i programmet. Veileder kom med et ønske om å implementere algoritmen til en PID-regulator istedenfor da mulighetene var større dersom det var ønskelig å bruke systemet i undervisningssammenheng. I vårt tilfelle vil derivatdelen settes lik 0 som følge av at vi bare ønsker en PI-regulator.

Når arbeidet med implementering av reguleringsalgoritmen startet begynte vi å stille spørsmål. Ettersom vi aldri har laget en reguleringsalgoritme før trodde vi at fremgangsmåten vi nå hadde benyttet ville resultere i en regulering for tilsetning av fortykningsmiddel. Det viste seg at dette ikke var tilfelle, og at det hadde vært en misforståelse mellom oss og veileder.

Veileder hadde hele tiden vært klar over at det ikke var teoretisk mulig å regulere viskositeten i tanken slik modulen er bygget nå. Dersom det hadde fantes nivåmålere tankene for fortykning- og fortykningsmiddel, samt at begge tankene gikk hver for seg ned i blandingstanken og ikke møttes på midten slik de gjør nå (se Figur 9) hadde det vært mulig å lage en reguleringsalgoritme for tilsetning av fortykning- og fortykningsmiddel. Grunnen til at det ikke er mulig slik modulen er bygget nå er fordi man ikke kan vite hvor mye fortykningsmiddel som blir tilsatt til sirkulasjonssløyfen. Systemet vårt består bare av en av og på ventil for regulering av tilsetning av fortykningsmiddel. Når ventilen åpnes har vi ingen mål på hvor mye middel som tilsettes. Hvor mye middel som tilsettes innenfor et tidsrom kan en heller ikke regne seg frem til da dette avhenger hvor fulle tankene er under reguleringen. Dersom tanken er full går det mer middel til sirkulasjonssløyfene enn dersom det er lite fortykningsmiddel i tanken. Veileder har hele veien gått ut i fra at dette ikke er oppnåelig og at vi derfor skal regulere flowraten til systemet. Dette resulterer i at den implementerte reguleringsalgoritmen vil være en annen enn hva oppgaven egentlig tilsa.



Figur 9 - Fortyknings- og fortykningsmiddel tank

Resultatet av reguleringsalgoritmen er presentert under. Dersom en ønsker å se utledningen av den diskretiserte PID-reguleringsalgoritmen finner en dette under *Appendiks C.8 – Utledning av reguleringsalgoritme*.

Diskretisert PID algoritme [8]

$$e_k = r_k - y_k$$

$$e_{fk} = \frac{1}{\left(\frac{T}{T_f}\right)+1} \cdot e_{fk-1} + \frac{\left(\frac{T}{T_f}\right)}{\left(\frac{T}{T_f}\right)+1} \cdot e_k$$

$$u_k = u_{k-1} + K_R \cdot (e_k - e_{k-1}) + \frac{K_R \cdot T}{T_i} \cdot e_k + \frac{K_R \cdot T_d}{T} \cdot (e_{fk} - 2 \cdot e_{fk-1} + e_{fk-2})$$

$$\text{Anti wind - up: } u_{\min} < u_k < u_{\max} \rightarrow 30\% < u_k < 85$$

Notasjoner som er blitt benyttet for å utlede den diskrete PID algoritmen:

u_k = prosessens pådrag

u_{k-1} = prosessens forrige pådrag

r_k = prosessens inngang

y_k = prosessens utgang

e_k = prosessens avvik

e_{fk} = prosessens filteravvik (gjelder for derivatleddet)

e_{fk-1} = prosessens forrige filteravvik

e_{fk-2} = filteravviket før e_{fk-1}

T_f = prosessens filtertid

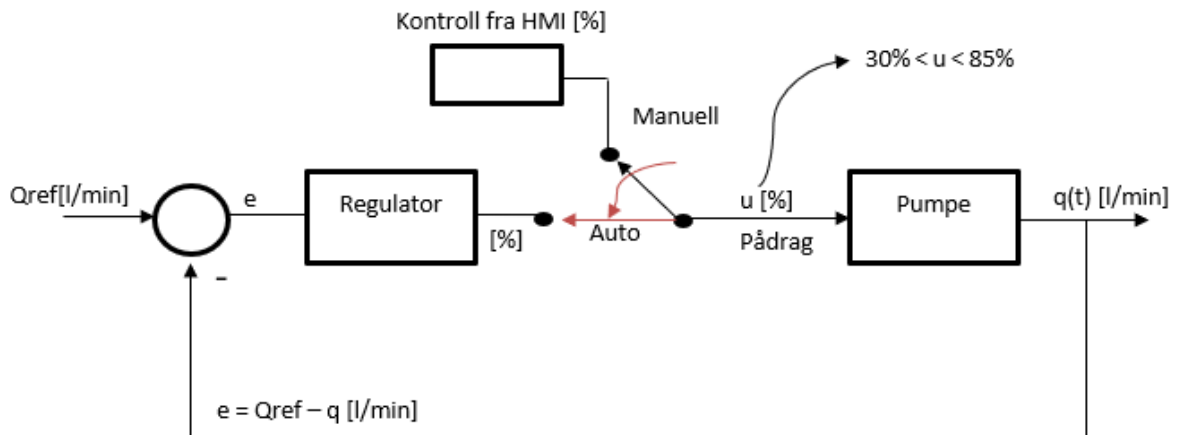
T = regulatorens samplingstid (1 sek hos oss)

T_i = regulatorens integraltid

T_d = regulatorens derivattid

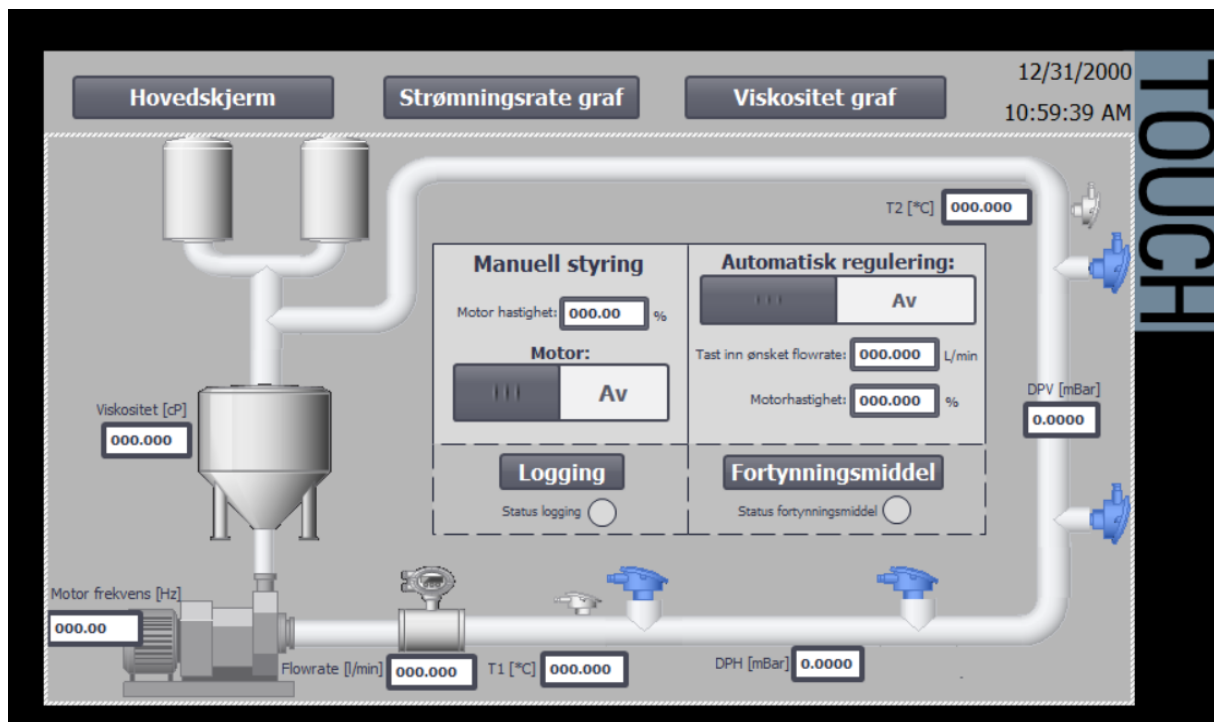
K_R = regulatorens forsterkning

5.2 Testing av implementert reguleringsalgoritme



Figur 10 - Blokkdiagram over reguleringsløyfen

Når reguleringsalgoritmen var ferdig implementert ble det foretatt flere tester for å sjekke om algoritmen fungerte. Testingen ble utført ved å skru på loggingen og starte systemet ved et ønsket pådrag. Når systemet hadde kjørt et par minutter ved ønsket pådrag ble nåværende flowrate notert, og tastet inn for ønsket flowrate. Deretter ble det skrudd over fra manuell til automatisk regulering.

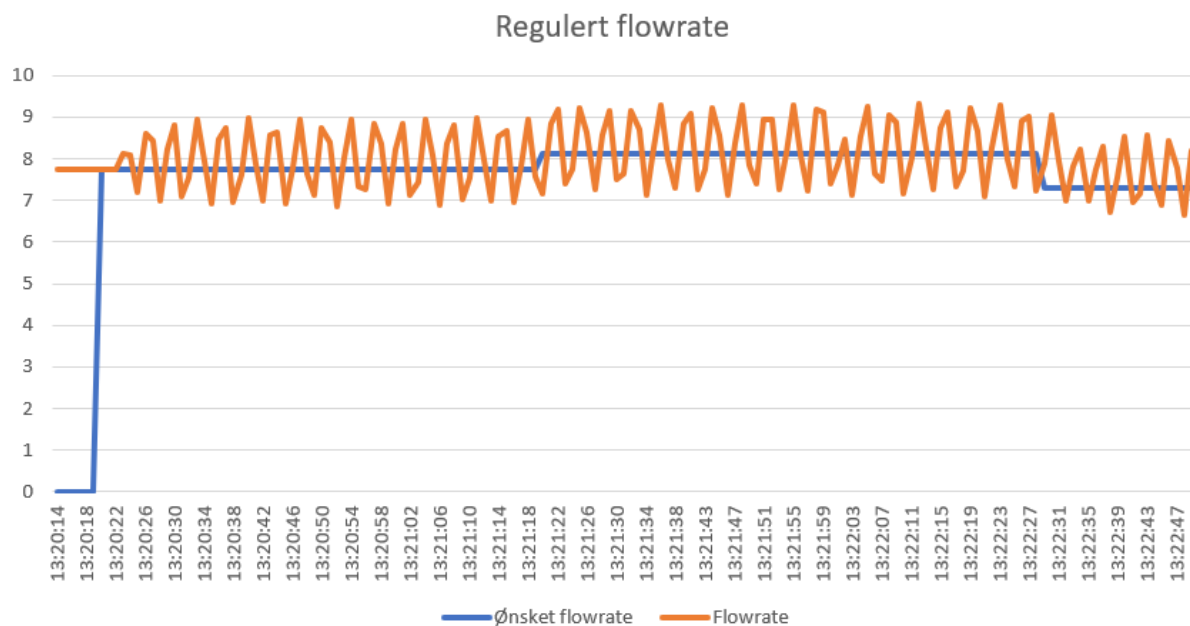


Figur 11 - HMI - Pictorial diagram

Siden vi møtte på flere uforutsette hendelser underveis i testingen har vi ikke fått tid til å teste regulatorparameterne for både Ziegler Nichols og Cohen Coon på systemet vårt. Vi har derfor sammen med veileder valgt å gå for regulatorparameterne til Ziegler Nichols, og har valgt 45% pådrag som vårt arbeidspunkt. Dette gir en integrasjonstid på: 4.5 sekunder, og en regulatorforsterkning: 9.82927.

5.2.1 Test 1: Test av systemet med implementert reguleringsalgoritme

Pådraget ble satt til 45% da det var dette vi hadde valgt som vårt arbeidspunkt. Flowraten systemet ga ved 45% pådrag ble notert, og tastet inn for ønsket flowrate som forklart ovenfor. Deretter ble den automatiske reguleringen skrudd på. Etter at systemet hadde regulert rundt arbeidspunktet en stund økte vi flowraten med 5% av arbeidspunktet for å se hvordan reguleringen ville fungere da, før vi så minket flowraten med 10% av arbeidspunktet. Resultater ble som følger:



Figur 12 - Resultat test 1 - implementert reguleringsalgoritme

Som en kan se er det en del oscillasjoner rundt den ønskede flowraten disse oscillasjonene er støy, og de reduseres med tiden, men hvor lenge systemet må kjøre for å ikke ha noen oscillasjoner kan være alt fra minutter, til timer og dager. En annen faktor som kan spille inn på at oscillasjonene ser slik ut som de gjør er at det ved bruk av logging funksjonen i HMI-panelet bare er mulig å logge hvert sekund, dersom målingene ble tatt oftere ville det vært bedre nøyaktighet, men i samråd med veileder ble det bestemt av reguleringen og målingene er nøyaktig nok.

5.2.2 Test 2 - Test av systemet med implementert reguleringsalgoritme

I denne testen gjorde vi det samme som i test 2, men her ble det gjort flere reguleringer med +/- 5-10% fra arbeidspunktet. Det var ønskelig å foreta en test som skulle være seende slik ut:



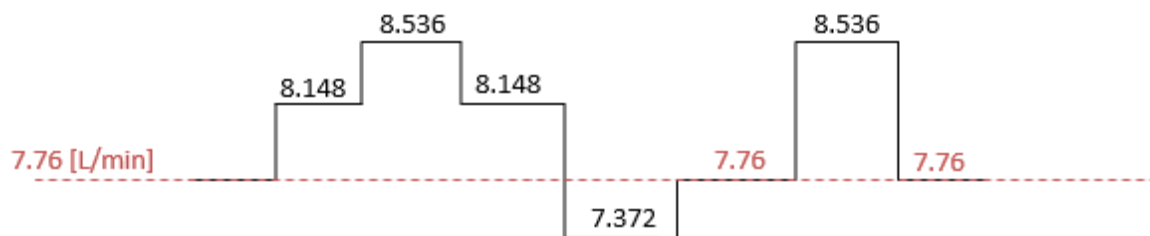
Figur 13 - Ønsket reguleringstest

Systemet ble manuelt startet med et pådrag på 45%. Når systemet hadde kjørt noen minutter ved dette pådraget ble flowraten notert. Flowraten var 7.76 L/min - dette ble da vårt arbeidspunkt.

5% av 7.76 L/min er 0.388 L/min

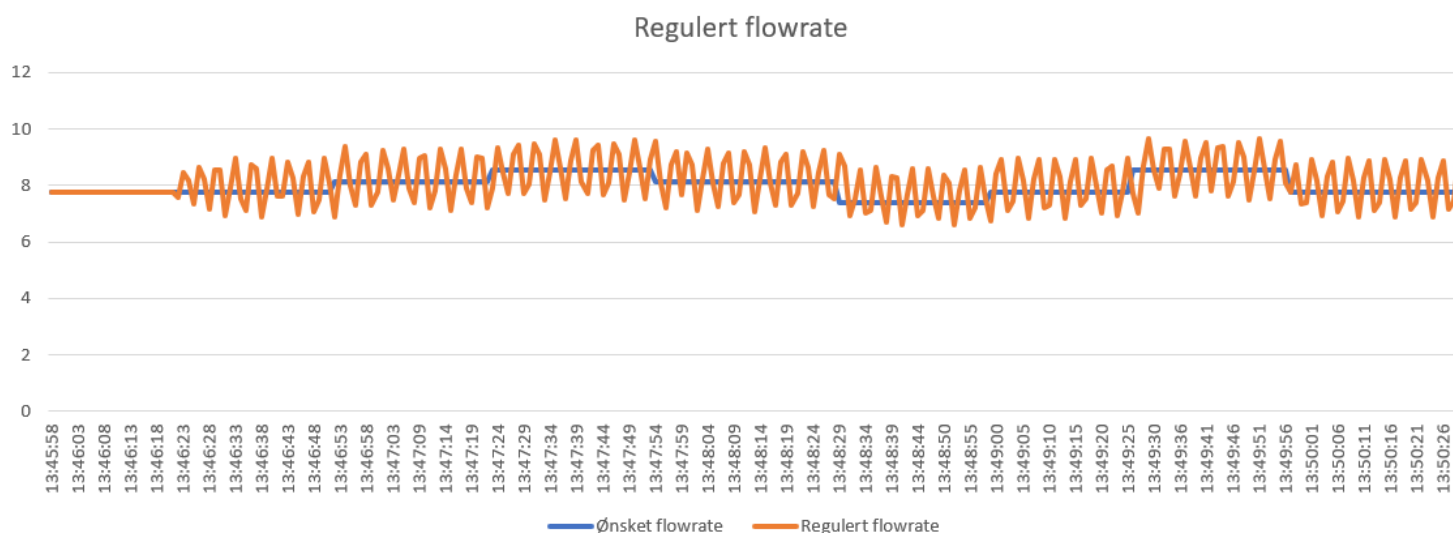
10% av 7.76 L/min er 0.776 L/min

Da blir testen en ønsker å utføre slik som dette her:



Figur 14 - Ønsket reguleringsstest med tilhørende flowrate

Man starter reguleringen med å sette ønsket flowrate lik arbeidspunktet, etter å ha kjørt systemet en stund med denne flowraten økes flowraten 5% fra arbeidspunktet noe som gir en flowrate på 8.148 L/min før den igjen økes 5% til. Dette gir en flowrate på 8.536 L/min. Slik fortsetter endringen av den ønskede flowraten. Resultatet av testen ble seende slik ut

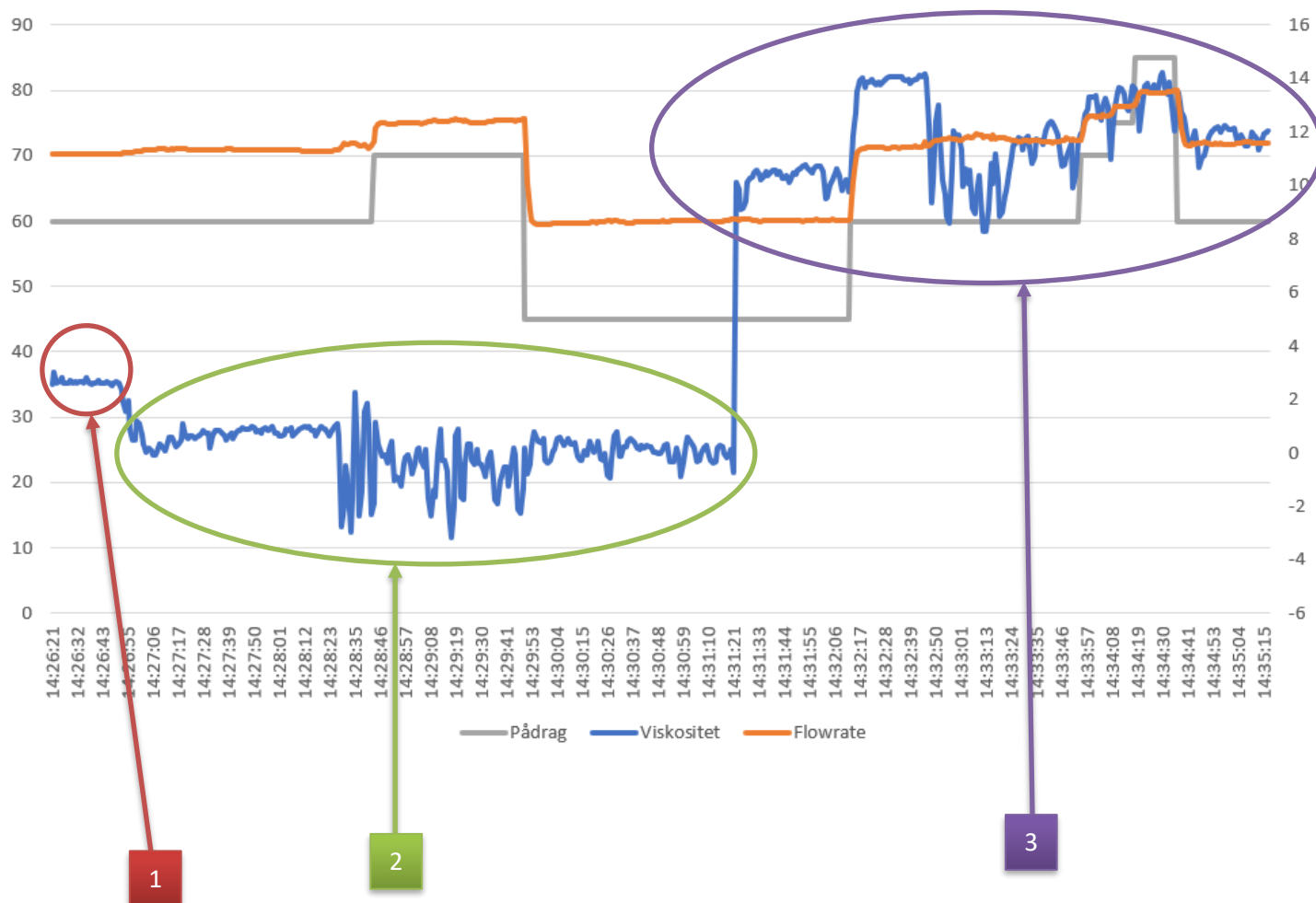


Figur 15 - Resultat test 2 - implementert reguleringsalgoritme

Som man kan se på dette resultatet er det også her en del oscillasjoner – grunnen til disse er de samme som er presentert i 5.2.1.

5.3 Test av systemet ved tilsetning av Xanthan Gum

Endringen til viskositet under tilsetning av fortykningsmiddel



Figur 16 - Graf for oversikt over prosessen når fortykningsmiddel ble tilsatt

Alle testene frem til nå har blitt foretatt med vann i tanken. I denne delen av testingen vil det bli tilsatt fortykningsmiddel – altså Xanthan Gum. Grafen ovenfor er et bilde på hva som skjedde når fortykningsmiddelet ble tilsatt.

- 1) Her er ikke fortykningsmiddelet tilsatt ennå. En kan se at viskositeten ligger rett over 2cP. I teorien er viskositeten til vann 1cP, men siden vannet i vår tank er full i rust da rørene har rustet er det realistisk at viskositeten i væsken er rundt 2cP. Noe annet som kan bygge opp under denne påstanden er at viskositeten til melk er rundt 3cP. En ser her at viskositeten er omtrent konstant. Vann er newtonsk noe som vil si at viskositeten er konstant uansett flowrate. Her er ikke viskositeten testet ved forskjellige flowrater men fra andre tester kan det bekreftes at væsken vi har i tanken er newtonsk – altså at viskositeten ikke endres med flowraten.
- 2) Her ble fortykningsmiddelet tilsatt i tanken. Noe som er litt rart her er at viskositeten minker. Dette skulle i teorien ikke vært mulig. En ser også at viskositeten er negativ, noe som i teorien heller ikke er mulig. Etter feilsøking kom vi frem til at viskositeten vi nå hadde på væsken etter

tilsatt fortykningsmiddel gjorde at systemet vårt nå ville operere i det laminære området. Vi oppdaterte derfor programkoden vår slik at vi nå beregnet reynoldstallet for det laminære regimet i stedet for det turbulente.

- 3) Her var koden ferdig oppdatert. Som en ser økte viskositeten til ca. 11 Cp – dette stemmer greit med mengden fortykkelsesmiddel som ble tilsatt. En kan ved dette punktet se at viskositeten endres med flowraten, og at den for denne testen ligger mellom ca. 9 og 14 cP. Væsken vi nå har i systemet er da såkalt ikke-newtonsk.

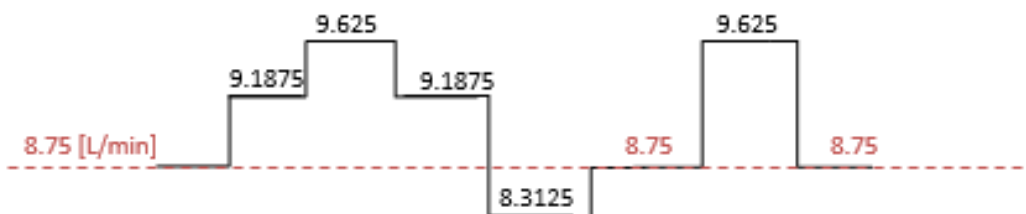
5.3.1 Test med tilsatt fortykningsmiddel

Systemet ble manuelt startet med et pådrag på 45%. Når systemet hadde kjørt noen minutter ved dette pådraget ble flowraten notert. Flowraten var 8.75 L/min - dette ble da vårt arbeidspunkt.

5% av 8.75 L/min er 0.4375 L/min

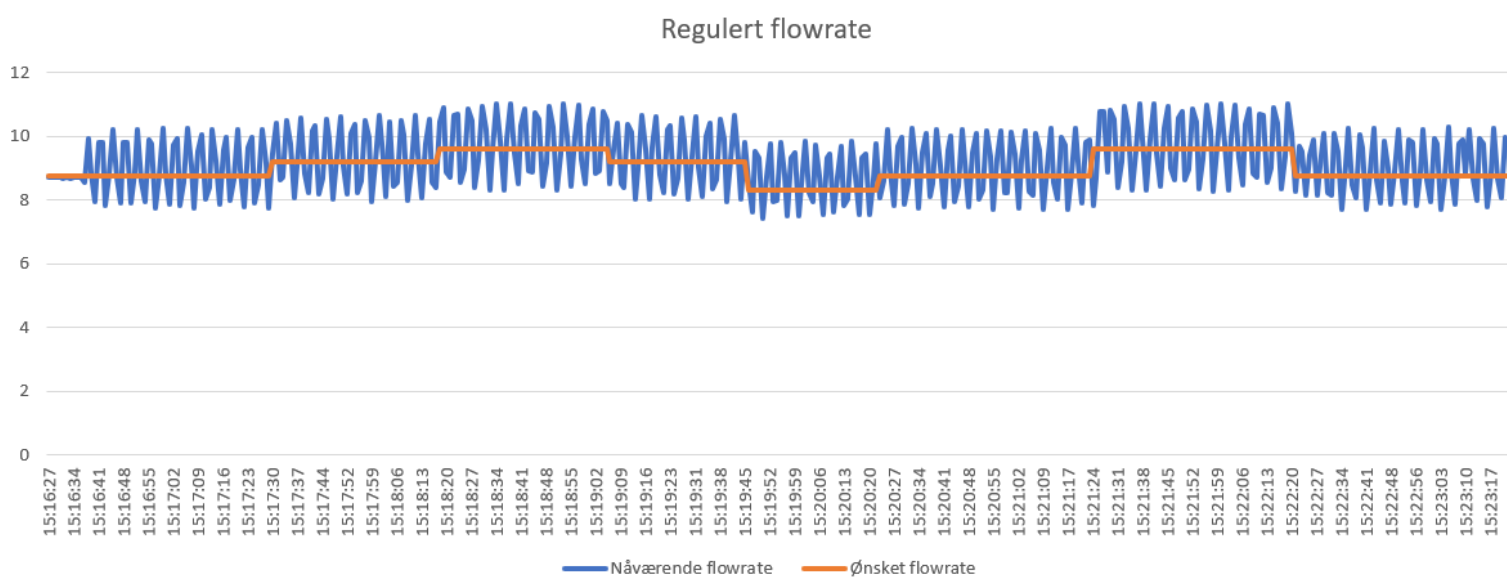
10% av 8.75 L/min er 0.875 L/min

Da blir testen en ønsker å utføre slik som dette her:



Figur 17 - Ønsket reguleringstest med fortykningsmiddel

Resultatene på den utførte testen:



Figur 18 - Resultat av regulering etter tilført fortykningsmiddel

Som en kan se oscillerer den nåværende flowraten rundt den ønskede flowraten. Dersom en sammenligner denne testen med i 5.2.2 ser vi at flowraten er høyere her enn når det bare ble kjørt vann gjennom systemet. Dette skjedde uforventet da vi tenkte at dersom en hadde en tykkere væske så ville flowraten automatisk minke med samme pådrag.

6 Diskusjon

I starten av prosjektperioden ble det satt opp en fremdriftsplan for prosjektet. I løpet av prosjektperioden er det flere tilpasninger som har vært nødvendig i forhold til rammene i opprinnelig plan – dette fordi det oppsto flere problemer enn først antatt. Fremdriftsplanen er lagt ved under G.2 Fremdriftsplan.

Prosjektet startet med å utvikle en simulator for systemet, for å enklere kunne forstå hvordan systemet fungerte. Det ble møtt på ulike problemer knyttet til simulatorene, som for eksempel snuing av formler som skulle brukes i beregningene. Disse problemene ble raskt løst, og simuleringen kom relativt kjapt i boks. Det å starte prosjektet med å lage en simulering for systemet har gitt et stort utbytte underveis i prosjektperioden, i tillegg til en bedre forståelse av oppgaven. Dette fordi man hele tiden har mulighet til å sjekke om målingene man får fra systemet er reelle ved å bruke simulatoren.

Når simuleringen var i boks og det ble konkludert med å redusere rørlengden fra 2.5 meter til 2.0 meter begynte det praktiske arbeidet med rørene. Det praktiske arbeidet burde vært bedre spesifisert i fremdriftsplanen. Det gikk mye tid til arbeidet med rørene da vi ikke satt på rett kunnskap og dermed måtte vente på hjelp og utstyr for å utføre diverse arbeid. Vi måtte også bytte ut en del rørdeler og dermed gikk det mye venting til dette, da deler måtte kjøpes inn. For mer info om det praktiske arbeidet kan en lese under kapittel 4.

Til tross for mye venting knyttet til arbeidet med å redusere rørlengden ble tiden utnyttet bra. Programmet som skulle styre systemet ble laget. Underveis i dette arbeidet ble det oppdaget at det ikke var vedlagt koblingsskjema fra tidligere bachelorstudenter som hadde arbeidet med å utarbeide systemet. Det fantes et utdatert koblingsskjema men dette var ikke mulig å bruke. Vi mener at ett av kravene, dersom bacheloroppgavene går ut på å bygge et system, burde være å legge ved et koblingsskjema – slik at det for andre er mulig å bruke systemet, eventuelt gjøre endringer. Vi hadde dermed ikke noe å gå etter og måtte begynne å gå over systemet for å se hvor hver enkelt ledning gikk. Dette resulterte i en liten oversikt over koblingene som ligger under Appendiks I - *Koblingsskjema*. Det ble også sjekket opp i om oppdragsgiver og veileder hadde tilgang på programfiler fra tidligere bachelorstudenter – men det var ikke mulig å få tak i. Vi kom da på at det var en mulighet for at det siste programmet som var lastet opp til PLSen fortsatt kunne være tilgjengelig. Vi fikk derfor lastet ned programmet som lå på PLSen, men det viste seg at det ikke var mulig å åpne filen da dette var TIA-portal versjon 13 og vi hadde versjon 15. Vi fikk tilslutt lastet ned versjon 13 – her fant vi PLC-tags som også ga oss en oversikt over innganger og utganger til systemet.

Når riktige innganger og utganger var implementert i systemet kunne testingen starte. Etter flere tester ble det oppdaget at trykkene ikke ga ut verdiene de skulle. Når begge rørene ligger på bakken skal begge trykkene vise 0 bar. Det horisontale røret viste 0 bar mens det vertikale (som nå lå horisontalt) viste en altfor høy verdi. Etter mye feilsøking, der vi blant annet skrudde sensorene fra hverandre, fant vi ut at en kabel var løs inne i den ene sensoren. Kabelen ble festet og den videre testingen startet. Sensoren ga nå mer reelle verdier, men forholdet mellom trykket i det horisontale og det vertikale røret var fortsatt ikke slik det skulle være. Dette fikk konsekvenser for både tetthet og viskositet. Etter mye feilsøking, også omtalt i kapittel 5 Testing, klarte vi å regne oss frem til et forholdstall mellom trykkene i rørene slik at forholdet til enhver tid er slik det skal være. Dette mener vi er en uprofesjonell måte å utføre arbeidet på – da en heller burde prøvd å kalibrere sensorene for å se om det ville fikse problemet. Dette var dessverre ikke mulig da verken skolen eller oppdragsgiver hadde HART

kalibreringsverktøy, men siden oppdragsgiver synes det var greit at vi gikk vi for løsningen med forholdstallet da det begynte å minke på tiden gjorde vi det. Når forholdet mellom trykkene nå var slik de skulle fikk vi også rett tetthet i systemet (omtrent 1000 kg/m^3 som er tettheten for vann).

Selv om tettheten og forholdet mellom trykkene nå fungerte var viskositeten 65 ganger større enn det den skulle være, viskositeten viste 65cP og den økte med økende flowrate, mens den egentlig hele tiden skulle vært 1cP da det bare var vann i systemet. Siden vann er en newtonsk væske vil viskositeten ikke endre seg med økende flowrate. Etter mye feilsøking, også omtalt i kapittel 5.1, fant vi ut at siden vi antok laminær flow ville det gi feil viskositet da vi alltid vil ha turbulent flow i vårt system når vann kjøres gjennom. Når vi da fikk fikset opp i dette i programmet fungerte endelig systemet slik det skulle.

Til tross for alle problemene vi har møtt på underveis føler vi at vi har fått et utbytte av dette prosjektet. Vi har fått kjenne på hvordan det er å være en del av et prosjekt, at alt ikke går slik en håper og at det alltid vil dukke ofte opp uforutsette hendelser som gjerne ikke er tatt med i fremdriftsplanen. Vi sitter igjen med mye praktisk kunnskap som vi ikke satt med når vi startet som følge av god hjelp fra Lars Ekroll. I tillegg til dette sitter vi igjen med nye kunnskaper knyttet til hvordan man feilsøker sensorer og hvordan man regulerer et system.

Før vi startet på prosjektet ble det laget en risikoanalyse. Vi skrev ned noen problemer vi tenkte det var mulig å støte på i løpet av prosjektperioden. Ut ifra de fem problemene vi skrev ned kan vi si at vi har møtt på to av dem. I løpet av prosjektperioden har vi møtt på problemet ved at sensorene ikke gir riktig verdier/at sensorene trenger kalibrering. Som nevnt i risikoanalysen er ikke alvoret med dette problemet høy, men konsekvensene kan være at man «taper tid» som i utgangspunktet var tenkt til å bruke på noe annet. Det har vi uten tvil gjort, men til tross for «tapt tid» føler vi at vi har lært mye av de utallige feilsøkingemetodene vi har brukt oppgjennom dette prosjektet. Som nevnt ovenfor ville vi egentlig i starten av prosjektet ha kalibrert sensorene da det er flere år siden de har vært i bruk, men siden det ikke fantes rett utstyr tilgjengelig og dette er dyrt utstyr var dette ikke mulig.

I tillegg til dette punktet fra risikoanalysen vil vi si at vi har møtt på problemet: konflikter innad i gruppen. Vi vil ikke si at vi har møtt på store konflikter men slik som i de fleste gruppeprosjekt vil en før eller siden møte på uenigheter. Dette fordi begge sitter på forskjellige ønsker om mulige løsninger i tillegg til forskjellig kunnskap, men til tross for dette har vi begge vært gode på å respektere andres meninger og ideer. Dette har ført til et godt samarbeid med mye og effektivt arbeid.

7 Konklusjon

I starten av arbeidet var fokuset rettet mot utvikling av en simulator som skulle simulere hvordan systemet fungerte. I tillegg til dette var fokuset rettet mot utvikling av et hovedprogram som skulle styre det fysiske systemet ved å hente inn målinger fra måleinstrumenter og utføre beregninger ved hjelp av disse. Det ble presentert to løsningsalternativer for bacheloroppgaven: første alternativet var å beholde det fysiske systemet slik det var i utgangspunktet – da med en rørlengde på 2.5 meter. Det andre alternativet var å redusere rørlengden på rørene til 2.0 meter. Ved hjelp av å teste måleserier i simuleringen ble det konkludert med at det var mulig å redusere rørlengden til 2.0 meter uten at dette skulle påvirke beregningene negativt. For mer detaljer knyttet til testingen se under 8B.3 Resultater fra simulator .

Når rørlengden var redusert kunne testingen av systemet fungere. Det ble foretatt flere tester for å kunne konstatere forsterkning, tidsforsinkelse og tidskonstant til systemet – dette for å finne regulatorparameterne til regulatoren som skulle implementeres i programmet. Etter å ha funnet parameterne startet testingen med implementert reguleringsalgoritme. Her var det oppstått misforståelser mellom oss og veileder. Det viste seg at det ikke var teoretisk mulig å kunne lage en reguleringsalgoritme for tilsetning av fortyknings- og fortykningsmiddel slik modulen er bygget nå i dag – dette fordi det ikke er mulig å vite hvor mye fortykningsmiddel som blir tilsatt til sirkulasjonssløyfen. For at dette skulle vært mulig må tankene utstyres med nivåmålere, i tillegg til at fortyknings- og fortykningsmiddel tanken må gå hver for seg ned i sirkulasjonssløyfen (Se Figur 9 - Fortyknings- og fortykningsmiddel tank). Veileder hadde kjent til dette fra starten av, og hadde dermed gått ut i fra at vi heller skulle regulere flowraten til systemet. Det var en liten nedtur å få vite dette i starten av mai da det nå ikke var tid nok til å fikse opp i det, men selv om oppgaven tok en vending virker både veileder og oppdragsgiver fornøyd med vår innsats.

Som følge av dette ble det derfor implementert en reguleringsalgoritme for regulering av flowrate. All styringen av systemet foregår via et HMI-panel. Det er her avbildet et pictorial diagram over alle komponentene i systemet med tilhørende måleverdier. I tillegg til dette er det mulig å kjøre systemet manuelt ved å taste inn et ønsket pådrag. Som følge av den implementerte reguleringsalgoritmen er det også mulig regulere flowrate. Det er også blitt implementert en mulighet for å logge til fil slik at målingene fra tester kan studeres nærmere på PC, samt en mulighet for å starte og stoppe tilsetning av fortykningsmiddel dersom en ønsker å redusere viskositeten i væsken. Dersom en ønsker å øke viskositeten til væsken er det en mulighet for å tømme fortykningsmiddel direkte inn til sirkulasjonssløyfen.

Dersom vi hadde hatt mer tid på dette prosjektet ville videre arbeid vært å utstyre tankene med nivåmålere slik at en blant annet vet hvor mye fortyknings- eller fortykningsmiddel som blir tilført sirkulasjonssløyfen. Modellen bør også bygges om slik at fortyknings- og fortykningsmiddel tanken går hver for seg inn til sirkulasjonssløyfen (se Figur 9 - Fortyknings- og fortykningsmiddel tank). Når dette var blitt gjort ville neste steg vært å lage en reguleringsalgoritme for tilsetning av fortyknings- og fortykningsmiddel.

Vi ville også foretatt en kalibrering av trykktransmitterne da forholdet mellom differensialtrykkene i vertikalt og horisontalt rør ikke er optimalt. I tillegg til dette ville vi montert en kapsling bak to av finerplatene for å skjerme ledningene på baksiden av platen. Disse ledningene kommer av to pluggere som er montert da dette er koblingen av sensorer mot opp mot styreskapet.

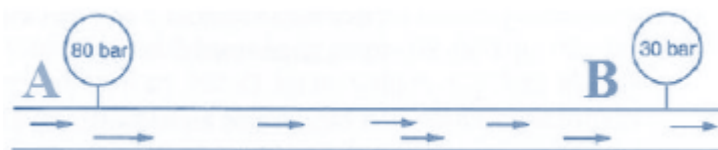
8 Referanser

- [1] C. Aadland, «Uni - Vil varme opp bergen med varme fra jordas indre,» Uni Research CIPR, 13 Juni 2014. [Internett]. Available: <https://uni.no/nb/news/2014/06/13/vil-varme-opp-bergen-med-varme-fra-jordas-indre/>. [Funnet 9 Januar 2019].
- [2] I. Halvorsen, «Uib - Byfjell kan varme bergenserne,» 10 November 2017. [Internett]. Available: <https://www.uib.no/aktuelt/45703/byfjell-kan-varme-bergenserne>. [Funnet 9 Januar 2019].
- [3] T. Melheim, M. Espelid, P. p. Hein og N. Anderson, «BO16E-16,» Bergen, 2016.
- [4] M. P. Kråvik, H. Sætersdal og L. W. Hougaard, «Drilling fluid monitoring during MPD operations,» Morten Pedersen Kråvik, Helge Sætersdal og Lasse Westwang Hougaard., Bergen, 2013.
- [5] E. Cimpan og G. Nygård, «Design and simulation of a small scale experimental facility for drilling».
- [6] Wikipedia, «Moody diagram,» 1 Januar 2012. [Internett]. Available: https://no.wikipedia.org/wiki/Moodys_diagram#/media/File:Moody_EN.svg. [Funnet 2 Mai 2019].
- [7] wikipedia, «Reynoldstall,» 10 feb 2017. [Internett]. Available: <https://no.wikipedia.org/wiki/Reynoldstall>. [Funnet 5 feb 2019].
- [8] E. Cimpan, *Diskret PID-regulator*, Emil Cimpan - HVL.
- [9] Wikipedia, «Geotermi,» 27 April 2017. [Internett]. Available: <https://no.wikipedia.org/wiki/Geotermi>. [Funnet 14 Januar 2019].
- [10] Ungenergi, «Ungenergi - Hva er geotermisk energi,» 18 Juni 2018. [Internett]. Available: <http://ungenergi.no/energikilder/geotermisk-energi/hva-er-geotermisk-energi/>. [Funnet 15 Januar 2019].
- [11] Ungenergi, «Ungenergi - Geotermisk kraft i tiden som kommer,» 28 Oktober 2016. [Internett]. Available: <http://ungenergi.no/energikilder/geotermisk-energi/geotermisk-kraft-i-tiden-som-kommer/>. [Funnet 15 Januar 2019].
- [12] L. V. L. BY-SA), «Borevæskens egenskaper,» 04 07 18. [Internett]. Available: <https://stier.ndla.no/nb/learningpaths/18/step/170>. [Funnet 30 01 2019].
- [13] L. V. L. BY-SA), «Oljebasert borevæske,» Nasjonal Digital LæringsArena, 29 06 2018. [Internett]. Available: <https://stier.ndla.no/nb/learningpaths/17/step/162>. [Funnet 02 05 2019].
- [14] T. A. S. G. K. T. R. B. V. Einar Framnes (Red.), Boreteknologi 1, Bærum: Vett og Viten AS, 1993.

- [16] Wikipedia, «Bernoullis likning,» 13 Juli 2005. [Internett]. Available: https://sv.wikipedia.org/wiki/Bernoullis_ekvation#/media/File:BernoullisLawDerivationDiagram.png. [Funnet 2 Mai 2019].
- [17] Wikipedia, «Illustrasjon over laminær og turbulent strømning i rør,» 30 Oktober 2008. [Internett]. Available: https://no.wikipedia.org/wiki/Reynoldstall#/media/File:Laminar_and_turbulent_flows.svg. [Funnet 2 Mai 2019].
- [18] D. Thormodsæter, K. Rauboti og G. Elgenes, «BO15E-27 AUTOMATISK OVERVÅKING AV BOREVÆSKETILSTAND,» Bergen, 2015.
- [19] NTB scanpix, «Illustrasjon av borevæskemåling,» Science Photo Library, [Internett]. Available: <https://api.ndla.no/image-api/raw/sya6179e.jpg?width=10720>. [Funnet 3 mai 2019].

Appendiks A Strømningslære

For å kunne arbeide med problematikken rundt strømning er det en fordel å kunne litt om teorien knyttet til dette. Dersom en væske med en gitt hastighet sendes gjennom et rør vil trykket i røret minke fra A til B (illustrasjonen er hentet fra Bacheloroppgave 2013 [4]). Trykket vil minke fordi det virker en friksjonskraft mot strømningens retning. Friksjonen påvirkes av væskens egenskaper, deriblant hvilken temperatur væsken utsettes for, hvilken hastighet væsken beveger seg med i røret, og hvilken tetthet og viskositet væsken har. Sist men ikke minst påvirkes friksjonen av hvilket strømningsmønster det er i røret – enten laminært eller turbulent.



Figur 19 – Illustrasjon over hvordan trykk endrer seg i et rør

De fleste av oss kjenner nok til Bernoullis likning. Dette er den mest generelle likningen som brukes for å blant annet regne ut differensialtrykket i et rør.

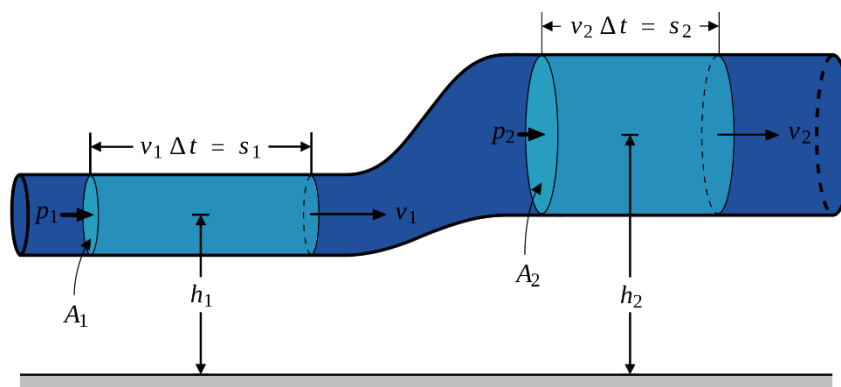
Bernoullis likning:

$$P_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

Differensialtrykket:

$$P_1 - P_2 = \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 - \rho gh_1 - \frac{1}{2}\rho v_1^2$$

P_1, P_2 = Trykket i hvert av punktene
 v_1, v_2 = Hastighet til væsken i hvert av punktene
 h_1, h_2 = Høyden relativ til hverandre/et bakkenivå
 ρ = Tettheten til væsken
 g = Tyngdeakselerasjon



Figur 20 – Bernoullis likning – Illustrasjon er hentet fra wikipedia [16]

Formelen under er en annen variant av Bernoullis likning. Her regnes friksjonsarbeidet til en væske, ved hjelp av forholdet mellom den kinetiske og den potensielle energien, samt trykkene [4].

$$-h_f = P_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 - P_1 - \rho gh_1 - \frac{1}{2}\rho v_1^2 \quad | \quad h_f = \text{«Head loss» friction}$$

Til tross for at Bernoullis likning er en av de mest generelle likningene som blir brukt er den ikke alltid like hensiktsmessig å bruke for å beregne differensialtrykket etc. i et rør. Dette er fordi likningen ikke kan benyttes dersom det er et turbulent strømningsmønster i røret. I tilfeller der det kan oppstå turbulent strømming bør en derfor ta i bruk andre formler. Veileder og oppdragsgiver har sammen laget et paper (lagt ved denne bacheloroppgaven) [5] som blant annet omhandler formler som kan brukes til å beregne tetthet, viskositet, reynoldstall og Darcy friksjon.

Et sentralt tema er hvordan det er mulig å kunne fastslå om det er laminær eller turbulent strømming i røret. Dette kan gjøres ved å beregne reynoldstallet:

$$Re = \frac{\rho \cdot Q \cdot D}{\mu \cdot A}$$

Dersom $Re < 2300$ er strømmingen i røret laminært. Darcy friksjonen blir da:

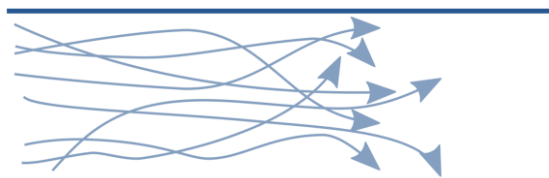
$$f_D = \frac{64}{Re}$$

Dersom $Re > 3000$ er strømmingen i røret turbulent. Dersom vi skal kunne regne ut darcy friksjonen i det turbulente regimet må vi kjenne til rørets relative ruhet (ϵ). Formelen for darcy friksjon i det turbulente regimet, også kalt Haalandsformel er:

$$\frac{1}{\sqrt{f_D}} = -1.8 \log \left[\left(\frac{\epsilon}{3.7 D} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right]$$

$$f_D = \left(\frac{1}{-1.8 \log \left[\left(\frac{\epsilon}{3.7 D} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right]} \right)^2$$

Dersom man ser på Moody Diagrammet (Figur 23) så ser man at i det mørke området til venstre på bildet er strømmingen i «Transition Region». Dette er når $2300 < Re < 3000$. I dette området kan man ikke vite om strømmingen er laminær eller turbulent. CDT har kommet frem til en løsning på hvordan en kan fastslå om væsken er i det laminære eller turbulente regimet i dette området, men på grunn av at dette er hemmelig for offentligheten – altså de som ikke jobber i CDT ble vi i samsvar med dem enige om å anta at vi alltid ville ha laminær flow i rørene våre. Etter hvert som vi fikk startet testingen på systemet fikk vi resultater som ikke stemte. Etter mye feilsøking kom vi frem til at dersom vi kjører vann igjennom systemet vil strømmingen alltid være i det turbulente regimet – dette fordi den indre rør diameteren vår var mye mindre enn først antatt. Dersom en ønsker å lese mer om hvordan vi kom

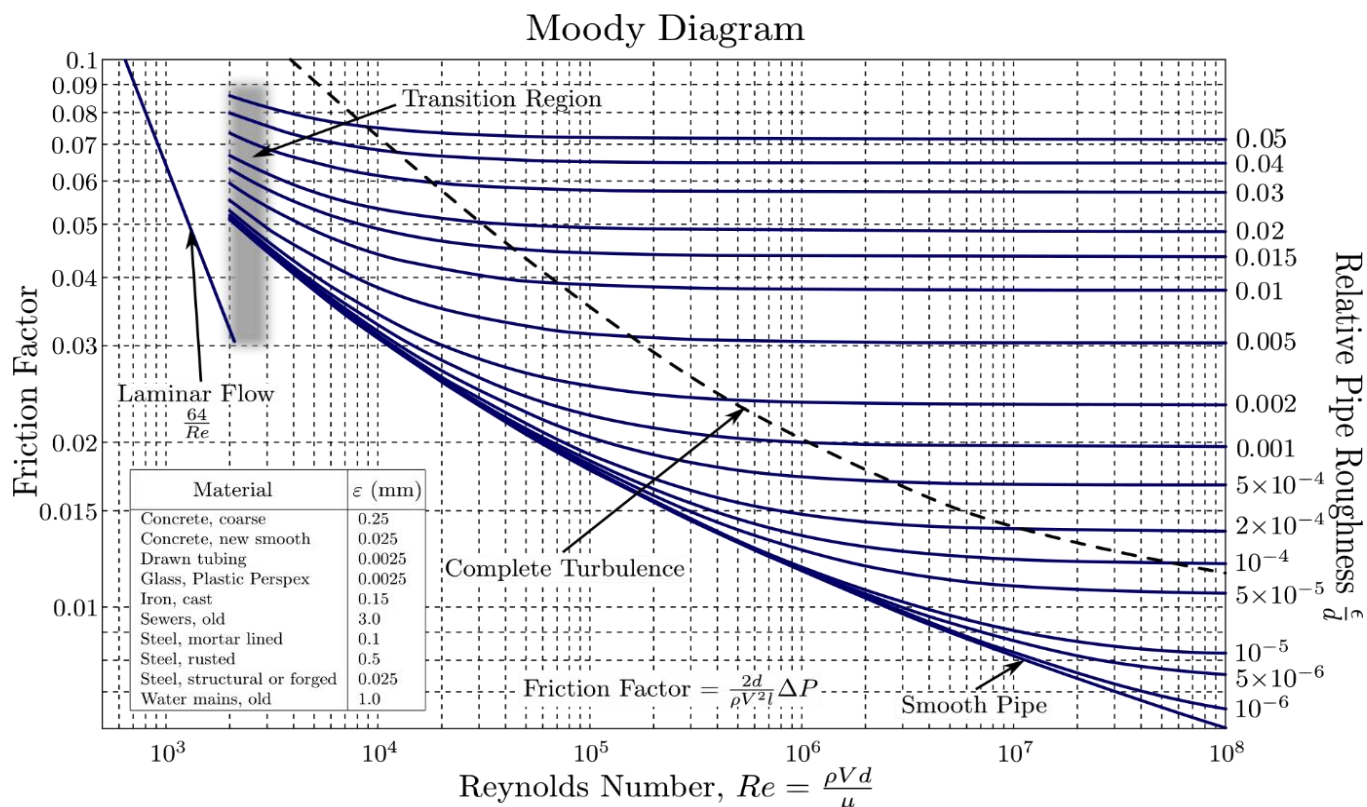


Figur 22 - Turbulent flow i rør – Illustrasjon er hentet fra wikipedia [17]



Figur 21 - Laminær flow i rør – Illustrasjon er hentet fra wikipedia [17]

frem til dette kan en se under *Appendiks E Feilsøking av viskositet*. Men vi kan kort fortalt se ut fra $Re = \frac{\rho \cdot Q \cdot D}{\mu \cdot A}$ at diameteren spiller inn når man regner ut reynoldstallet.



Figur 23 - Moody Diagram – Illustrasjon hentet fra wikipedia [6]

I tillegg til å ha satt oss inn i hvordan systemet egentlig fungerer ved å studere strømningslære har vi også laget to simulatorer av systemets prosess for å se hvilke resultater vi kan forvente oss å få. Dersom det er ønskelig å se hvilke formler vi har brukt til beregning av differensialtrykk, tetthet, strømningshastighet etc. kan en lese om dette under *Appendiks B – simulering av prosessen*.

Appendiks B Simulering av prosessen

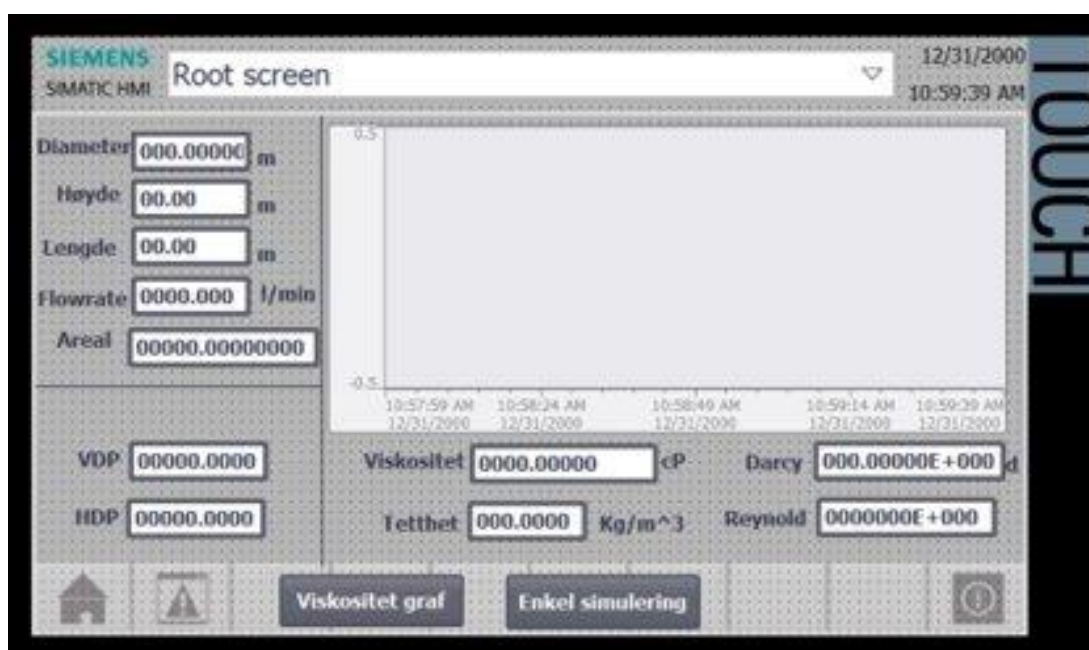
Sammen med oppdragsgiver ble det gjort klart at en av punktene i kravspesifikasjonen skulle være å utvikle en simulator. Dette for å få et bedre innblikk i hva prosessen gjør og hvilke resultater som er realistiske for systemet før en starter testingen av systemet. CDT legger stor vekt på simuleringsdelen av oppgaven, da dette er en viktig del av deres arbeidsmetode. I tillegg til dette var et av hovedformålene med simuleringen å foreta en beslutning for om det er det ville påvirke nøyaktigheten til målingene dersom rørene ble kortet ned til 2meter.

Det ble underveis i arbeidet utviklet to ulike simulatorer. Disse simuleringene inneholder ikke en reguleringsalgoritme – som vil si at det ikke er tatt hensyn til dosering av fortynnings-/fortykningsmiddel. Simuleringene nedenfor er kalt simulator V1 og V2, etter hvilken rekkefølge de ble utviklet.

For simulator V2 ble det utført testmålinger med en rørlengde på 2.0 og 2.5 meter før resultatene deretter ble analysert. Resultatene vi kom frem til og hvilke beslutninger som ble tatt kan en lese om under *B.3 Resultater fra simulator*

B.1 Simulator V1

Det ble drøftet på hvilken måte det var mest forsvarlig å sette opp simulatoren. Variabler som er kjente for systemet er diameter, areal, høyde og lengde, disse ble derfor satt til å være konstanter. Det ble deretter sett som logisk i henhold til hvordan modellen er satt opp, at input verdier ble flowraten og trykkmålinger. Systemet har fire ulike trykk transmittere, en plassert i hver ende av hvert av rørene. Disse måler differansetrykket til horisontalt (HDP) og vertikalt (VDP) rør. Flowraten, eller væskens strømningsrate på norsk, hentes inn fra en Coriolis-måler som er plassert i starten av sirkulasjonssløyfen. Resultatet ble denne løsningen:



Figur 24 - Skjermbilde fra Simulator versjon 1

Ut fra input verdiene og konstantene beregnes viskositeten og tettheten til væsken, for å komme frem til disse beregnes også reynoldstall og darcy.

Siden differensialtrykkene og strømningsraten er kjent, ut fra sensorer, og konstantene areal, diameter og lengde til rørene allerede er kjente. Regner vi i simulatoren først ut tettheten:

$$\rho = \frac{VDP - HDP}{gh}$$

h = lengden til det vertikale røret, i vårt tilfelle 2.5 meter til å begynne med.

Videre beregnes Darcy, friksjonsfaktoren. Her er, i tillegg til de allerede kjente verdiene, tettheten kjent fra forrige utregning. I tillegg har vi en ny variabel, v som er væskens strømningshastighet. Denne regnes ved å snu formelen for strømningsrate:

$$Q = A * v \quad \Rightarrow \quad v = \frac{Q}{A}$$

Med dette er alle variabler klare til å fylles inn:

$$f_D = \frac{2 \cdot D \cdot HDP}{\rho \cdot L \cdot v^2}$$

Darcy brukes videre for å regne ut Reynolds tallet. Ved hjelp av Reynoldstallet kontrolleres væsken for om den ligger i det laminære eller det turbulente sjiktet. Som vil si hvordan væskens flow oppfører seg i systemet.

«Reynolds tall kan sees som forholdet mellom treghetskrefter og friksjonskrefter. Ved turbulent strømning dominerer treghetskraftene.» [7]

Oppdragsgiver oppfordret til å bruke formel for laminær strømning, da det virket sannsynlig for vårt system at væsken ville holde seg i dette sjiktet. Det ble derfor i denne simuleringen brukt den første formelen for Reynoldstall.

$$Re_{laminær} = \frac{64}{f_D}$$

$$Re_{turbulent} = 6.9 \left[10^{\left(\frac{1}{1.8\sqrt{f_D}} \right)} - \left(\frac{\varepsilon}{3.7} \right)^{1.11} \right]^{-1}$$

Videre når reynoldstallet er på plass, gjenstår kun det viktigste i denne sammenheng, viskositeten:

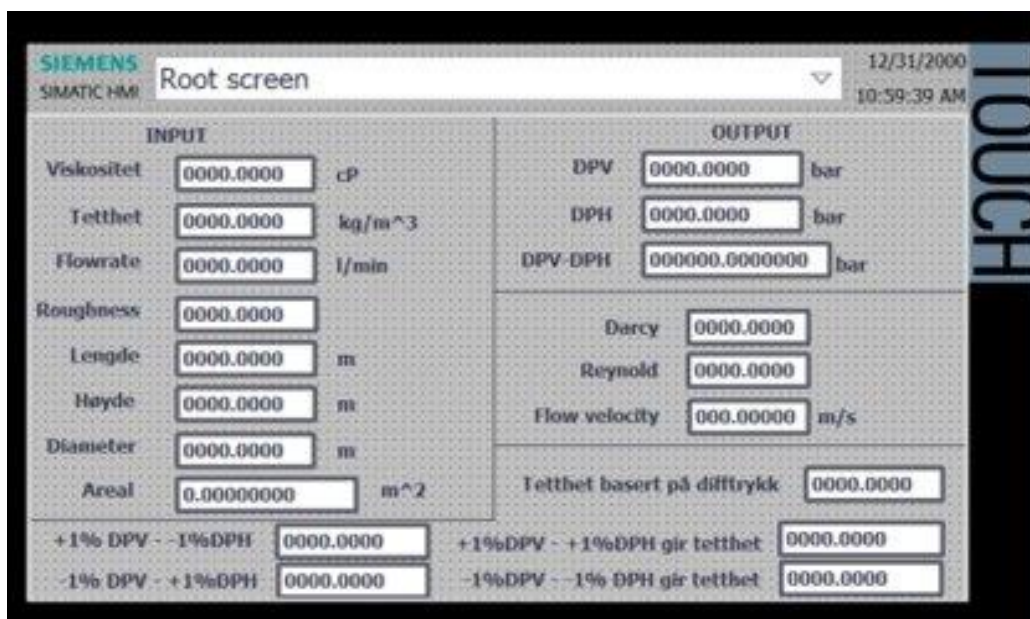
$$\mu = \frac{\rho \cdot Q \cdot D}{Re \cdot A}$$

Når alle formlene er implementert i programmet er det klart for å testes. Det ble mottatt måleserier fra CDT som kunne testes i simulatoren. Input verdiene ble satt inn i systemet. Outputverdiene ble deretter sjekket opp mot den mottatte måleserien.

B.2 Simulator V2

Det oppsto flere utfordringer ved utformingen av den første simulatoren. Det var blant annet ikke klart hva som var reelle verdier for trykkene. I tillegg til dette oppsto det utfordringer knyttet til variabler som på ulike måter var avhengige av hverandre, som gjorde det vanskelig å beregne. Etter samtale med CDT ble det gjort klart at dette var et kjent problem, og at det ville være enklere om det ble utviklet en simulator som reverserte det vi har gjort til nå. Dette ble da til simulator V2. Simuleringen ble snudd om, og inputverdiene er nå viskositet og tetthet, som før var output i simulator V1. Det som er likt i forhold til simulator V1 er de konstante variablene, samt det at flowraten fortsatt brukes som input verdi. Viskositet, tetthet og roughness er nye inputverdier. Når alle disse variablene er kjent står vi igjen med differansetrykkene som her er output verdiene.

I utgangspunktet var det slik simulator V2 ble satt opp. Da det skulle tas testmålinger med denne simulatoren kom det forespørsel fra oppdragsgiver om det var mulig å implementere noen ekstra beregninger slik at tettheten basert på differensialtrykket ble regnet ut. Det var også ønskelig at å sjekke tettheten basert på differensialtrykket dersom en hadde +/- 1% avvik på de to differansetrykkene. Ut fra dette kan det konstateres om det å redusere rørlengde ned til 2 meter vil påvirke resultatene, og i hvor stor grad det eventuelt vil påvirke systemets målinger. Dersom forskjellene er for store lar det seg ikke gjøre å redusere rørlengdene. Dette resulterte i en utvidelse av simulatoren, som til slutt ble seende slik ut:



Figur 25 - Skjerm bilde for Simulator versjon 2

Den første beregningen som blir gjort for denne simulatoren er Reynoldstallet. Den beregnes ved hjelp av å snu formelen for viskositet fra forrige simulator med hensyn på Reynoldstallet, formelen blir da seende slik ut:

$$Re = \frac{\rho \cdot Q \cdot D}{A \cdot \mu}$$

Herfra er det videre til darcy. Her kommer det en større forandring i forhold til simulator V1. Vi tar hensyn til Reynoldstallet når det kommer til å velge den rette formelen for beregning av Darcy friksjonsfaktor:

Dersom $Re < 2\,300$:

$$f_{d-Laminær} = \frac{64}{Re}$$

Dersom $Re > 3\,000$:

$$f_{d-Turbulent} = \left(\frac{1}{-1.8 \log \left[\left(\frac{\varepsilon}{3.7D} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right]} \right)^2$$

Eller dersom $2\,300 < Re < 3\,000$:

$$f_d = \frac{f_{d-Laminær} - f_{d-Turbulent}}{2}$$

Dette er egentlig ikke tilfelle i teknologien CDT har utviklet, men siden denne teknologien er hemmelig for offentligheten har vi fått beskjed om å ta gjennomsnittet av turbulent og laminær dersom vi får et reynoldstall som ligger i transition området.

Videre må trykkene beregnes. Først beregnes horisontal trykket ved hjelp av formelen for Darcy i simulator V1. Beregningen ser da slik ut:

$$HDP = \frac{f_d \cdot \rho \cdot l \cdot v^2}{2 \cdot D}$$

Og til slutt blir da vertikalt differensialtrykk beregnet ved formelen for tetthet fra simulator V1:

$$VDP = \rho \cdot h \cdot g + HDP$$

De siste beregningene går på å finne forholdet mellom differansetrykkene og beregning av tettheten.

$$\rho = \frac{VDP - HDP}{gh}$$

B.3 Resultater fra simulator

| | Første måling: | | Andre måling: | |
|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Lengde 2.5m | Lengde 2.0m | Lengde 2.5m | Lengde 2.0m |
| Viskositet | 10 cP | 10 cP | 20 cP | 20 cP |
| Tetthet | 856 kg/m ³ | 856 kg/m ³ | 101.94 kg/m ³ | 101.94 kg/m ³ |
| Flowrate | 57 l/min | 57 l/min | 11 l/min | 11 l/min |
| Roughness | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| Flowvelocity | 4.88 m/s | 4.88 m/s | 0.94 m/s | 0.94 m/s |
| Lengde | 2.5m | 2.0m | 2.5m | 2.0m |
| Høyde | 2.5m | 2.0m | 2.5m | 2.0m |
| Diameter | 0.0157m | 0.0157m | 0.0157m | 0.0157m |
| Areal | 0.00019467m ² | 0.00019467m ² | 0.00019467m ² | 0.00019467m ² |
| DPH | 1.7842 Bar | 1.4273 Bar | 0.6076 Bar | 0.4861 Bar |
| DPV | 1.5742 Bar | 1.2594 Bar | 0.6326 Bar | 0.5061 Bar |
| Difftrykk (DPV-DPH) | 0.210 Bar | 0.168 Bar | 0.025 Bar | 0.020 Bar |
| Darcy | 0.0973 | 0.0973 | 8.4664 | 8.4664 |
| Reynolds | 657.85 | 657.85 | 7.5593 | 7.5593 |
| Tetthet basert på målt trykk | 855.9999 | 855.9998 | 101.9401 | 101.9399 |
| Tetthet (DPH & DPV +1%) | 864.5597 | 864.5596 | 102.9594 | 102.9593 |
| Tetthet (DPH & DPV -1%) | 847.4402 | 847.4401 | 100.9208 | 100.9205 |
| Tetthet (DPV+1%, DPH-1%) | 992.9363 | 992.9362 | 152.5082 | 152.5080 |
| Tetthet (DPV-1%, DPH+1%) | 719.0636 | 719.0635 | 51.3720 | 51.3718 |

Tabell 6 - Resultater fra simulatormålinger

Ved å bruke simulator V2 ble det foretatt nødvendige målinger for å undersøke om det lar seg gjøre å redusere rørlengden til 2.0 meter. Hvilke av løsningene som skal implementeres bestemmes her. Det ble foretatt to sett målinger. Resultatene av målingene er ført opp i tabellen over.

Input verdiene som er tatt i bruk for målingene er de samme som ble brukt ved kvalitetssjekk av simulatorene, altså måleserier mottatt fra oppdragsgiver. De oppgitte verdiene var viskositeten, flowraten og roughness. Flowvelocity, som vil si strømningshastigheten, ble igjen regnet ut fra flowraten. Tetthet ble beregnet ved bruk av differansetrykket som også var oppgitt. Og konstantene er som tidligere kjente faste verdier. Det som endres er en rørlengde/høyde på 2,5m opp mot lengde/høyde på 2,0m.

For første måling med en viskositet på 10 centipoise og en flowrate på 57 liter/min har vi en tetthet på 856 kg/m³. Her er det synlig at både trykkverdiene og trykkforholdet endrer seg for de to i verdiene for 2,5m og 2,0m. Det fører videre til at den utregnede tettheten også endres, men i svært liten grad. Tettheten blir beregnet til å være 855,9999 og 855,9998 som er et avvik på 0,0001. Videre til beregninger med hensyn på måleavvik ender tettheten igjen på et avvik med samme verdi.

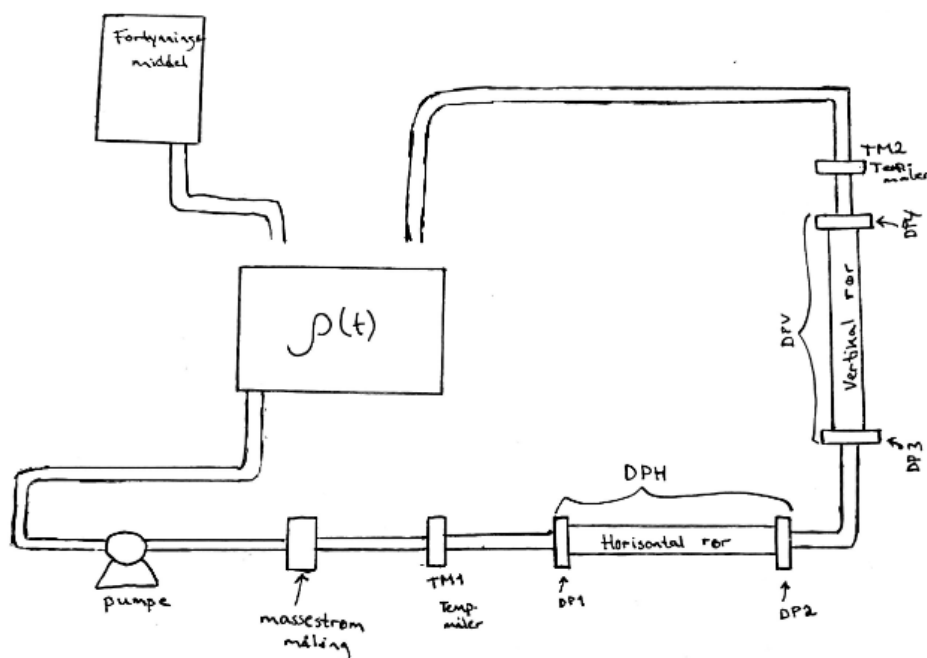
For den neste målingen er det brukt en viskositet på 20 centipoise med en flowrate på 11 liter/min, her er tettheten 101,94 kg/m³. For beregningene av tettheten får vi her et avvik på 0,0002 mellom målingene med lengde/høyde på 2,5m og 2,0m. For beregningene ved ulike måleusikkerheter viser avviket høyeste verdi på 0,0003.

Dette er snakk om svært lave avviksverdier som beregnes for begge målingene. Det gjør derfor forsvarlig å gå ut ifra at en forkorting av rørene ikke vil gå på bekostning nøyaktigheten til systemet. Systemet vil kunne kjøre på samme måte som tidligere uten betraktelig synlige endringer i systemmålingene. Avgjørelsen ble tatt i samråd med CDT, og rørene var nå klare for å kortes ned.

Appendiks C Reguleringsalgoritme

C.1 Pictorial diagram av systemet

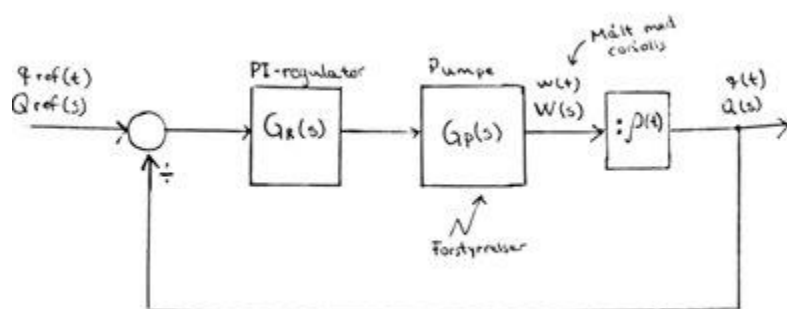
I oppstarten av arbeidet med reguleringsalgoritmen ble det tegnet opp et pictorial diagram av systemet. Et pictorial diagram er en oversikt over hvilke komponenter systemet består av og hvordan disse komponentene er koblet sammen.



Figur 26 – Pictorial diagram av systemet

C.2 Blokkdiagram av reguleringsløyfen

Etter at pictorial diagrammet var tegnet opp ble det valgt ut komponentene som skulle være en del av reguleringen. Disse ble satt inn i et blokkdiagram.

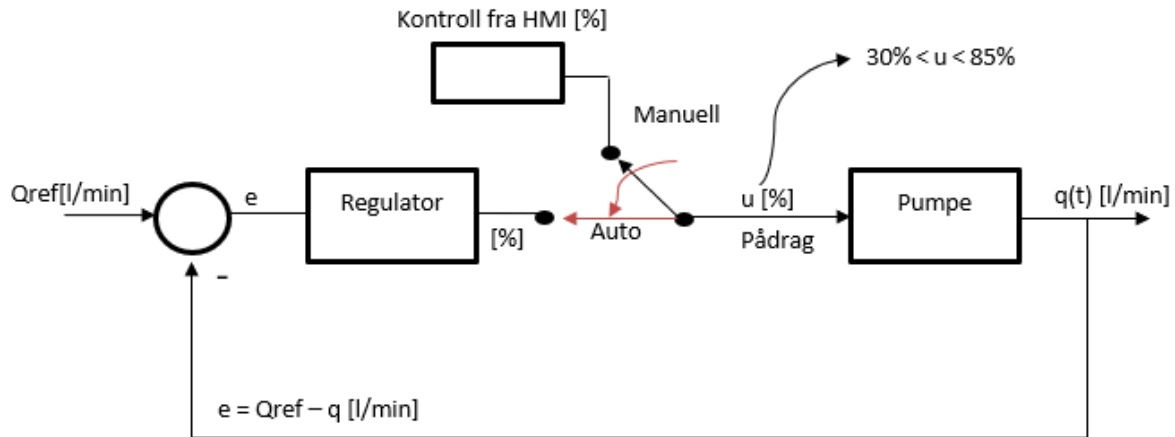


$q_{ref} = \text{ønsket flowrate}$
 $q = \text{nåværende flowrate}$

Figur 27 – Blokkdiagram - reguleringsløyfen

Ut ifra blokkdiagrammet kan en se at en setter en ønsket flowrate til systemet. PI-regulatoren regulerer ut fra denne og den nåværende flowraten. Reguleringen består av en tilbakekopling som sjekker om $q_{ref} = q$. Dersom ønsket flowrate og nåværende flowrate ikke er lik hverandre vil reguleringen fortsette til man oppnår ønsket flowrate.

Lengre ut i prosjektperioden ble det satt opp et mer detaljert blokkdiagram.

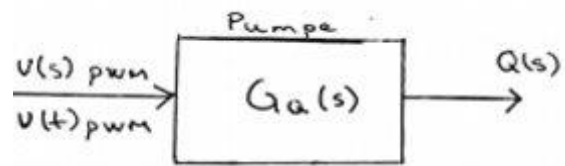


Figur 28 – Oppdatert blokkdiagram

C.3 Modellering av pumpeprosessen

Pumpen som blir brukt i dette prosjektet vil være frekvensstyrt.

$$G_Q(s) = k_q \cdot u_{pwm}(s)$$



Ut fra formelen ovenfor ser man at pumpen bare består av en forsterkning da u_{pwm} er pådraget til pumpen. Det er derfor behov for å ta hensyn til prosessens dynamikk. I dette tilfellet vil det være en tidsforsinkelse, da pumpen ikke kjører med fullt pådrag med en gang en gir et signal om det. For å håndtere tidsforsinkelsen kan en ta i bruk Padé tilnærming.

Padé tilnærming: Gitt en prosess $G(s)=K$ (ren forsterkning), som har tidsforsinkelsen τ , skal prosessen med tidsforsinkelse bli:

$$G_t(s) = G(s) \cdot e^{-\tau s}$$

Dette uttrykket kommer fra: $G(s) = \mathcal{L}\{g(t)\} \rightarrow$ Dette gir oss $\mathcal{L}\{g(t - \tau)\} = G(s) \cdot e^{-\tau s}$

Dersom en ser på $G_t(s) = G(s) \cdot e^{-\tau s}$ er ikke denne funksjonen på ordinær TF måte. Den må derfor gjøres om slik at den blir det. Padé tilnærmingen omformer $e^{-\tau s}$ til TF form. Dette gir:

$$e^{-\tau s} = e^{-\frac{\tau s}{2}} \cdot e^{-\frac{\tau s}{2}} = \frac{e^{-\frac{\tau s}{2}}}{e^{\frac{\tau s}{2}}} = \frac{1 - \frac{\tau}{2}s + \frac{1}{2!} \cdot \left(\frac{\tau}{2}\right)^2 \cdot s^2 - \frac{1}{3!} \cdot \left(\frac{\tau}{2}\right)^3 \cdot s^3 + \dots}{1 + \frac{\tau}{2}s + \frac{1}{2!} \cdot \left(\frac{\tau}{2}\right)^2 \cdot s^2 + \frac{1}{3!} \cdot \left(\frac{\tau}{2}\right)^3 \cdot s^3 + \dots}$$

Denne tilnærmingen kan gi hvilken som helst orden, men som oftest blir det brukt 1.ordens padé tilnærming eller 2.ordens padé tilnærming.

1.ordens padé tilnærming:

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1 - \frac{\tau}{2}s}{1 + \frac{\tau}{2}s}$$

2.ordens padé tilnærming:

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1 - \frac{\tau}{2} \cdot s + \frac{\tau^2}{8} \cdot s^2}{1 + \frac{\tau}{2} \cdot s + \frac{\tau^2}{8} \cdot s^2}$$

Før en kan konstatere hvilken tilnærming som passer systemet best må en teste å se hvilke resultater de ulike tilnærmingene gir på systemet.

C.4 Transferfunksjoner for systemet

For å kunne lage en reguleringsalgoritme for systemet må man kjenne til forsterkningen til systemet, samt tidskonstanten og tidsforsinkelsen. For å kunne konstatere disse ble systemet kjørt med ulike pådrag - fra 30%-85%. Det ble foretatt flere tester som alle ble logget til fil slik at det skulle være mulig å studere resultatene. Etter gjennomgang av resultater og samtaler med veileder ble vi enige om å bruke gjennomsnittet av to tester for å konstatere en transferfunksjon for hvert pådrag til systemet. Dette fordi testene våre var såpass like. Til tross for at disse var såpass like er det ikke ønskelig å bare forholde seg til en test da en ønsker bedre nøyaktighet.

Resultatene etter gjennomsnittet av to tester er presentert under. Dersom det er ønskelig å se hvordan vi kom frem til disse resultatene kan en lese under *C.5 Plottet flowrate og pådrag*.

| U (%) | k (Forsterkning) | T (Tidskonstant) | τ (Tidsforsinkelse) |
|-------|------------------|------------------|--------------------------|
| 30 | 0,17595563 | 2 | 4 |
| 35 | 0,19743981 | 3 | 1 |
| 40 | 0,18724771 | 2 | 2 |
| 42 | 0,18368603 | 2 | 1.5 |
| 45 | 0,18312634 | 3 | 1.5 |
| 50 | 0,18708015 | 2 | 1 |
| 61 | 0,17796118 | 2 | 1.5 |
| 74 | 0,14048639 | 2.5 | 1 |
| 85 | 0,09939677 | 2.5 | 1.5 |

Tabell 7 - Forsterkning, tidskonstant og tidsforsinkelse til systemet

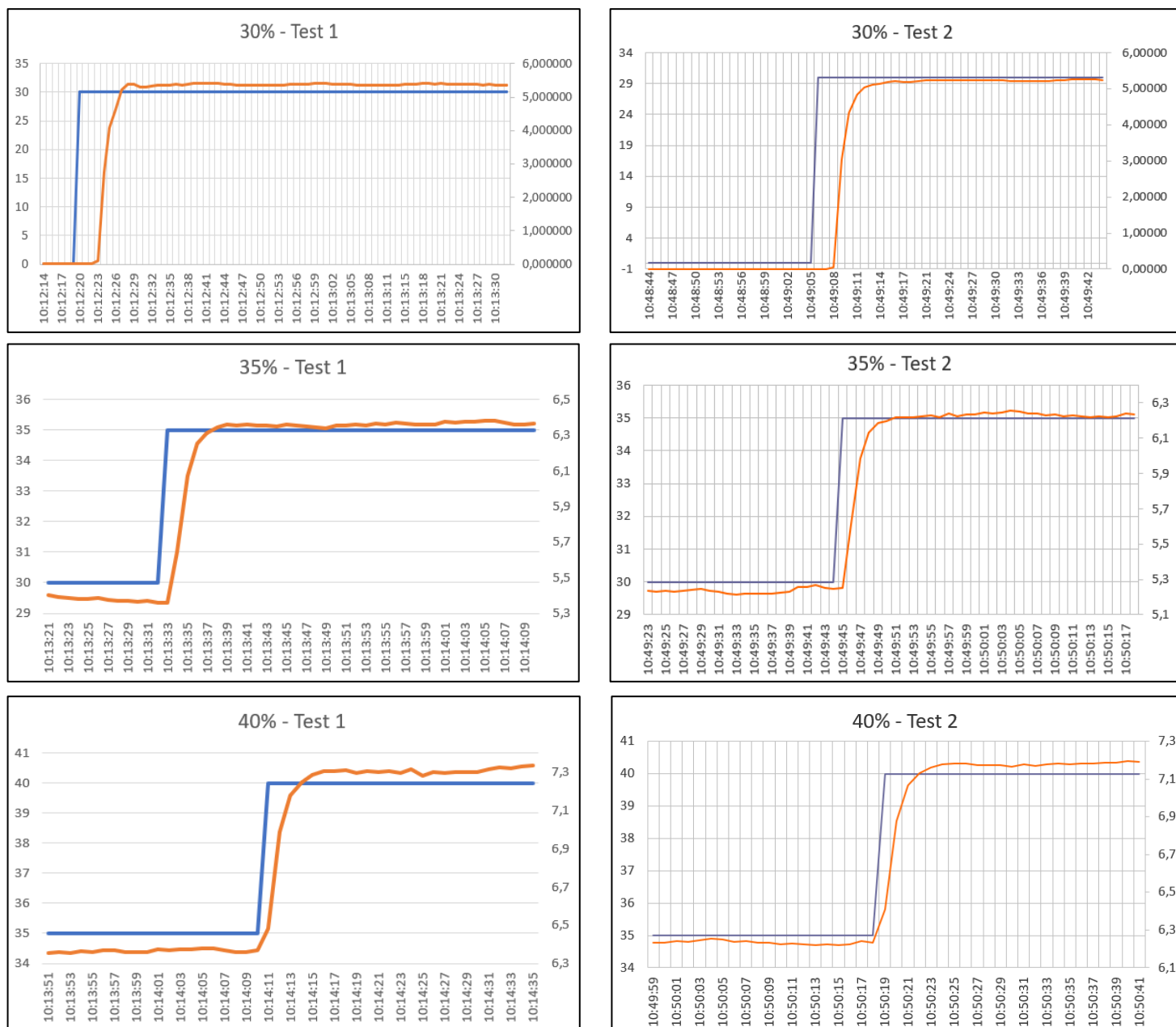
Ut fra disse resultatene er det mulig å sette opp transferfunksjoner for hvert av pådragene til systemet.

| | |
|-------------------------|---|
| 30% | $Gp(s) = \frac{k}{Ts + 1} = \frac{0.17595}{2s + 1}$ |
| 35% (Fra 32,5 til 37,5) | $Gp(s) = \frac{k}{Ts + 1} = \frac{0.19744}{3s + 1}$ |
| 40% (Fra 37,5 til 41) | $Gp(s) = \frac{k}{Ts + 1} = \frac{0.18724}{2s + 1}$ |
| 42% (Fra 41 til 42,5) | $Gp(s) = \frac{k}{Ts + 1} = \frac{0.18368}{2s + 1}$ |
| 45% (Fra 42,5 til 47,5) | $Gp(s) = \frac{k}{Ts + 1} = \frac{0.18312}{3s + 1}$ |
| 50% (47,5 til 58) | $Gp(s) = \frac{k}{Ts + 1} = \frac{0.18708}{2s + 1}$ |
| 61% (Fra 58 til 68) | $Gp(s) = \frac{k}{Ts + 1} = \frac{0.17796}{2s + 1}$ |
| 74% (Fra 68 til 80) | $Gp(s) = \frac{k}{Ts + 1} = \frac{0.14048}{2.5s + 1}$ |
| 85% (Fra 80 til 88) | $Gp(s) = \frac{k}{Ts + 1} = \frac{0.09939}{2.5s + 1}$ |

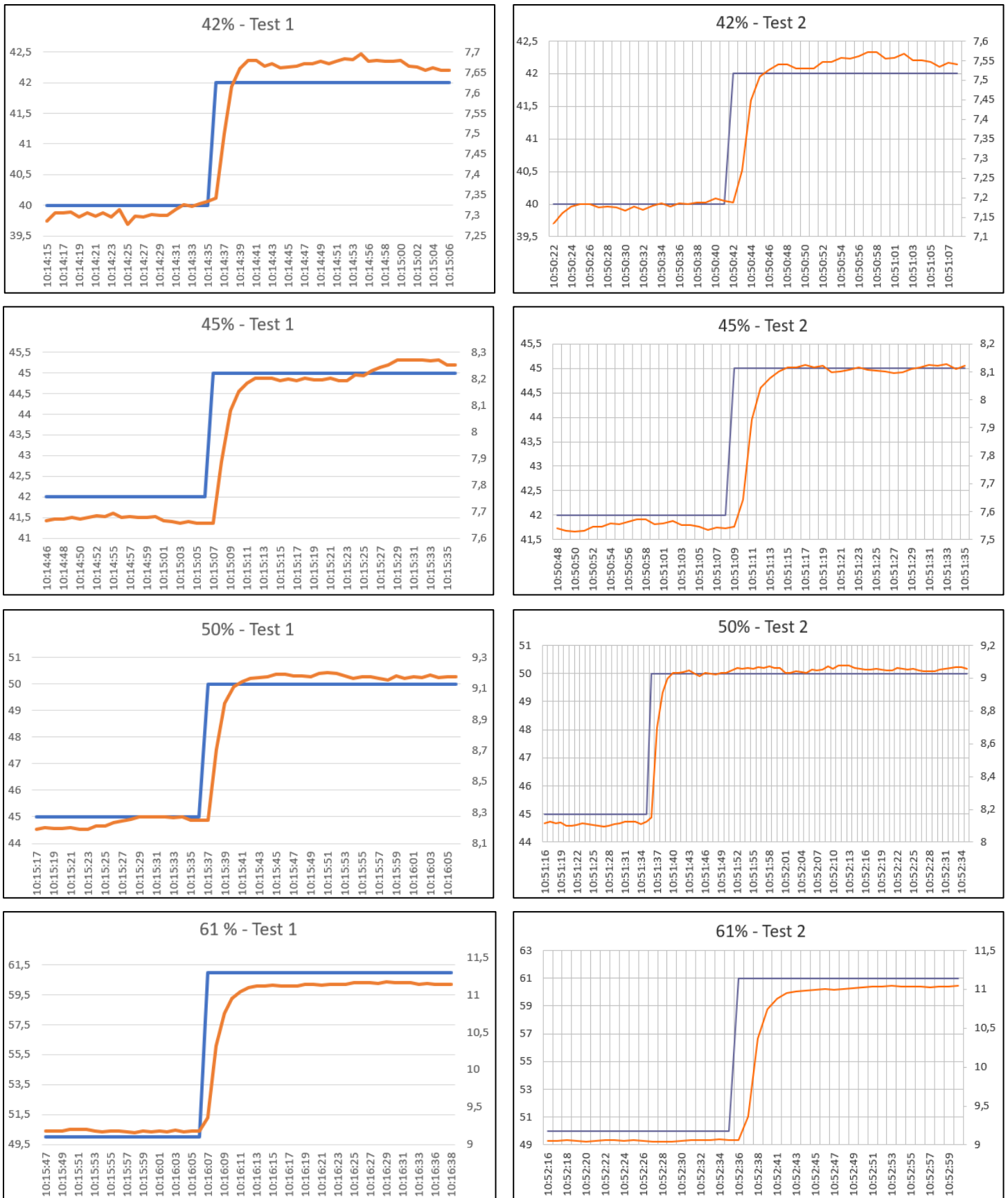
Figur 29 - Transferfunksjon til systemet for hvert pådrag

C.5 Plottet flowrate og pådrag

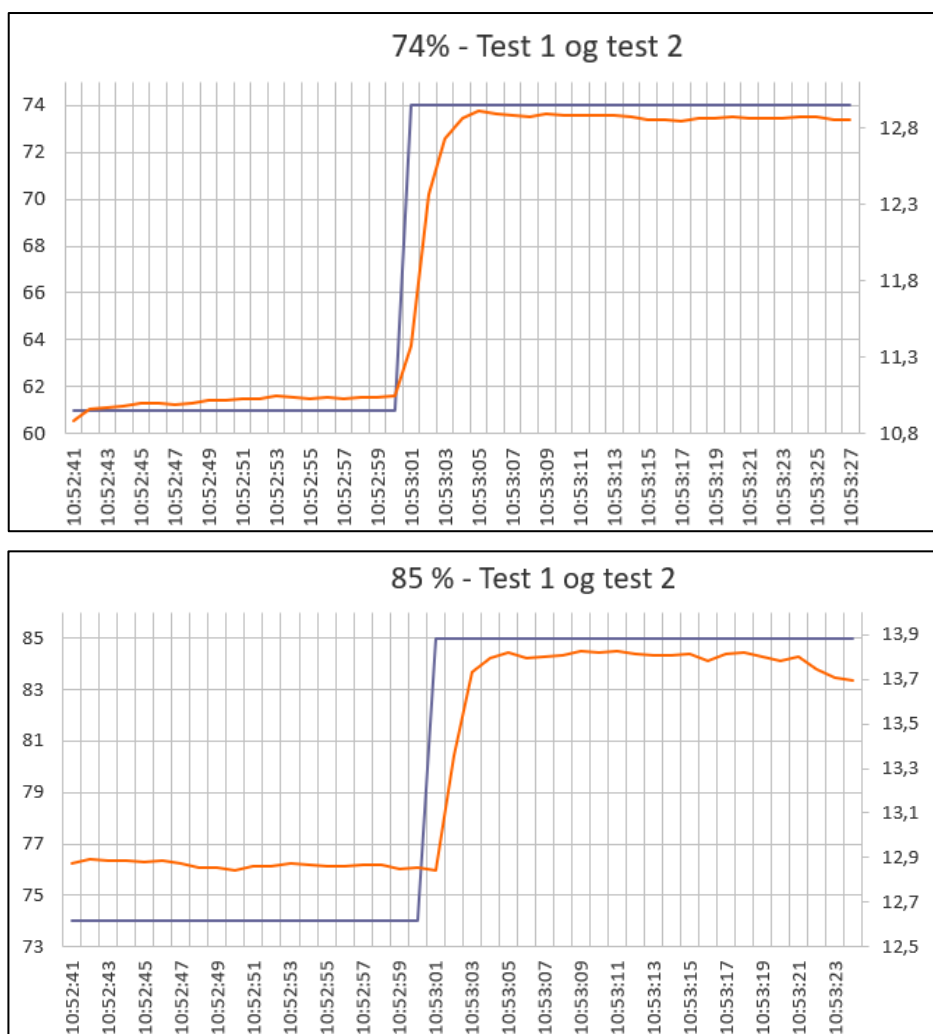
For å komme frem til resultatene presentert i *C.4 Transferfunksjoner for systemet*, ble alle målingene logget til en CSV-fil. Dette ble gjort ved å lage en mulighet for logging på HMI-panelet. Herfra var det mulig å starte og stoppe loggingen akkurat som man ønsker. Etter at systemet var blitt kjørt ved alle pådragene ble flowraten og pådrag plottet som graf i Excel. Grafene for hvert av pådragene til test 1 og 2 er presentert under.



Figur 30 – Plottet flowrate – pådrag 30%-40%



Figur 31 – Plottet flowrate – pådrag 42%-61%



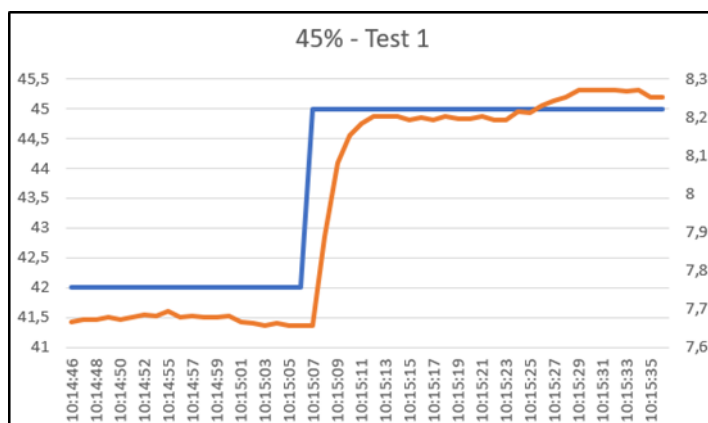
Figur 32 – Plottet flowrate – pådrag 74%-85%

Etter at grafene var ferdig plottet ble tidsforsinkelse, tidskonstant og forsterkning lest av på hver av grafene. Hvordan dette ble gjort kan en se under her. Etter samtaler med veileder ble vi enig om å velge pådrag 45% som vårt arbeidspunkt. Det er grunnen til å at vi har valgt å vise fremgangsmåten ved dette pådraget - men det er også brukt samme metode ved de andre pådragene også.

TEST 1 – Pådrag 45%

Nedenfor finner man pådrag og flowrate plottet med hensyn til tiden, samt verdiene for tid, pådrag og flowrate.

| | | |
|----------|----|----------|
| 10:14:46 | 42 | 7,666318 |
| 10:14:47 | 42 | 7,672346 |
| 10:14:48 | 42 | 7,670838 |
| 10:14:49 | 42 | 7,676868 |
| 10:14:50 | 42 | 7,670838 |
| 10:14:51 | 42 | 7,678374 |
| 10:14:52 | 42 | 7,684402 |
| 10:14:53 | 42 | 7,681388 |
| 10:14:55 | 42 | 7,694953 |



| | | |
|----------|----|----------|
| 10:14:56 | 42 | 7,676868 |
| 10:14:57 | 42 | 7,67988 |
| 10:14:58 | 42 | 7,678374 |
| 10:14:59 | 42 | 7,676868 |
| 10:15:00 | 42 | 7,67988 |
| 10:15:01 | 42 | 7,66481 |
| 10:15:02 | 42 | 7,663302 |
| 10:15:03 | 42 | 7,655769 |
| 10:15:04 | 42 | 7,661796 |
| 10:15:05 | 42 | 7,655769 |
| 10:15:06 | 42 | 7,655769 |
| 10:15:07 | 45 | 7,655769 |
| 10:15:08 | 45 | 7,886347 |
| 10:15:09 | 45 | 8,080753 |
| 10:15:10 | 45 | 8,151584 |
| 10:15:11 | 45 | 8,18474 |
| 10:15:12 | 45 | 8,202824 |
| 10:15:13 | 45 | 8,201318 |
| 10:15:14 | 45 | 8,202824 |
| 10:15:15 | 45 | 8,193782 |
| 10:15:16 | 45 | 8,19981 |
| 10:15:17 | 45 | 8,192273 |
| 10:15:18 | 45 | 8,202824 |
| 10:15:19 | 45 | 8,196795 |
| 10:15:20 | 45 | 8,196795 |
| 10:15:21 | 45 | 8,202824 |
| 10:15:22 | 45 | 8,192273 |
| 10:15:23 | 45 | 8,192273 |
| 10:15:24 | 45 | 8,21488 |
| 10:15:25 | 45 | 8,213373 |
| 10:15:26 | 45 | 8,231458 |
| 10:15:27 | 45 | 8,242007 |
| 10:15:28 | 45 | 8,254064 |
| 10:15:29 | 45 | 8,270641 |
| 10:15:30 | 45 | 8,272148 |
| 10:15:31 | 45 | 8,272148 |
| 10:15:32 | 45 | 8,272148 |
| 10:15:33 | 45 | 8,267627 |
| 10:15:34 | 45 | 8,272148 |
| 10:15:35 | 45 | 8,252558 |
| 10:15:36 | 45 | 8,252558 |

For å kunne finne tidsforsinkelsen, tidskonstanten og forsterkningen starter man med å finne Qf og Q0. Qf er gjennomsnittet av alle verdiene når pådraget har «økt ferdig». Q0 er gjennomsnittet av alle verdiene før pådraget trer i kraft. Etter beregninger av disse i Excel har vi kommet frem til:

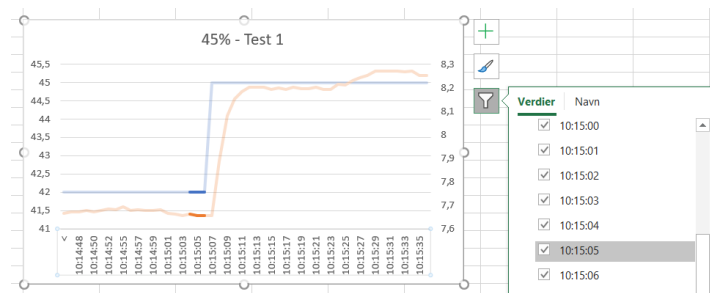
$$Q_f = 8,2249659$$

$$Q_0 = 7,6812512$$

$$\Delta Q = Q_f - Q_0 = 0,543715$$

Siden pådraget ble økt fra 42% til 45% er Uf = 45, mens U0 = 42. Dette gir $\Delta U = 3$.

Deretter finner man T0 der pådraget starter sitgningen (blå graf). Leter oss frem til dette (vist under). Finner at T0 = 10:15:05



Deretter blir det gjort det samme for å finne T1, men T1 er der stigningen for flowraten starter (oransje graf). Leter oss frem til dette på samme måte som ovenfor og finner at T1 = 10:15:06

Mangler nå T2. T2 er i det punktet det flowraten er 63% av delta Q. 63% av ΔQ er:

$$\Delta Q_{63\%} = (\Delta Q \cdot 0,63) + Q_0 = 8,02379$$

Leter deretter etter en flowrate som er så nær som mulig denne blant tallene i siden. Leser av tilhørende tid, og finner at T2=10:15:09

| Qf[l/min] | U [%] | T0 | T1 | T2 | ΔU | ΔQ |
|-----------|-------|----------|----------|----------|------------|------------|
| 8,224966 | 45 | 10:15:05 | 10:15:06 | 10:15:09 | 3 | 0,543751 |

Tabell 8 - Oppsummering test 1 - pådrag 45%

Ut fra resultatene ovenfor kan man nå beregne tidskonstanten (T), tidsforsinkelsen (τ) og forsterkningen (K).

$$K = \frac{\Delta Q}{\Delta U} = 0,18123623$$

$$T = T_2 - T_1 = 10:15:09 - 10:15:06 = 3 \text{ sek}$$

$$\tau = T_1 - T_0 = 10:15:06 - 10:15:05 = 1 \text{ sek}$$

Oppsummerte resultater for test 1 – pådrag 45% blir da:

| Arbeidspunkt: 45% pådrag | K | T | τ |
|-----------------------------|------------|-------|--------|
| Test 1 | 0,18123623 | 3 sek | 1 sek |

Tabell 9 - Tidskonstant, tidsforsinkelse og forsterkning - Test 1 pådrag 45%

TEST 2 – Pådrag 45%

Det blir gjort det samme som ovenfor på test 2. Resultatene for test 2 – pådrag 45% blir da:

| Arbeidspunkt: 45% pådrag | K | T | T |
|-----------------------------|------------|-------|-------|
| Test 2 | 0,18501445 | 3 sek | 2 sek |

Tabell 10 - Tidskonstant, tidsforsinkelse og forsterkning - Test 2 pådrag 45%

TEST 1 OG TEST 2 SAMMENLAGT

Gjennomsnittet av test 1 og test 2 blir da:

| Arbeidspunkt: 45% pådrag | K | T | τ |
|-----------------------------|------------|-------|---------|
| Test 1 | 0,18123623 | 3 sek | 1 sek |
| Test 2 | 0,18501445 | 3 sek | 2 sek |
| Gjennomsnitt | 0,18312634 | 3 sek | 1,5 sek |

Tabell 11 - Gjennomsnitt av test 1 og test 2: Forsterkning, tidskonstant og tidsforsinkelse

Dersom disse resultatene blir satt inn i en transferfunksjon kommer en frem til samme transferfunksjon som presentert i C.4 *Transferfunksjoner* for systemet.

$$45\% \text{ (Fra 42,5 til 47,5)}$$

$$Gp(s) = \frac{k}{Ts + 1} = \frac{0.18312}{3s + 1}$$

C.6 Regulatorparametre - Ziegler Nichols

Etter tidligere samtaler med veileder og oppdragsgiver ble vi enige om å bruke en PI-regulator til å regulere systemet vårt. Etter å ha funnet tidsforsinkelse, tidskonstant og forsterkning for systemet ble regulatorparameterne regnet ut ved å bruke Ziegler Nichols tabell.

| | K_p | T_r | T_d |
|-----|--------------------------------------|---------|-----------|
| P | $\frac{T}{K_0 \cdot \tau}$ | | |
| PI | $\frac{0.9 \cdot T}{K_0 \cdot \tau}$ | 3τ | |
| PID | $\frac{1.2 \cdot T}{K_0 \cdot \tau}$ | 2τ | 0.5τ |

Tabell 12 - Ziegler Nichols regulatorparametre

| U [%] | K_p | T_r |
|-------|--|-----------------------------|
| 30 | $\frac{0.9 \cdot T}{K_0 \cdot \tau} = \frac{0.9 \cdot 2}{0,17595563 \cdot 4} = 2.55746$ | $3\tau = 3 \cdot 4 = 12$ |
| 35 | $\frac{0.9 \cdot T}{K_0 \cdot \tau} = \frac{0.9 \cdot 3}{0,19743981 \cdot 1} = 13.67505$ | $3\tau = 3 \cdot 1 = 3$ |
| 40 | $\frac{0.9 \cdot T}{K_0 \cdot \tau} = \frac{0.9 \cdot 2}{0,18724771 \cdot 2} = 4.80646$ | $3\tau = 3 \cdot 2 = 6$ |
| 42 | $\frac{0.9 \cdot T}{K_0 \cdot \tau} = \frac{0.9 \cdot 2}{0,18368603 \cdot 1,5} = 6.53288$ | $3\tau = 3 \cdot 1.5 = 4.5$ |
| 45 | $\frac{0.9 \cdot T}{K_0 \cdot \tau} = \frac{0.9 \cdot 3}{0,18312634 \cdot 1,5} = 9.82927$ | $3\tau = 3 \cdot 1.5 = 4.5$ |
| 50 | $\frac{0.9 \cdot T}{K_0 \cdot \tau} = \frac{0.9 \cdot 2}{0,18708015 \cdot 1} = 9.62154$ | $3\tau = 3 \cdot 1 = 3$ |
| 61 | $\frac{0.9 \cdot T}{K_0 \cdot \tau} = \frac{0.9 \cdot 2}{0,17796118 \cdot 1,5} = 6.74304$ | $3\tau = 3 \cdot 1.5 = 4.5$ |
| 74 | $\frac{0.9 \cdot T}{K_0 \cdot \tau} = \frac{0.9 \cdot 2.5}{0.14048639 \cdot 1} = 16.01578$ | $3\tau = 3 \cdot 1 = 3$ |
| 85 | $\frac{0.9 \cdot T}{K_0 \cdot \tau} = \frac{0.9 \cdot 2.5}{0.09939677 \cdot 1.5} = 15.09103$ | $3\tau = 3 \cdot 1.5 = 4.5$ |

Tabell 13 - Utrekning av regulatorparametre Ziegler Nichols

| U [%] | K_p | $T_r = T_i$ |
|-------|----------|-------------|
| 30 | 2.55746 | 12 |
| 35 | 13.67505 | 3 |
| 40 | 4.80646 | 6 |
| 42 | 6.53288 | 4.5 |
| 45 | 9.82927 | 4.5 |
| 50 | 9.62154 | 3 |
| 61 | 6.74304 | 4.5 |
| 74 | 16.01578 | 3 |
| 85 | 15.09103 | 4.5 |

Tabell 14 - Oppsummerte resultater for PI-regulator Ziegler Nichols

For å nå kunne konstatere transferfunksjonene til PI-regulatoren kan vi sette inn utregnet verdier fra tabellen over inn i formelen: $G_R(s) = K_p \left(\frac{T_i s + 1}{T_i s} \right)$. Resultatene blir da:

| U [%] | TF for regulatoren |
|-------|--|
| 30 | $G_R(s) = 2.55746 \left(\frac{12 \cdot s + 1}{12 \cdot s} \right)$ |
| 35 | $G_R(s) = 13.67505 \left(\frac{3 \cdot s + 1}{3 \cdot s} \right)$ |
| 40 | $G_R(s) = 4.80646 \left(\frac{6 \cdot s + 1}{6 \cdot s} \right)$ |
| 42 | $G_R(s) = 6.53288 \left(\frac{4.5 \cdot s + 1}{4.5 \cdot s} \right)$ |
| 45 | $G_R(s) = 9.82927 \left(\frac{4.5 \cdot s + 1}{4.5 \cdot s} \right)$ |
| 50 | $G_R(s) = 9.62154 \left(\frac{3 \cdot s + 1}{3 \cdot s} \right)$ |
| 61 | $G_R(s) = 6.74304 \left(\frac{4.5 \cdot s + 1}{4.5 \cdot s} \right)$ |
| 74 | $G_R(s) = 16.01578 \left(\frac{3 \cdot s + 1}{3 \cdot s} \right)$ |
| 85 | $G_R(s) = 15.09103 \left(\frac{4.5 \cdot s + 1}{4.5 \cdot s} \right)$ |

Tabell 15 - Transferfunksjon for PI-regulator Ziegler Nichols

C.7 Regulatorparametre – Cohen Coon

I dette delkapittelet er regulatorparameterne for PI-regulator beregnet ved hjelp av Cohen Coon's tabell. Beregningene er gjort, men disse regulatorparameterne er ikke testet på systemet da vi pga. uforutsette hendelser ikke fikk tid til å teste både Cohen Coon og Ziegler Nichols regulatorparametre på systemet.

| | K_p | T_r | T_d |
|-----|---|--|---------------------------------------|
| P | $\frac{v_0}{K_0 \cdot \tau_0} \left[1 + \frac{\tau_0}{3v_0} \right]$ | | |
| PI | $\frac{v_0}{K_0 \cdot \tau_0} \left[0.9 + \frac{\tau_0}{12v_0} \right]$ | $\frac{\tau_0 [30v_0 + 3\tau_0]}{9v_0 + 20\tau_0}$ | |
| PID | $\frac{v_0}{K_0 \cdot \tau_0} \left[\frac{4}{3} + \frac{\tau_0}{4v_0} \right]$ | $\frac{\tau_0 [32v_0 + 6\tau_0]}{13v_0 + 8\tau_0}$ | $\frac{4\tau_0 v_0}{11v_0 + 2\tau_0}$ |

Tabell 16 - Cohen Coon regulatorparametre

| U [%] | K_p | T_r |
|-------|--|---|
| 30 | $\frac{v_0}{K_0 \cdot \tau_0} \left[0.9 + \frac{\tau_0}{12v_0} \right]$ $= \frac{2}{0,17595563 \cdot 4} \left[0.9 + \frac{4}{12 \cdot 2} \right]$ $= 3.03106$ | $\frac{\tau_0 [30v_0 + 3\tau_0]}{9v_0 + 20\tau_0}$ $= \frac{4[30 \cdot 2 + 3 \cdot 4]}{9 \cdot 2 + 20 \cdot 4}$ $= 2.93877$ |
| 35 | $\frac{v_0}{K_0 \cdot \tau_0} \left[0.9 + \frac{\tau_0}{12v_0} \right]$ $= \frac{1}{0,19743981 \cdot 3} \left[0.9 + \frac{3}{12 \cdot 1} \right]$ $= 1.94151$ | $\frac{\tau_0 [30v_0 + 3\tau_0]}{9v_0 + 20\tau_0}$ $= \frac{1[30 \cdot 3 + 3 \cdot 1]}{9 \cdot 3 + 20 \cdot 1}$ $= 1.97872$ |
| 40 | $\frac{v_0}{K_0 \cdot \tau_0} \left[0.9 + \frac{\tau_0}{12v_0} \right]$ $= \frac{2}{0,18724771 \cdot 2} \left[0.9 + \frac{2}{12 \cdot 2} \right]$ $= 5.25151$ | $\frac{\tau_0 [30v_0 + 3\tau_0]}{9v_0 + 20\tau_0}$ $= \frac{2[30 \cdot 2 + 3 \cdot 2]}{9 \cdot 2 + 20 \cdot 2}$ $= 2.27586$ |
| 42 | $\frac{v_0}{K_0 \cdot \tau_0} \left[0.9 + \frac{\tau_0}{12v_0} \right]$ $= \frac{2}{0,18368603 \cdot 1.5} \left[0.9 + \frac{1.5}{12 \cdot 2} \right]$ $= 6.98655$ | $\frac{\tau_0 [30v_0 + 3\tau_0]}{9v_0 + 20\tau_0}$ $= \frac{1.5[30 \cdot 2 + 3 \cdot 1.5]}{9 \cdot 2 + 20 \cdot 1.5}$ $= 2.01562$ |
| 45 | $\frac{v_0}{K_0 \cdot \tau_0} \left[0.9 + \frac{\tau_0}{12v_0} \right]$ $= \frac{3}{0,18312634 \cdot 1.5} \left[0.9 + \frac{1.5}{12 \cdot 3} \right]$ $= 10.28433$ | $\frac{\tau_0 [30v_0 + 3\tau_0]}{9v_0 + 20\tau_0}$ $= \frac{1.5[30 \cdot 3 + 3 \cdot 1.5]}{9 \cdot 3 + 20 \cdot 1.5}$ $= 2.48684$ |
| 50 | $\frac{v_0}{K_0 \cdot \tau_0} \left[0.9 + \frac{\tau_0}{12v_0} \right]$ | $\frac{\tau_0 [30v_0 + 3\tau_0]}{9v_0 + 20\tau_0}$ |

| | | |
|----|--|---|
| | $= \frac{2}{0,18708015 \cdot 1} \left[0,9 + \frac{1}{12 \cdot 2} \right]$ $= 10,06698$ | $= \frac{1[30 \cdot 2 + 3 \cdot 1]}{9 \cdot 2 + 20 \cdot 1}$ $= 1,65789$ |
| 61 | $\frac{v_0}{K_0 \cdot \tau_0} \left[0,9 + \frac{\tau_0}{12v_0} \right]$ $= \frac{2}{0,17796118 \cdot 1,5} \left[0,9 + \frac{1,5}{12 \cdot 2} \right]$ $= 7,21131$ | $\frac{\tau_0[30v_0 + 3\tau_0]}{9v_0 + 20\tau_0}$ $= \frac{1,5[30 \cdot 2 + 3 \cdot 1,5]}{9 \cdot 2 + 20 \cdot 1,5}$ $= 2,01562$ |
| 74 | $\frac{v_0}{K_0 \cdot \tau_0} \left[0,9 + \frac{\tau_0}{12v_0} \right]$ $= \frac{2,5}{0,14048639 \cdot 1} \left[0,9 + \frac{1}{12 \cdot 2,5} \right]$ $= 16,60896$ | $\frac{\tau_0[30v_0 + 3\tau_0]}{9v_0 + 20\tau_0}$ $= \frac{[30 \cdot 2,5 + 3 \cdot 1]}{9 \cdot 2,5 + 20 \cdot 1}$ $= 1,83529$ |
| 85 | $\frac{v_0}{K_0 \cdot \tau_0} \left[0,9 + \frac{\tau_0}{12v_0} \right]$ $= \frac{2,5}{0,09939677 \cdot 1,5} \left[0,9 + \frac{1,5}{12 \cdot 2,5} \right]$ $= 15,92942$ | $\frac{\tau_0[30v_0 + 3\tau_0]}{9v_0 + 20\tau_0}$ $= \frac{[30 \cdot 2,5 + 3 \cdot 1,5]}{9 \cdot 2,5 + 20 \cdot 1,5}$ $= 1,51428$ |

Tabell 17 - Utregning av regulatorparametre Cohen Coon

| U [%] | K_p | T_r |
|-------|----------|---------|
| 30 | 3.03106 | 2.93877 |
| 35 | 1.94151 | 1.97872 |
| 40 | 5.25151 | 2.27586 |
| 42 | 6.98655 | 2.01562 |
| 45 | 10.28433 | 2.48684 |
| 50 | 10.06698 | 1.65789 |
| 61 | 7.21131 | 2.01562 |
| 74 | 16.60896 | 1.83529 |
| 85 | 15.92942 | 1.51428 |

Tabell 18 - Oppsummerte resultater for PI-regulator Cohen Coon

For å nå kunne konstatere transferfunksjonene til PI-regulatoren kan vi sette inn utregnet verdier fra tabellen over inn i formelen: $G_R(s) = K_p \left(\frac{T_i s + 1}{T_i s} \right)$. Resultatene blir da:

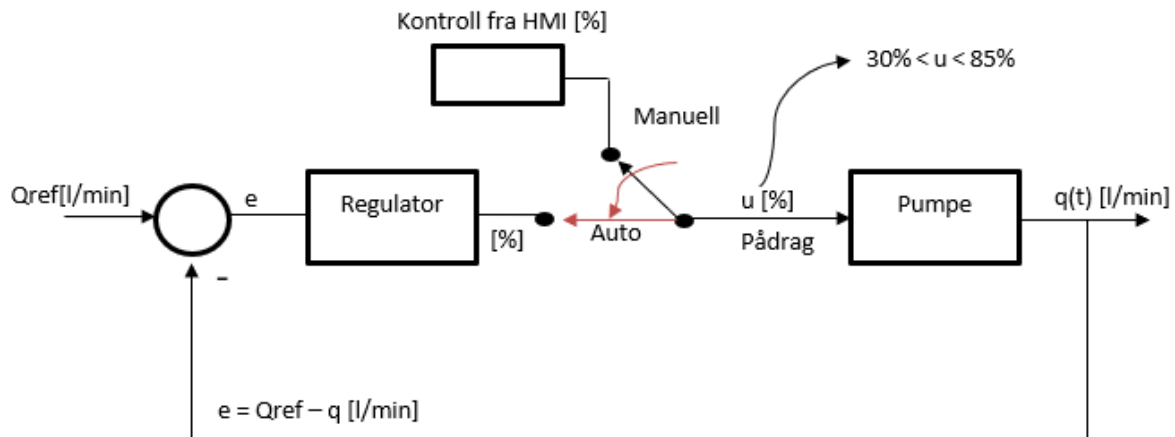
| U [%] | TF for regulatoren |
|-------|--|
| 30 | $G_R(s) = 3,03106 \left(\frac{2,93877 \cdot s + 1}{2,93877 \cdot s} \right)$ |
| 35 | $G_R(s) = 1,94151 \left(\frac{1,97872 \cdot s + 1}{1,97872 \cdot s} \right)$ |
| 40 | $G_R(s) = 5,25151 \left(\frac{2,27586 \cdot s + 1}{2,27586 \cdot s} \right)$ |
| 42 | $G_R(s) = 6,98655 \left(\frac{2,01562 \cdot s + 1}{2,01562 \cdot s} \right)$ |
| 45 | $G_R(s) = 10,28433 \left(\frac{2,48684 \cdot s + 1}{2,48684 \cdot s} \right)$ |

| | |
|----|--|
| 50 | $G_R(s) = 10.06698 \left(\frac{1.65789 \cdot s + 1}{1.65789 \cdot s} \right)$ |
| 61 | $G_R(s) = 7.21131 \left(\frac{2.01562 \cdot s + 1}{2.01562 \cdot s} \right)$ |
| 74 | $G_R(s) = 16.60896 \left(\frac{1.83529 \cdot s + 1}{1.83529 \cdot s} \right)$ |
| 85 | $G_R(s) = 15.92942 \left(\frac{1.51428 \cdot s + 1}{1.51428 \cdot s} \right)$ |

Tabell 19 - Transferfunksjon for PI-regulator Cohen Coon

C.8 Utledning av reguleringsalgoritme (PID-regulator)

For å kunne starte med utledningen av en reguleringsalgoritme for systemet ble det repetert stoff fra ELE106 – Reguleringsteknikk 2. I dette emnet er det blitt undervist i diskretisering av PID-regulator. Under er utledningen av reguleringsalgoritmen presentert. Innspill til utledning er hentet fra PDF: Diskret PID-regulator, laget av Emil Cimpan. PDF-en vil bli vedlagt denne bacheloroppgaven.



Figur 33 - Blokkdiagram over reguleringsløyfen

UTLEDNING AV ALGORITMEN

Notasjoner som er viktig å notere seg i arbeidet med utledningen av algoritmen [8]

$y(t) = q(t) =$ utgangen til reguleringsløyfen

$r(t) = q_{ref}(t) =$ inngangen til reguleringsløyfen

$u(t) =$ prosessens pådrag (er også regulatorens utgang)

$u_0 =$ prosessens nominelle pådrag (holder prosessen i ønsket arbeidspunkt)

$u_P, u_I, u_D =$ PID – regulatorens komponentbidrag ($P =$ proporsjonal, $I =$ integral, $D =$ derivat)

$K_R, T_i, T_d =$ PID – regulatorens paramtre ($K_R =$ forsterkning, $T_i =$ integraltid, $T_d =$ derivattid)

$e(t) =$ avviket til prosessen (dette er inngangen til regulatoren)

$e_f(t) =$ prosessens lavpassfiltrerte avvik (derivatleddet)

PID-regulator i tidsdomenet:

$$u(t) = u_0 + u_P(t) + u_I(t) + u_D(t) = u_0 + K_1 e(t) + K_2 \int_0^t e(\tau) d\tau + K_3 \frac{de_f(t)}{dt}$$

Vi ønsker å forenkle uttrykket, setter derfor K_1 som felles faktor, og får:

$$u(t) = u_0 + K_1 \left[e(t) + \frac{K_2}{K_1} \int_0^t e(\tau) d\tau + \frac{K_3}{K_1} \frac{de_f(t)}{dt} \right]$$

Vi kjenner til at $K_R = K_1$, $\frac{1}{T_i} = \frac{K_2}{K_1}$, $T_d = \frac{K_3}{K_1}$

Dette gir:

$$u(t) = u_0 + K_R \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de_f(t)}{dt} \right]$$

Noter deg at sammenhengen mellom $e_f(t)$ og $e(t)$ er gitt ved:

$$E_f(s) = \frac{1}{T_f s + 1} \cdot E(s)$$

Filtertiden T_f er gitt ved $T_f = T_d/n$, n er som oftest lik 10.

Tilleggsnotasjoner som benyttes for å utlede den diskrete PID algoritmen:

u_k = prosessens pådrag

u_{k-1} = prosessens forrige pådrag

r_k = prosessens inngang

y_k = prosessens utgang

e_k = prosessens avvik

e_{fk} = prosessens filteravvik (gjelder for derivatleddet)

e_{fk-1} = prosessens forrige filteravvik

e_{fk-2} = filteravviket før e_{fk-1}

T_f = prosessens filtertid

T = regulatorens samplingstid (1 sek hos oss)

$T_i = \text{regulatorens integraltid}$

$T_d = \text{regulatorens derivattid}$

$K_R = \text{regulatorens forsterkning}$

Diskretisering av PID-regulator:

Fra utledningen av PID-regulator i tidsdomenet kjenner vi til:

$$u(t) = u_0 + K_R \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de_f(t)}{dt} \right]$$

Vi starter med å derivere uttrykket med hensyn på t fordi det er ønskelig å bli kvitt integralet fra PI-del.

$$\frac{du(t)}{dt} = u'(t) = K_R \cdot e'(t) + \frac{K_R \cdot e(t)}{T_i} + K_R \cdot T_d \cdot e''_f(t)$$

Videre blir Eulers bakover metode benyttet.

$$u'_k \approx \frac{u_k - u_{k-1}}{T}$$

$$e'_k \approx \frac{e_k - e_{k-1}}{T}$$

Den dobbeltderiverte av $e_f(t)$ tilnærmes ved å bruke Eulers metode to ganger:

$$e''_{f_k} \approx \frac{e'_{f_k} - e'_{f_{k-1}}}{T} \approx \frac{1}{T} \left(\frac{e_{f_k} - e_{f_{k-1}}}{T} - \frac{e_{f_{k-1}} - e_{f_{k-2}}}{T} \right) = \frac{e_{f_k} - 2e_{f_{k-1}} + e_{f_{k-2}}}{T^2}$$

Ved å sette dette inn i det deriverte uttrykket får vi:

$$\frac{u_k - u_{k-1}}{T} = K_R \cdot \frac{e_k - e_{k-1}}{T} + \frac{K_R}{T_i} \cdot e_k + \frac{K_R \cdot T_d}{T^2} \cdot (e_{f_k} - 2e_{f_{k-1}} + e_{f_{k-2}})$$

Dersom vi multipliserer hele likningen med T og løser for u_k får vi:

$$u_k = u_{k-1} + K_R \cdot e_k - e_{k-1} + \frac{K_R \cdot T}{T_i} \cdot e_k + \frac{K_R \cdot T_d}{T} \cdot (e_{f_k} - 2e_{f_{k-1}} + e_{f_{k-2}})$$

Utleddning av den diskretiserte filteralgoritmen:

Vi har fra tidligere:

$$E_f(s) = \frac{1}{T_f s + 1} \cdot E(s) \rightarrow E_f(s) T_f s + E_f(s) = E(s)$$

Ved å ta i bruk invers Laplacetransformering får vi:

$$T_f \cdot e'_f(t) + e_f(t) = e(t)$$

Videre tas Eulers bakover metode i bruk. Dette gir:

$$e'_{f_k} \approx \frac{e_{f_k} - e_{f_{k-1}}}{T} \rightarrow T_f \cdot \frac{e_{f_k} - e_{f_{k-1}}}{T} + e_{f_k} = e_k$$

Hele likningen blir til slutt multiplisert med T/T_f for å unngå store forsterkninger, dette gir [8]:

$$e_{f_k} - e_{f_{k-1}} + \frac{T}{T_f} \cdot e_{f_k} = \frac{T}{T_f} \cdot e_k \rightarrow \left(\frac{T}{T_f} + 1 \right) \cdot e_{f_k} = e_{f_{k-1}} + \frac{T}{T_f} \cdot e_k$$

$$e_{f_k} = \frac{1}{\frac{T}{T_f} + 1} \cdot e_{f_{k-1}} + \frac{\frac{T}{T_f}}{\frac{T}{T_f} + 1} \cdot e_k$$

Oppsummerte resultater fra diskretisert PID algoritme [8]

$$e_k = r_k - y_k$$

$$e_{f_k} = \frac{1}{\left(\frac{T}{T_f}\right) + 1} \cdot e_{f_{k-1}} + \frac{\left(\frac{T}{T_f}\right)}{\left(\frac{T}{T_f}\right) + 1} \cdot e_k$$

$$u_k = u_{k-1} + K_R \cdot (e_k - e_{k-1}) + \frac{K_R \cdot T}{T_i} \cdot e_k + \frac{K_R \cdot T_d}{T} \cdot (e_{f_k} - 2 \cdot e_{f_{k-1}} + e_{f_{k-2}})$$

$$\text{Anti wind - up: } u_{min} < u_k < u_{max}$$

C.9 Implementering av PID regulator til program

```

1 //Regner ut prosessens avvik
2 #Avvik := #Onsket_Flowrate - #Naverende_Flowrate;
3
4 //Dersom prosessens avvik er lik 0 startes ikke reguleringen
5 IF #Avvik = 0 THEN
6
7     //Pådrag_1 er pådraget til pumpen, pådraget vil forbli det samme
8     //Regner pådraget om til frekvens og gjør om til int for å sende til frekvensomformer
9     "Frekvensberegning"(Paadrag := #Pådrag_1,
10         frekvens => #Pådrag_til_Frekvens);
11     #Frekvens_ut := REAL_TO_INT(#Pådrag_til_Frekvens);
12
13 ELSE
14
15     //Sjekker om avviket (ek) endrer seg - lagrer forrige avvik
16     IF (#ek > #Avvik OR #ek < #Avvik) THEN
17         #"ek-1" := #ek;
18         #ek := #Avvik;
19
20         //Filteravviket til prosessen
21         //Dette leddet er bare nødvendig dersom en ønsker å benytte PID regulator
22         //hos oss er dette leddet 0 da vi benytter oss av PI regulator
23         #Tf := #Td / 10;
24         IF (#Td = 0) THEN
25             #Filteravvik := 0;
26         ELSE
27             #Filteravvik := (1 / ((#T / #Tf) + 1)) * #"efk-1" + ((#T / #Tf) / ((#T / #Tf) + 1)) * #ek;
28         END_IF;
29
30         //Sjekker om filteravviket endrer seg - lagrer de to siste filteravvikene i variabler
31         IF #efk > #Filteravvik OR #efk < #Filteravvik THEN
32             #"efk-2" := #"efk-1";
33             #"efk-1" := #efk;
34             #efk := #Filteravvik;
35         END_IF;
36
37
38         //Prosessens pådrag
39         #Pådrag := #"uk-1" + #KR * (#ek - #"ek-1") + ((#KR * #T) / #Ti) * #ek + ((#KR * #Td) / #T) * (#"efk-2" * #"efk-1" + #"efk-2");
40
41         //Sjekker om pådraget (uk) endrer seg - lagrer forrige pådrag
42         IF (#uk > #Pådrag OR #uk < #Pådrag) THEN
43
44             //Sjekker om pådrag (uk) er innenfor området (anti-windup) slik at regulatoren ikke
45             //regulerer et større pådrag enn det systemet takler
46             //dersom det er innenfor lagres forrige pådrag
47             IF #Pådrag > 30 AND #Pådrag < 95 THEN
48                 #"uk-1" := #uk;
49                 #uk := #Pådrag;
50
51                 //Gjør om pådraget til frekvens
52                 "Frekvensberegning"(Paadrag := #uk,
53                     frekvens => #Pådrag_til_Frekvens);
54
55                 //Sender ut omgjort frekvens til frekvensomformeren
56                 #Frekvens_ut := REAL_TO_INT(#Pådrag_til_Frekvens+"Tag".Paadrag);
57
58                 //Viser det regulerte pådraget på HMI-skjerm
59                 "Tag".Regulert_pådrag := #uk;
60             ELSE
61                 //Dersom pådraget ikke er innenfor området er pådraget lik forrige pådrag
62                 #Pådrag := #"uk-1";
63             END_IF;
64
65         ELSE
66             #uk := #Pådrag;
67             #"uk-1" := #Pådrag_1;
68         END_IF;
69     END_IF;
70 END_IF;

```

Appendiks D Litteraturstudie

D.1 Geotermi

Geotermi kommer av gresk, «geo» som betyr jord og «Thermos» som betyr vann [9].

D.1.1 Geotermisk energi

Geotermisk energi er energi i form av varme lagret i bergartene under jordens overflate. Energien finnes i to hovedtyper: høytemperatur geotermisk energi og lavtemperatur geotermisk energi. Geotermisk energi er miljøvennlig og fornybar, men svært lite utnyttet på verdensbasis [2]. Norske forskningsmiljøer og næringsliv sitter på stor kunnskap om brønnboring og reservoarstyring her på sokkelen. Det kan tenke seg at dette vil være ekstremt nyttig i arbeidet med geotermisk energi og derfor kan bli en etterspurt eksportartikkel.

Geotermisk energi kan utvinnes ved hjelp av to ulike systemer: Hot dry rock system, som er et varmesystem der vann pumpes gjennom et lukket rørsystem i fjellet. Hot wet rock system er et varmesystem der vann pumpes gjennom fjellets naturlige sprekker. Jo mer sprekker jo bedre sirkulasjon av vannet.

D.1.1.2 Høytemperatur geotermisk energi

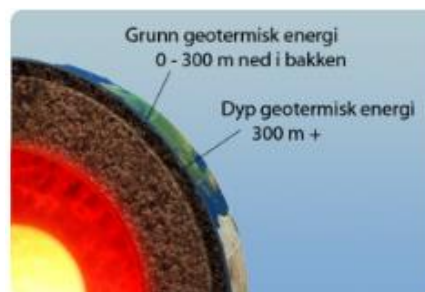
Høytemperatur geotermisk energi kalles også dyp geotermisk energi – dette fordi varmeenergien kommer fra dypere enn 300 meter fra overflaten. Sett bort i fra vulkanske områder er det to kilder til denne energiformen: den opprinnelige varmen fra jorda utgjør ca. 1/3, mens radioaktivitet i jordskorpen utgjør ca. 2/3 (Her frigjøres energi når radioaktive isotoper som for eksempel thorium og uran sender ut stråling) [10].

Den store forskjellen mellom jordens overflate og jordens indre skaper en kontinuerlig varmestrøm fra jordens indre til overflaten. Enkelte steder er denne varmestrømmen ekstra sterk. Dette for eksempel rundt de vulkanske områdene.

I dag er dyp geotermisk energi bare tatt i bruk i sprekke- og grenseområdene mellom de tektoniske platene.

D1.1.3 Lavtemperatur geotermisk energi

Et annet navn på lavtemperatur geotermisk energi er grunnvarme. Denne typen varme hentes ut ved lave temperaturer (rundt 7-8 grader celsius) og varmes opp av varmepumper. Grunnvarme blir brukt til oppvarmingsformål når temperaturen i produsert vann blir høyere enn 40 grader celsius. Ved lavere temperaturer brukes den som prosessvarme – oftest i form av varmekilde til varmt vann [10].



Figur 34 – Geotermisk Energi, illustrasjon hentet fra [10]

D.1.2 Geotermisk energi i Norge

Per dags dato utnytter vi ikke dyp geotermisk energi i Norge. Vi utnytter bare geotermisk energi i form av grunnvarmebaserte varmepumper. For at vi skal kunne ta i bruk dyp geotermisk energi her i Norge er det ønskelig at vi får redusert borekostnadene slik at det vil bli lønnsomt å bore seg ned 4-5km. Vannet vil da ha en temperatur mellom 50 til 100 grader celsius, og kan da brukes til oppvarming av

hus. Områder man tror kan ha fremtidig potensiale innen dyp geotermisk energi er Oslo, Bergen og Svalbard [10].

D1.2.1 Utvinning av geotermisk energi i Bergen

Løvstakken kan bli sett på som Bergens egen radiator da fjellformasjonen består av granitt og granittisk gneis med naturlig forhøyet radioaktivitet – noe som gjør det ekstra varmt i berggrunnen. Radioaktiviteten gjør at det kan være gunstig å bore etter dyp jordvarme. De fleste andre steder i Norge kan det se ut som man må bore 6-7 kilometer for at det skal være varmt nok til å brukes, mens her i Bergen kan det holde med 3-4 kilometer [1]. Dette betyr langt lavere borekostnader.

Forskere ved UiB vil bruke fjellets naturlige sprekker til å hente opp varme. Dette kan gjøres ved å pumpe kaldt vann ned og få «gratis» oppvarmet vann tilbake, men for å kunne utvinne geotermisk energi er det tre geologiske forutsetninger som må oppfylles [10]:

- En porøs og gjennomtrengelig reservoarbergart som vann både kan lagres og varmes i.
- En ugjennomtrengelig takbergart som vannet ikke kan renne gjennom. Det bør også være en ugjennomtrengelig bergart under bergarten som vannet er lagret i, slik at vannet ikke forsvinner nedover.
- Det siste en trenger er en varmekilde som varmer opp vannet, for eksempel et varmt fjell.

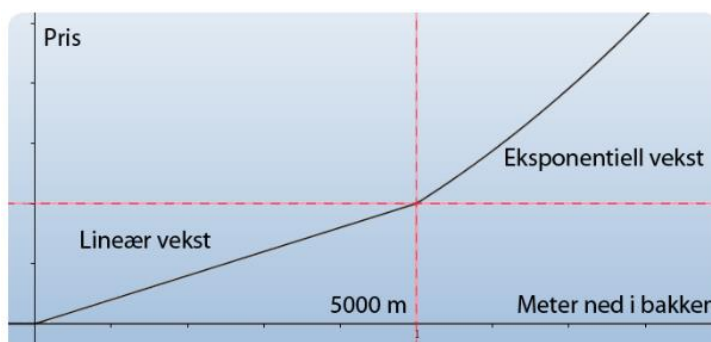
Alle disse geologiske forutsetningene oppfylles av Løvstakken, da granitt er det mest gunstige materiale for utnyttelse av geotermisk energi. Dette fordi granitt er en kompakt stein som gjør at den kan lagre mye energi, men som også betyr at den er hard.

D.1.3 Bruk av geotermisk energi

Geotermisk energi kan brukes til kraftproduksjon, prosessvarme, oppvarming og nedkjøling. Bruksområdet og utvinningsmetoden avhenger av temperaturen [10].

D.1.4 Utvikling

Det største problemet knyttet til geotermisk energi er borekostnadene. Boreutviklingen følger i hovedsak oljeindustrien – dette resulterer i at oljeprisen er viktig i utviklingen av et nytt, bedre og billigere utstyr. Med dagens oljeboringsteknologier kan en bore 5 kilometer til vann. Kostnadsøkningen for å bore dypere kan en se i illustrasjonen ved siden av. Når man har passert 5 kilometer vil kostnadene skyte i været. Dette fordi boreteknologien ofte svikter raskt på et slikt dyp, gjerne forårsaket av faktorer som høyt trykk, harde/seige bergarter og forurenset vann [11]. Geotermisk boreenergi må i fremtiden bli både raskere og billigere.



Figur 35 – Kostnadsøkning knyttet til boring av brønner – Illustrasjon hentet fra [11]

D.2 Borevæske

Borevæsken spiller en svært viktig rolle i en boreprosess. Hele prosessen avhenger av at væsken har en korrekt sammensetning, tilpasset massene og formasjonene det skal bores gjennom. Rettere sagt så avhenger prosessen av væskens reologiske egenskaper. Egenskaper som har med væskens flyt og deformasjon å gjøre, og hvordan viskositeten til væsken vil endre seg ved ytre påkjenninger og trykk [12].

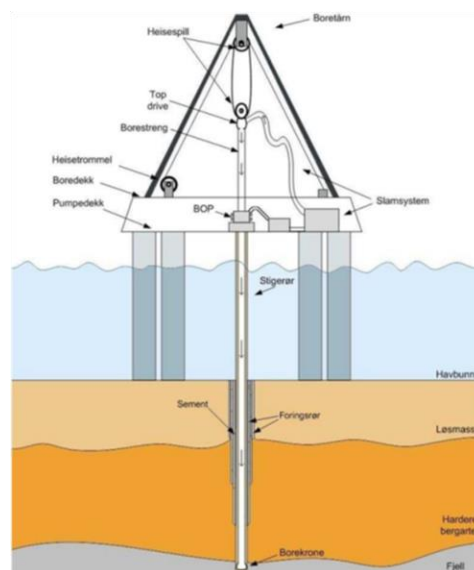
Borevæsken pumpes nedover og føres i borerøret og ut gjennom borekronen som er plassert i enden av borestrengen. Herfra spyles væsken videre oppover mot overflaten igjen og tar med seg borekaks på veien. For at en boreprosess skal kunne gjennomføres er det strengt nødvendig at borevæsken som brukes holder de riktige egenskapene konstant gjennom hele prosessen. Dette fordi store endringer i borevæskens egenskaper kan føre til katastrofale hendelser som kan involvere store kostnader og tap, og i verste fall tap av liv.

En av borevæskens hovedoppgaver er at den skal kunne klare å opprettholde trykket i borehullet - dette for å unngå at borehullet skal falle sammen. Når den spyles gjennom borekronen har den til hensikt å rense og sørge for at det ikke sitter rester av borekaks igjen, slik at den skjærer seg. Videre fra borekronen skal væsken kunne løfte borekaket til overflaten. Væsken skal også kunne klare å holdes i suspensjon dersom systemet stanses. På veien opp igjen vil væsken være med å kjøle og redusere friksjonen mellom borestreng og veggen i borehullet.



Figur 37 - Viskositetssjekk for borevæske utført for hånd hentet fra ndla.no [19]

I tillegg til dette blir også det kjemiske innholdet sjekket, en borevæske kan være vannbasert eller oljebasert. Den vannbaserte foretrekkes med tanke på skade og forurensing av miljø. Med dette fokuset det brukt vannbaserte væsker der hvor det er mulig, men det finnes situasjoner hvor den oljebaserte væsken må prioriteres. Ved operasjoner på brønner hvor det kan være utfordrende å holde brønnen stabil eller hvor



Figur 36 – Illustrasjon av borerigg hentet fra tidligere bacheloroppgave (2015) [18]

det kan oppstå høy temperatur vil det være en fordel å benytte oljebasert borevæske. Høye temperaturer kan oppstå i formasjoner hvor det siver ut sure gasser som CO₂ eller H₂S. Andre utfordrende situasjoner kan være ved boring gjennom reservoar, eller formasjoner med ekstremt svellende leire, her er det spesielt viktig at arbeidet går som det skal uten at formasjonen sveller opp eller skades under boreoperasjonen. Fordelene som ligger ved denne oljebaserte varianten er at den smører og kjøler utstyret bedre enn den vannbaserte. I tillegg vil den ikke reagere med formasjonsleiren, siden denne type væske er en såkalt ikke-polar væske. Altså en væske som har et symmetrisk ladningsforhold i molekylene, som videre fører til at leiren ikke vil kunne absorbere væsken [13]. Dersom en væske reagerer med formasjonsleiren vil det føre til en oppsvulming av leiren i borehullet.

Når det må tas i bruk borevæske basert på olje finnes det strenge regler for videre håndtering av borekaks som blir hentet opp. Alt borekaks som kommer til overflaten har rester av olje og må derfor fraktes inn til land for rensing og deponering på fyllplass.

Det var tidligere vanlig at borevæsken inneholdt opp til flere ulike kjemikalier og tilsetningsstoffer. Nå i senere tid blir det brukt få tilsetningsstoffer, noe som gjør det enklere å vedlikeholde, samt det å oppdage feil eller uforutsette endringer i formasjonene.

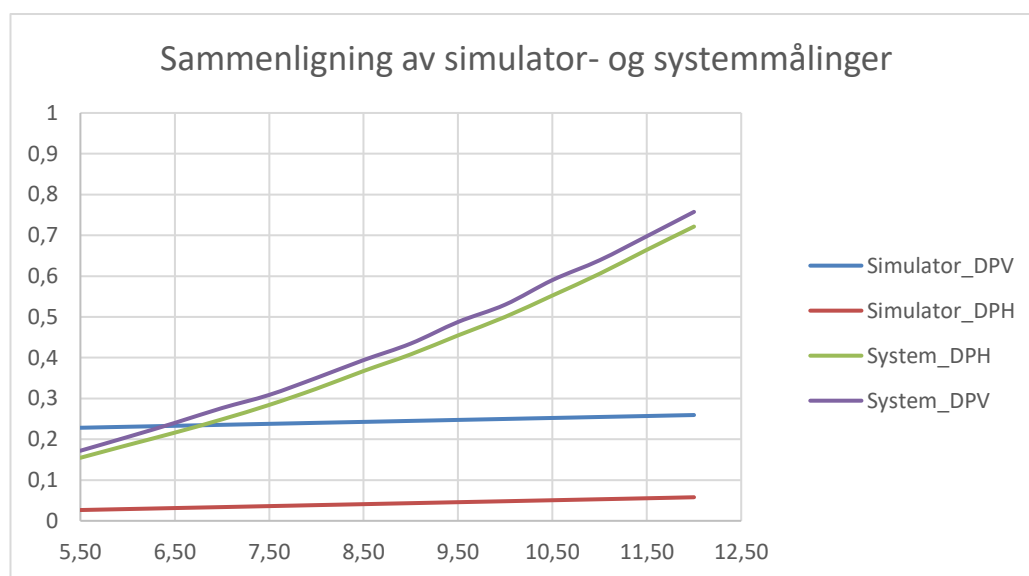
Dersom tilsetningene endres underveis og ikke lenger holder den viskositeten den skal, kan dette føre til flere ulike uønskede hendelser under boring. Som tidligere nevnt kan det oppstå svelling, det kan også oppstå en utvasking hvor massene i borehulls-veggen skylles ut og ødelegger føringen i brønnen [14]. Når væsken ikke holder den korrekte viskositeten tilpasset formasjonene det bores gjennom vil ikke væsken få gjort alle oppgavene den har. Det kan være at den ikke får dekket borehulls-veggen med en såkalt filterkake som skal forhindre at gasser eller væsker siver gjennom hull-veggen. Eller at den ikke tilstrekkelig smører og kjøler borestrengen, samtidig som den ikke reduserer friksjonen til borestrengen tilstrekkelig. Det kan føre til at borestrengen kjører seg fast, eller borekronen slites eller kjøres fast. Dette kan i verstefall føre til full stopp i arbeidet, og utstyr som må fjernes og erstattes, noe som gir svært høye kostnader i et så omfattende arbeid.

Appendiks E Feilsøking av viskositet

Mot slutten av prosjektet ble det oppdaget feil ved målingene i systemet. Det ble oppdaget en viskositet på rundt 65 centipoise med et 30% pådrag. Viskositeten økte med pådraget. Med tanke på at det var rent vann i systemet kunne dette ikke stemme da viskositeten til vann er tilnærmet lik 1 centipoise. I teorien skal heller ikke viskositeten øke med flowraten for vann da det er en newtonsk væske. Forholdet mellom trykkene var også feil. Som resultat av dette viste tettheten feil verdi. I dette kapittelet kan du lese mer om feilsøkingen knyttet til disse problemene.

Ved å undersøke formlene som ble brukt var det mulig å få en indikasjon på at trykkene var årsaken til at tettheten ikke stemte. For å beregne tettheten brukes nemlig forholdet mellom de to differansetrykkene. Dette førte til at trykkene blir undersøkt ytterligere. Systemet startes og flowraten økes gradvis opp til maks hastighet. Da viser det seg at forholdet mellom differansetrykkene endrer seg betraktelig. Når systemet står stille viser forholdet et tall på 0,2mBar, som er et optimalt forholdstall i denne sammenheng, og beregningen av tetthet er her korrekt. Men etter hvert som flowraten økes, øker også forholdstallet, det vertikale ligger omtrent jevn som det dobbelte av det andre. Som vil si at systemet med en flowrate på 0l/min og trykk verdier 0,0 og 0,2 gir et forhold på 0,2, imens ved en flow på 8l/min gir omtrent 0,3 og 0,6 Bar som gir et forhold på 0,3. Og slik økes forholdstallet med flowraten, og deretter økes også tettheten.

Det ble derfor besluttet at begge rørene legges ned for deretter å sjekke om de holder likt trykk ved stans, og ved maks hastighet på systemet. I teorien skulle trykksensorene gjøre det. Med begge rørene liggende horisontalt viser de så godt som 0 Bar begge to. Frem til systemet kjøres opp til maks hastighet, da viser det seg at trykket for det vertikale røret om er omtrent dobbelt så stort som trykket i det horisontale trykkfallet. Det blir da besluttet å beregne et forholdstall for å utligne denne forskjellen mellom målingene. Ved å dele VDP på HDP ble forholdstallet på 1,85 som viser at det vertikale trykket er veldig nært to ganger større en det horisontale. For å korrigere målingene for dette avviket ble det horisontale røret multiplisert med 1,85. Forholdstallet ble så implementert i programmet og viste seg å fungere ved alle flowrater. Dette er ikke en optimal måte å fikse problemet



Figur 38 - Graf for sammenligning av målinger fra simulator og fysisk system

på, men siden verken skolen eller oppdragsgiver hadde HART kalibreringsverktøy ble det besluttet at vi skulle bruke forholdstallet som var implementert i programmet.

Dette problemet fikset derimot ikke viskositeten. Det ble bestemt at den beste løsningen ville være å sammenligne systemets målinger opp mot simulatorens beregninger. Målingene ble skrevet inn Excel - resultatene vises i graf for Figur 38. Her oppdages det ganske raskt at det er noe som ikke stemmer.

Systemets målinger viser en tydelig stigning etter hvert som flowraten økes, simulatoren derimot har en veldig liten stigning i forhold. Ved en nærmere titt på verdiene blir det lagt merke til at en endring i diameter gir stort utslag. Diameteren er satt ut ifra den informasjon at røret hadde en dimensjon på 0,5 tommer. Siden de beregnede verdiene gav omfattende endringer i målingene, ble det foretatt en måling av rørstykket som ble brukt i modulen. Når denne nye diameteren er blitt implementert merkes det stor forskjell i målingene, men viskositeten er fortsatt ikke slik den skal være.

Etter å ha gjennomgått flere målinger viser det seg at det er Reynoldstallet og Darcy om lager problemene. Det ble tidligere i samråd med oppdragsgiver gjort klart at systemet kom til å bli liggende i det laminære regimet. Det ble derfor kun tatt høyde for bruk av formelen for laminær strømming når det kom til Darcy og Reynoldstallet. Målingene derimot viser at Reynoldstallet aldri ligger under 2300 når vann kjøres gjennom systemet. Slik som vist Figur 39 og Figur 40, hvor vi har tatt utgangspunkt i en flowrate på 5,5l/min, markert i blått for begge figurene. Figur 39 viser utregninger hvor det er brukt laminær formel for Darcy, og for Figur 40 er det brukt formel for turbulent utregning av Darcy. Her kan vi videre se at beregningene gir ulike trykkverdier. Dette viser at formelen som er implementert i programmet nå må endres til reynoldstallet ved turbulent strømming, frem for reynoldstallet med laminærstrømming må endres. Dette implementeres både for simulatoren og systemets programkode. Simulatoren som ble brukt under denne feilsøkingen var simulator V1.

Når dette var på plass fikk vi en mye større likhet mellom simulator og fysisk system. Det manglet fortsatt noe justering i systemet, og målingene ble derfor sjekket opp mot de tredje måleverdiene som er beregnet i Excel. Etter en gjennomgang av alle formler og mellomregninger var nå alle målinger på plass.

| Tetthet | Flow l/min | Flow [m³/s] | Diameter [m] | Areal [m²] | Viskositet [Pa s] | Viskositet [cP] | Reynoldstallet | Dracy friction | Flowvelocity [m/s] | Lengde [m] | HorizontalTrykk [Pa] | HorizontalTrykk [Bar] | VertikalTrykk [Pa] | VertikalTrykk [Bar] |
|---------|------------|-------------|--------------|-------------|-------------------|-----------------|-------------------|------------------|--------------------|------------|----------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|
| 1000 | 1,0 | 1,66667E-05 | 0,00925 | 6,72006E-05 | 0,001 | 1 | 2294,125306 | 0,027897343 | 0,248013547 | 2,06 | 191,0773176 | 0,001910773 | 20399,67732 | 0,203996773 |
| 1000 | 2,0 | 3,33333E-05 | 0,00925 | 6,72006E-05 | 0,001 | 1 | 4588,250612 | 0,013948671 | 0,496027093 | 2,06 | 382,1546353 | 0,003821546 | 20590,75464 | 0,205907546 |
| 1000 | 3,0 | 0,00005 | 0,00925 | 6,72006E-05 | 0,001 | 1 | 6882,375917 | 0,009299114 | 0,74404064 | 2,06 | 573,2319529 | 0,00573232 | 20781,83195 | 0,20781832 |
| 1000 | 4,0 | 6,66667E-05 | 0,00925 | 6,72006E-05 | 0,001 | 1 | 9176,501223 | 0,006974336 | 0,992054186 | 2,06 | 764,3092705 | 0,007643093 | 20972,90927 | 0,209729093 |
| 1000 | 5,5 | 9,16667E-05 | 0,00925 | 6,72006E-05 | 0,001 | 1 | 12617,6891 | 0,0050722 | 1,364074506 | 2,06 | 1050,925247 | 0,010509252 | 21259,52525 | 0,212595252 |
| 1000 | 6,0 | 0,0001 | 0,00925 | 6,72006E-05 | 0,001 | 1 | 13764,75183 | 0,004649557 | 1,488081279 | 2,06 | 1146,463906 | 0,011464639 | 21355,06391 | 0,213550639 |
| 1000 | 7,0 | 0,000116667 | 0,00925 | 6,72006E-05 | 0,001 | 1 | 16058,87714 | 0,003985335 | 1,736094826 | 2,06 | 1337,541223 | 0,013375412 | 21546,14122 | 0,215461412 |

Figur 39 - Beregninger i Excel, Laminær utregning av Darcy

| Tetthet [kg/m³] | Flow [l/min] | Flow [m³/s] | Diameter [m] | Areal [m²] | Viskositet [Pa s] | Viskositet [cP] | Roughness [m] | Reynoldstallet | Dracy friction | Flowvelocity [m/s] | Lengde [m] | HorizontalTrykk [Pa] | HorizontalTrykk [Bar] | VertikalTrykk [Pa] | VertikalTrykk [Bar] |
|-----------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------------|-----------------|---------------|--------------------|------------------|--------------------|------------|----------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|
| 1000 | 1,0 | 1,66667E-05 | 0,00925 | 6,72006E-05 | 0,001 | 1 | 0,000003 | 2294,125306 | 0,048707753 | 0,248013547 | 2,06 | 333,6140981 | 0,003336141 | 20542,2141 | 0,205422141 |
| 1000 | 2,0 | 3,33333E-05 | 0,00925 | 6,72006E-05 | 0,001 | 1 | 0,000003 | 4588,250612 | 0,041734695 | 0,496027093 | 2,06 | 1143,41407 | 0,011434141 | 21352,01407 | 0,213520141 |
| 1000 | 3,0 | 0,00005 | 0,00925 | 6,72006E-05 | 0,001 | 1 | 0,000003 | 6882,375917 | 0,037950119 | 0,74404064 | 2,06 | 2339,386338 | 0,023393863 | 22547,98634 | 0,225479863 |
| 1000 | 4,0 | 6,66667E-05 | 0,00925 | 6,72006E-05 | 0,001 | 1 | 0,000003 | 9176,501223 | 0,035779871 | 0,992054186 | 2,06 | 3921,052199 | 0,039210522 | 24129,6522 | 0,241296522 |
| 1000 | 5,5 | 9,16667E-05 | 0,00925 | 6,72006E-05 | 0,001 | 1 | 0,000003 | 12617,68918 | 0,0337995 | 1,364074506 | 2,06 | 7002,974924 | 0,070029749 | 27211,57492 | 0,272115749 |
| 1000 | 6,0 | 0,0001 | 0,00925 | 6,72006E-05 | 0,001 | 1 | 0,000003 | 13764,75183 | 0,033327456 | 1,488081279 | 2,06 | 8217,712966 | 0,08217713 | 28426,31297 | 0,28426313 |
| 1000 | 7,0 | 0,000116667 | 0,00925 | 6,72006E-05 | 0,001 | 1 | 0,000003 | 16058,87714 | 0,032557253 | 1,736094826 | 2,06 | 10926,72788 | 0,109267279 | 31135,32788 | 0,311353279 |

Figur 40 - Beregninger i Excel, Turbulent utregning av Darcy

Appendiks F Forkortelser og ordforklaringer

| Forkortelser/Ord | Forklaring |
|-------------------------|---|
| CDT | Cybernetic Drilling Technologies (Oppdragsgiver) |
| cP | centipoise |
| HDP | Horisontalt differensialtrykk |
| VDP | Vertikalt differensialtrykk |
| HMI | Human Machine Interface |
| PLS | Programmerbar logisk styring |
| S7-1500 | Siemens Step 7 software for CPU 1500 typer [3] |
| SCL | Structured Control Language |
| TF | Transferfunksjon |
| TIA portal V15 | Programvaren som er blitt brukt til å utvikle simulator og hovedprogram |
| Viskositet | Indre friksjon i en væske – sterkt temperaturavhengig |

Tabell 20 - Ordforklaringer

Appendiks G Prosjektledelse og styring

G.1 Prosjektorganisasjon

Arbeidet har vært jevnt fordelt under hele prosjektperioden, men vi har allikevel hatt en viss form for ansvarsfordeling. Malin har i hovedsak hatt ansvaret for PLS-programmet mens Elín har hatt ansvaret for selve modulen, sett bort i fra dette er det meste av arbeid utført i felleskap. Teoriskrivning har også blitt jevnt fordelt på begge. I tillegg til dette har begge fungert som kontaktperson opp mot veileder og oppdragsgiver.

G.2 Fremdriftsplan

Da semesteret startet ble det satt opp en fremdriftsplan til hvordan vi trodde fremdriften ville være i løpet av prosjektperioden. Denne planen er presentert her:

| | | | | Uke | w2 | w3 | w4 | w5 | w6 | w7 | w8 | w9 | w10 | w11 | w12 | w13 | w14 | w15 | w16 | w17 | w18 | w19 | w20 | w21 | w22 | w23 | w24 | w25 | | |
|----|-------------------------------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------|------|-----|------|------|------|-----|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|--|--|
| | | | | Man | 7/1 | 14/1 | 21/1 | 28/1 | 4/2 | 11/2 | 18/2 | 25/2 | 4/3 | 11/3 | 18/3 | 25/3 | 1/4 | 8/4 | 15/4 | 22/4 | 29/4 | 6/5 | 13/5 | 20/5 | 27/5 | 3/6 | 10/6 | 17/6 | | |
| | | | | Fre | 11/1 | 18/1 | 25/1 | 1/2 | 8/2 | 15/2 | 22/2 | 1/3 | 8/3 | 15/3 | 22/3 | 29/3 | 5/4 | 12/4 | 19/4 | 26/4 | 3/5 | 10/5 | 17/5 | 24/5 | 31/5 | 7/6 | 14/6 | 21/6 | | |
| # | Aktivitet | Start Dato | Slutt Dato | Fram drift | Ansvarlig | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Innhenting av oppgaver | 1/9 | 1/11 | 100 % | alle | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Presentasjon av oppgaver for stud | 13/11 | | 100 % | Institutt | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Innlevering av oppgave ønsker | 20/11 | | 100 % | begge | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | Endelig tildeling av oppgaver | 27/11 | | 100 % | Institutt | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | Litteraturstudie og simulering | 7/1 | 15/2 | 100 % | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | Møte CDT - igangsetting av prosjekt | 14/1 | 14/1 | 100 % | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | Forstudie arbeid | 15/1 | 25/1 | 100 % | begge | ~200 timer | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | Metode undervisning | 8/1 | | 100 % | institutt | | 2t | 2t | 2t | 2t | | | 2t | | 2t | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | Møte HVL - gjennomgang mikseanlegg | 21/1 | 21/1 | 100 % | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | Forstudie innlevering | 31/1 | | 100 % | begge | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | Forslag til innkjøpsliste | 1/2 | 02. feb | 100 % | begge | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | Bacheloroppgave arbeid | 11/2 | | 100 % | begge | ~800 timer | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | Midtveis presentasjon | 1/4 | 5/4 | 100 % | begge | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | Bachelor oppgave seminar/ | 10/5 | | 100 % | begge | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | Bachelor oppgave innlevering | 31/5 | | 100 % | begge | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | Bachelor oppgave presentasjon | 5/6 | 12/6 | 50 % | begge | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | EXPO / Avslutningsfest | 13/6 | | 50 % | begge | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figur 41 - Fremdriftsplan

Etter hvert som tiden gikk og vi kom lengre ut i prosjektperioden møtte vi på uforutsette problemer. Disse forsinket det andre arbeidet en del – noe som gjorde at vi mistet litt tid. Slike hendelser er ikke mulig å forutse når en lager en fremdriftsplan, og gjør det vanskelig å følge fremdriftsplanen til punkt og prikke. Utenom de uforutsette problemene vi møtte på under prosjektperioden dukket det plutselig opp en 2-dagers konferanse knyttet til Geotermisk Energi. Konferansen holdt til på Fantoft. Det kom folk fra rundt omkring hele verden som hadde en spesiell interesse for geotermisk energi.

G.3 Risikoliste

| ID | Risiko | Sannsynlighet | Alvor | Konsekvens | Tiltak |
|-----|--|---------------|---------|---|--|
| R-1 | Oppdragsgiver og veileder er misfornøyd | Lav | Høy | Kan føre til ikke bestått bacheloroppgave. | <ul style="list-style-type: none"> • Planlegging. • Klare oppgaver og mål. • Klar arbeidsfordeling. |
| R-2 | Konflikter innad i gruppen | Lav | Middels | Lav produktivitet og et dårlig arbeidsmiljø som igjen kan føre til et dårlig sluttresultat. | <ul style="list-style-type: none"> • God kommunikasjon. • Huske på å hele tiden respektere andres meninger og ideer. • Ta pause når det trengs. |
| R-3 | Ødelagt utstyr | Middels | Middels | Taper tid da man kan risikere å måtte kjøpe nytt eller å komme opp med en annen løsning. | <ul style="list-style-type: none"> • Være varsom • Utnytte hverandres og andres kunnskap ved usikkerhet på hva som er rett og galt |
| R-4 | Rørkoblinger ikke tette | Middels | Lav | Taper tid. Må koble opp for så å tette med gjengeteip etc. på ny. | <ul style="list-style-type: none"> • Forsikre oss om at alle pakninger er riktige. • Forsikre oss om at gjengeteipen er tatt på rett og at niplene er stramt godt til. |
| R-5 | Sensorene trenger kalibrering/gir feil verdier da det er lenge siden de har vært brukt | Middels | Lav | Kan «tape» tid, men dersom det skjer får en lært litt innenfor det området også. | <ul style="list-style-type: none"> • Ta tester der vi vet hvilke resultater som skal komme. Vi kan ved hjelp av dette konstatere om sensoren fungerer slik den skal eller ikke. |

Tabell 21 - Risikoanalyse

Appendiks H Brukerdokumentasjon

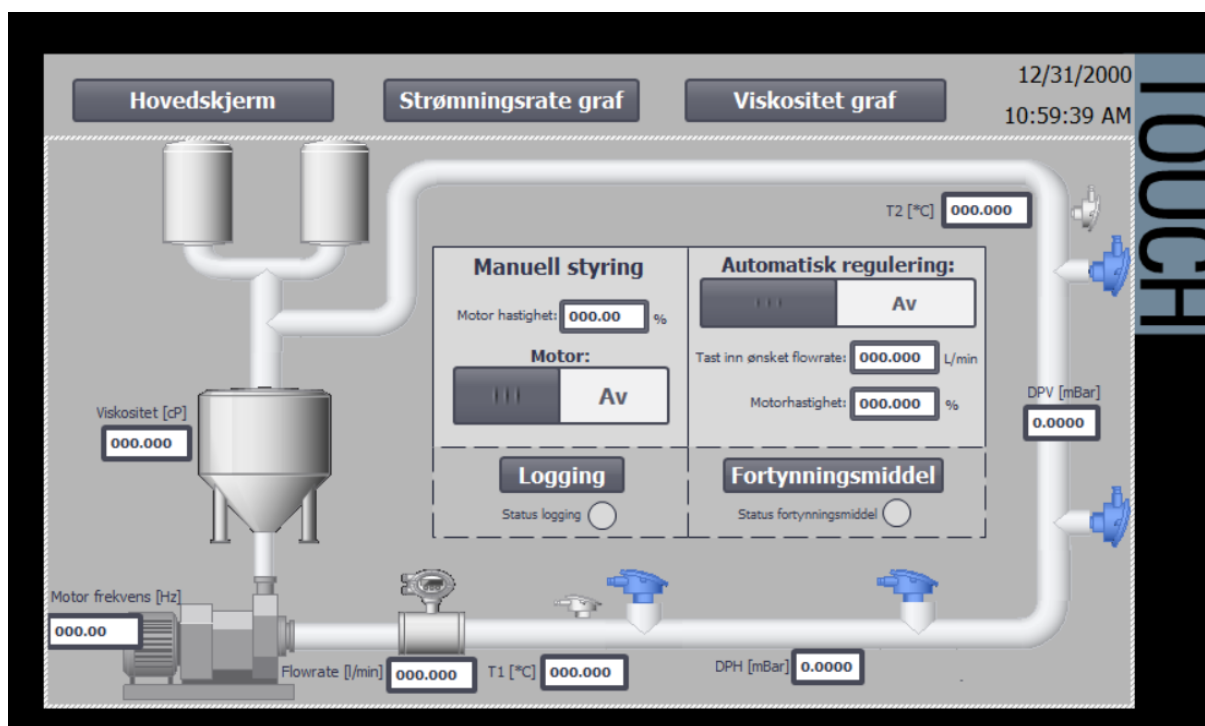
H.1 Styring av systemet

Dette programmet er ment for å styre systemet enten manuelt ved å sette pådraget til motoren, eller ved automatisk regulering av strømningshastighet. I tillegg kan viskositeten reguleres ved å tilsette fortykning ved hjelp av å åpne ventil inn til reguleringsløyfen, eller ved å tilsette, for hånd, fortykningsmiddel direkte til blandingstanken. Systemet styres ved hjelp av et HMI-panel. Nedenfor er en gjennomgang for hvordan programmet fungerer.

- HOVEDSKJERM

Når systemet starter opp vil HMI skjermen vise et skjermbilde tilsvarende Figur 42. Her har vi tre sentrale knapper, plassert øverst i skjermbildet. Den første knappen fører til hovedskjermen, som er den vi ser nedenfor. Knappen for «Strømningsrate graf» og «Viskositet graf» viser en kontinuerlig graf over systemets strømningsrate og væskens viskositet. Disse knappene vises på alle tre skjermene.

Hovedskjermen er den mest detaljerte og sentrale delen av systemet. Fra denne kan systemet styres, enten manuelt eller med automatisk regulering. I tillegg kan en følge med på alle sensorer i sirkulasjonssløyfen, samt logge målinger og tilføre fortykningsvæske.



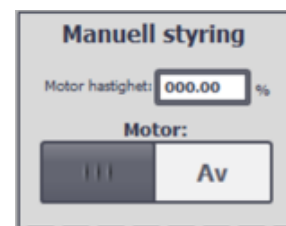
Figur 42 - HMI, Hovedskjerm for styring

Videre vil bruksmåten for manuell og automatisk regulering bli gjennomgått.

MANUELL STYRING

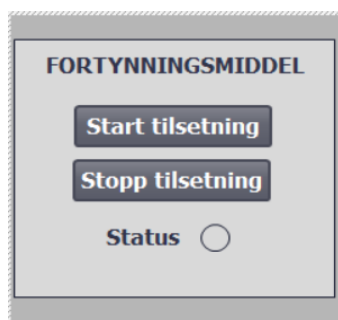
Under manuell styring kan en sette inn verdi for pådraget til motoren, i feltet merket «Motor hastighet». Pådraget oppgis i prosent av full hastighet.

Under er det plassert en skyve-bryter for å slå av og på motoren. Den skyves til høyre for å starte slik at feltet med «på» vises, og for å stoppe skyves den tilbake til utgangsposisjon mot venstre.



Figur 43 - Manuell styring

TILSETNING AV FORTYNNINGSMIDDEL



Figur 44 - HMI, Pop-up vindu for tilsetning

I tillegg til den manuelle styringen av motoren kan tilsetningen også styres manuelt. Under styringen for automatisk regulering er det plassert en knapp merket med «Fortynningsmiddel». Dersom denne trykkes får vi opp et nytt pop-up vindu som vist under i Figur 44.

Her har vi to knapper, en for å åpne ventilene til begge doseringstankene og en for å stenge dem igjen. Slik kan vi da manuelt styre tilsetningen av fortynningsvæske. Her er det også et indikeringslys som vil lyse grønt dersom «Start tilsetning» er trykket, og rødt dersom «Stopp tilsetning» er trykket. Se alltid til at den manuelle ventilen ned til sirkulasjonssløyfen er åpnet når dosering skal tilføres.

På grunn av systemets oppbygging vil det foreløpig kun bli brukt fortykning i tankene, fortykningen vil per nå tilføres for hånd gjennom trakten som er plassert over tanken.

AUTOMATISK REGULERING

For å bruke automatisk regulering foreligger det noen forhåndsregler.

Før bryteren for regulering skyves over til høyre for at reguleringen skal starte skal alltid følgende utføres i forkant:

- Ønsket flowrate skal settes til nåværende flowrate, som vises i feltet ved strømningsmåleren nederst i bilde, merket med «Flowrate [l/min]»
- Den neste er å alltid sjekke at feltet for Motorhastighet (gjelder feltet under automatisk regulering) er satt til 0%.

Når dette er sjekket og klart kan bryteren for regulering skyves over til høyre og den vil vise «på».

Nå vil systemet reguleres automatisk til å holde den ønskede flowraten. Dersom det er ønskelig å endre ønsket flowrate skal denne kun endres så mye som 5-10% av gangen, for å forhindre store oscillasjoner i systemet, da dette vil føre til at det tar svært lang tid før svingene vil avta.

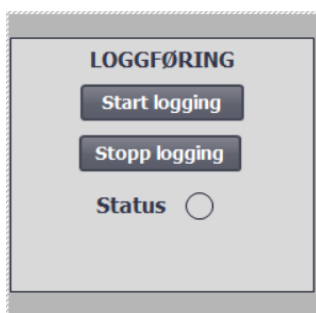
Det samme gjelder dersom systemet skal settes over til manuell styring igjen. Sjekk alltid at pådraget for den manuelle styringen er satt til det samme som reguleringen viser før systemet flyttes til manuell styring.



Figur 45 - HMI, Automatisk regulering

LOGGING

For loggings-funksjonen finnes det en knapp merket med «Logging», ved å trykke på denne åpnes et pop-up vindu som vil se slik ut:



Figur 46 - Pop-up vindu for

Loggningen skriver verdier for motorpådrag, viskositet, strømningsrate og ønsket strømningsrate, disse blir skrevet til en USB-port. Det er derfor viktig, dersom en skal logge verdier, at det blir kontrollert at en USB-minnepenn er plassert i en av USB-portene til HMI-skjermen. Slik at verdiene kan hentes ut, disse lagres i en Excel-fil.

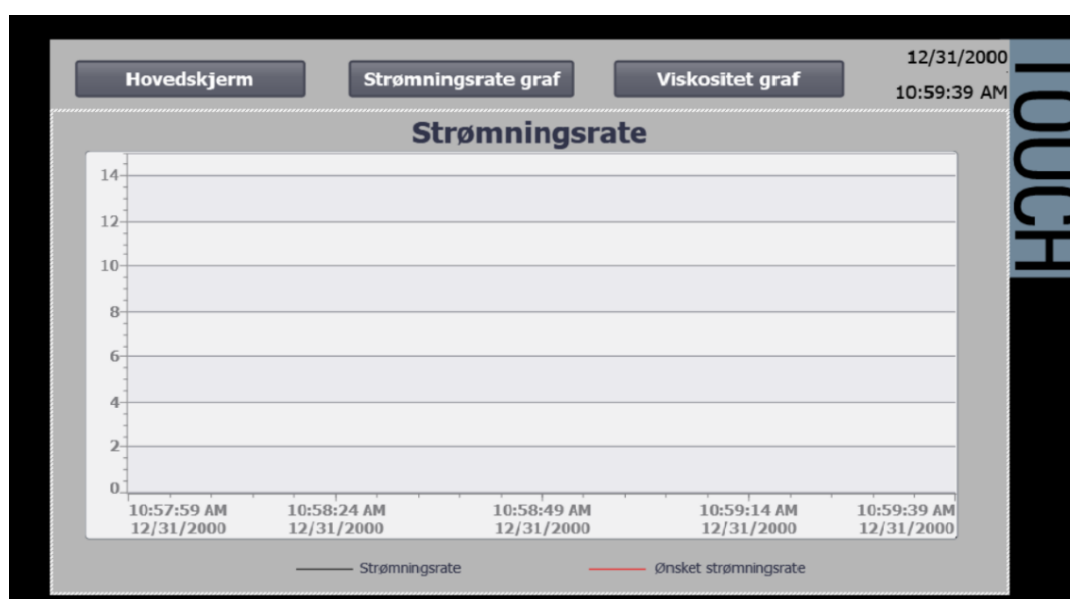
For å starte logging klikker man på «Start logging» og indikasjonsslyset merket «Status» vil lyse grønt. Dette er blitt implementert for å enkelt kunne se om logging er startet eller avsluttet. Indikasjonsslyset er plassert både i pop-up vinduet og ved logg-knappen i hovedvinduet. Ved trykk på «Stopp logging» vil lyset vise rødt, loggingen avsluttes og filene lukkes.

Dersom det skal foretas flere sett med verdier som skal logges må først den første loggen hentes ut, og fjernes fra minnepinnen, før det logges nye verdier.

Videre følger en oversikt over de ulike skjerm bildene knyttet til knappene som er plassert øverst i bildet for alle skjermene:

- STRØMNINGSRATE

Denne skjermen viser en graf med oversikt over strømningsraten og settpunktet for strømningsraten. Når systemet går over i automatisk regulering er det denne strømningsraten som reguleres, ved hjelp av pådraget. Denne kan være nyttig å bruke når systemet reguleres automatisk, for å følge systemets reaksjon, og regulering rundt ønsket nivå.



Figur 47 -HMI, graf over ønsket og nåværende strømningsrate

- VISKOSITET

For dette skjermbildet vises det en graf med oversikt over viskositeten. Her kan en til enhver tid følge og overvåke viskositeten til væsken som sirkulerer i systemet. X-aksen viser tiden som går, imens y-aksen viser væskens viskositet i centi poise.



Figur 48 - HMI, visning av graf for viskositet

H.2 Drifts- og vedlikeholds dokumentasjon

For å starte opp systemet må en ha TIA-portal V15 installert på datamaskinen. Deretter må en laste ned ZIP-filen vedlagt bacheloroppgaven, som heter BO19E-23 Hovedprogram. Her ligger programmet. Videre må en åpne BO19E-23 Hovedprogram.ap. Når filen er åpnet PCen kobles opp mot PLSen via en ethernetkabel. Deretter må programmet lastes ned til PLSen. I tillegg til dette må PLSen være tilkoblet et HMI-panelet for å kunne starte programmet – dette fordi all styring foregår via HMI-panelet.

PLSen er av versjon CPU 1513-1 PN. PLSen består av en analog input modul (AI 8xU/I HS – Artikkel no.: 6ES7 531-7NF10-0AB0, Versjon: V2.0), en analog output modul (AQ 4xU/I ST – Artikkel no.: 6ES7 532-5HD00-0AB0, Versjon: V2.0), en digital input modul (DI 32x24VDC HF – Artikkel no.: 6ES7 521-1BL00-0AB0, Versjon: V2.1), og en digital output modul (DQ 32x24VDC/0.5A ST – Artikkel no.: 6ES7 522-1BL00-0AB0, Versjon V2.0)

HMI skjermen er av versjon TP700 Comfort

For vedlikehold av systemet kan det være lurt å tømme systemet for fortykningsmiddel dersom det skal stues vekk – da det kan tette systemet. Dette gjøres ved å skru av hydraulikkslangen mellom coriolis og horisontalt rør. Deretter kan pumpen startes slik at systemet tømmes raskere. Når systemet er tilnærmet tomt bør mer vann tilføres systemet. Prosessen bør derfor bli utført på ny slik at systemet blir rensert.

Appendiks I Koblingsskjema

| Inn | Rekkekiemmer | Ut | Videre |
|---|--------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Hovedsikring (2) | 1 | Stikkontakt | |
| Hovedsikring (4) | 2 | Stikkontakt | |
| Frekvensomformer U2 | 3 | Pumpe | |
| Frekvensomformer V2 | 4 | Pumpe | |
| Frekvensomformer W2 | 6 | Pumpe | |
| Kontaktor L2, PLS, Frekvensomformer N, (sammenkobling) | 7 | Coriolis (Øverste kabel) | |
| Kontaktor L1, PLS, Frekvensomformer L, (Sammenkobling) | 5 | Coriolis (øverste kabel) | |
| | 8 | | |
| | 9 | | |
| AI 0.0 | 10 | Stikk-V Rød | Vertikal Trykktransmitter (svart) |
| AI 0.1 | 11 | Stikk-V Svart | Vertikal Trykktransmitter (grå) |
| | 12 | Stikk-V Grønn | LED (Svart - fjernet) |
| | 13 | Stikk-V Hvit | LED (Grå-fjernet) |
| AI 5.0 | 14 | Stikk-V Lilla | PT100 (svart) |
| AI 5.1 | 15 | Stikk-V Grå | PT100 (grå) |
| Spenningsregulator (1) | 16 | Stikk-V Brun | Blinklys (fjernet) |
| Spenningsregulator (2) | 17 | Stikk-V Gul | Blinklys (fjernet) |
| | 18 | Stikk-V Blå | |
| | 19 | Stikk-V Rosa | |
| | 20 | Stikk-V Sjøgrøn | |
| | 21 | Stikk-V Oransje | |
| AI 1.0 | 22 | Stikk-H Rød | Horisontal Trykktransmitter |
| AI 1.1 | 23 | Stikk-H Svart | Horisontal Trykktransmitter |
| Ekstern spenningskilde (+) | 24 | Stikk-H Grønn | |
| Ekstern spenningskilde (-) | 25 | Stikk-H Hvit | |
| AI 4.0 | 26 | Stikk-H Lilla | PT100 H |
| AI 4.1 | 27 | Stikk-H Grå | PT100 H |
| | 28 | Stikk-H Oransje | |

| | | | |
|---------------------------|---------|----------------------------------|--|
| AI 2.1 | 29 | Coriolis (nederste kabel, rød) | |
| | 30 + 39 | Coriolis (nederste kabel, svart) | |
| DI 0.0 | 31 | Coriolis (nederste kabel, gul) | |
| DI 0.1 | 32 | Coriolis (nederste kabel, grønn) | |
| | 33 | | |
| PLS Strømforsyning (+) | 34 | | |
| PLS AI Strømforsyning (+) | 35 | | |
| PLS AQ Strømforsyning (+) | 36 | | |
| DQ Power (+) | 37 | | |
| | 38 | | |
| | 39 | | |
| DI Power (+) | 40 | | |
| PLS Strømforsyning N | 41 | AQ 1.3 | |
| PLS AI Strømforsyning (-) | 42 | Spenningsregulator GND | |
| PLS AQ Strømforsyning (-) | 43 | DI Power (-) | |
| AI 2.3 | 44 | | |
| | 45 | | |
| | 46 | | |
| DQ Power - | 47 | | |
| Frekvensomformer (3) | 48 | | |
| Frekvensomformer (11) | 49 | | |
| AQ 2.3 | 50 | | |
| AQ 1.1 | 51 | VentilBoks Svart | |
| | 52 | VentilBoks Hvit | |
| | 53 | VentilBoks Gul | |
| AQ 2.0 | 54 | VentilBoks Grønn | |
| | 55 | VentilBoks Blå | |
| | 56 | VentilBoks Rød | |
| | 57 | | |
| | 58 | | |
| | 59 | | |
| | 60 | | |

| | | | |
|------------------|------------------------------|--------------|--|
| AQ 0.0 | Frekvens- omformer (2) | | |
| | | | |
| DQ 1.1 | Frekvens- omformer (12) | | |
| DQ 1.2 | Spennings- regulator, Vin | | |
| Hovedsikring (1) | Nødbryter | Kontaktor A1 | |
| Hovedsikring (3) | | Kontaktor A2 | |

Tabell 22 - Oversikt over koblinger i styreskap

NB! Dette er en oversikt over koblinger i styreskapet som meget sannsynlig kan inneholde feil.

Dersom det skal utføres endringer eller utvidelser av systemet bør alle koblinger overgås på ny og eventuelle endringer eller feil bør deretter rettes i tabellen.

I tillegg bør det utbedres et komplett koblingskjema for styringssystemet.

Appendiks J Liste over vedlegg

Her er en oversikt over alle vedleggene til oppgaven.

| Vedlegg Nr. | Navn | Type | Beskrivelse |
|-------------|--------------------------|------|---|
| 1 | BO19E-23_Hovedprogram | .ZIP | TIA-portal V15 – Simulering med HMI |
| 2 | BO19E-23_Simulator | .ZIP | TIA-portal V15 – Ferdigstilt programfil for regulering med HMI |
| 3 | Diskret PID-regulator | .PDF | Utleddning av algoritme |
| 4 | SIMS2013-paper19 | .PDF | Paper med formler |
| 5 | 3051 ERS System | .PDF | Datablad for trykktransmitterne |
| 6 | ABB-DATASHEET | .PDF | Datablad for frekvensomformer |
| 7 | Hovedpumpe_info | .PDF | Info om hovedpumpen |
| 8 | PT100 | .PDF | Info om PT100 elementene brukt i systemet |
| 9 | Proline Promass 80E, 83E | .PDF | Datablad for coriolismåler |
| 10 | XanthanGum | .PDF | Datablad for Xanthan Gum (fortykningsmiddelet som er blitt brukt) |

Tabell 23 - Tabell over vedlegg