

Kristoffer Andreas Paulsen
Per Einar Storjord
Oliver Garden Sveen
Håkon Toften

Hydraulisk testing av materialer for transformatorer

Bacheloroppgave i Elkraft og bærekraftig energi
Veileder: Hans Kristian Høidalen
Mai 2024

Kristoffer Andreas Paulsen
Per Einar Storjord
Oliver Garden Sveen
Håkon Toften

Hydraulisk testing av materialer for transformatorer

Bacheloroppgave i Elkraft og bærekraftig energi
Veileder: Hans Kristian Høidalen
Mai 2024

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk
Institutt for elektrisk energi



Kunnskap for en bedre verden

Bacheloroppgave BIELEKTRO

Oppgavetittel: Hydraulisk testing av materialer for transformatorer	
Project title: Hydraulic testing of transformer materials	
Forfattere: Kristoffer Andreas Paulsen Per Einar Storjord Oliver Garden Sveen Håkon Toften	Prosjektnummer: E2426
	Innleveringsdato: 21.05.2024
	Gradering: <input checked="" type="checkbox"/> åpen <input type="checkbox"/> lukket
Studium: Elektroingeniør - BIELEKTRO	
Studieretning: Elkraft og bærekraftig energi	
Veileder internt: Hans Kristian Høidalen	
Institutt: Institutt for elektrisk energi	
Oppdragsgiver: SINTEF Energi	
Kontaktperson: Lars Lundgaard	
Stikkord norsk: Krafttransformator, kortslutningssikkerhet presspan, celluloseisolasjon, hydraulikk, PLS	Stikkord engelsk: Power transformer, short circuit performance, pressboard, cellulose insulation, hydraulics, PLC

Sammendrag

Kraftnettet utsettes i dag for flere og hyppigere lastvariasjoner enn tidligere. Dette kommer blant annet som følge av den pågående elektrifiseringen av transportsektoren og økende andel uregulerbar kraft i energimarkedet. En konsekvens av hyppigere lastvariasjoner er at transformatorene i kraftnettet opplever flere temperaturvariasjoner. Forspenningstrykket over transformatorviklingene økes og senkes i takt med temperaturen, og over tid fører dette til plastisk deformasjon av celluloseisolasjonsmaterialene i viklingene. Deformasjon av isolasjonsmaterialene kan svekke kortslutningssikkerheten til transformatoren.

Denne rapporten redegjør for hvilke mekaniske langtidsutfordringer cellulosebaserte isolasjonsmaterialer som brukes i krafttransformatorer har. Videre undersøkes det hvorvidt det er mulig å designe et hydraulisk testoppsett for å undersøke utfordringene. Testoppsettet må kunne utøve mekanisk press på prøveobjekter, samtidig som de utsettes for temperaturer opptil 140°C.

Etter å ha studert faglitteratur og konsultert fagpersoner, fra forskjellige bedrifter og institusjoner, har det blitt designet et hydraulisk testoppsett. Hovedutfordringene ved utviklingen av testoppsettet er knyttet til temperaturbegrensninger på standard hydraulikksylindere, og krav om nøyaktig kontroll av trykk ved liten oljeflyt. Temperaturproblemet løses ved å oppgradere sylindertetningene til FKM høytemperaturretninger. Produsent av hydrauliske komponenter, Enerpac, har bekreftet at deres sylindere vil tåle temperaturer over 140°C ved en slik oppgradering. I tillegg er det valgt et driftstrykk på sylindere som er betydelig lavere enn hva den maksimalt tåler. Dette senker risikoen for å ødelegge tetningene. For å kontrollere trykket nøyaktig på sylindere ved liten oljeflyt, er det valgt å bruke en trykkreduksjonsventil fra Parker, som er designet for formålet.

For å realisere testoppsettet ble det hentet inn tilbud fra flere bedrifter, som leverer hydraulikkomponenter. Det ble brukt priser fra nettbutikker for å estimere kostnader for øvrige deler, som er enklere å anskaffe. Estimert totalpris for delene til testoppsettet er cirka 80 000 kroner.

Det er utviklet et PLS-styreprogram til testoppsettet. Programmet er laget for å utsette prøveobjekter for kraftsykluser, med valg om å presse objektet i en justerbar tid fra 1 minutt til 24 timer. I tillegg kan prøveobjekter presses med konstant kraft, i ubegrenset tid. PLS-en logger data for trykk og deformasjon. Et operatørdashbord er laget for å styre testoppsettet, endre testparametre og følge med på testresultater i sanntid.

Det prosjekterte testoppsettet svarer til krav om kvalitet og kostnad gitt av oppdragsgiver. Deresom det blir realisert kan dette bidra til å undersøke langtidsutfordringene til cellulosebaserte isolasjonsmaterialer.

Abstract

Today's electrical grid undergoes more rapid load variations than what it traditionally has. The cause of this, among other things, is electrification of the transport sector and a more dynamic electricity market. A consequence of more load variations are rapid temperature variations in power transformers. Over time the variations lead to strain on the cellulose insulation used in the transformers' clamping system. Severe plastic deformation of the cellulose insulation will reduce transformers' short circuit performance.

This thesis explains what mechanical long term challenges cellulose insulation used in power transformers face. Furthermore, it investigates if it is possible to design a hydraulic test rig to study these challenges. The test rig must use a hydraulic cylinder to exert a mechanical force on a test object, while being exposed to temperatures up to 140°C.

Various professionals in hydraulics have been consulted to develop the test rig. The main challenges of the design relates to temperature limitations of standard hydraulic cylinders, and precision control of the given cylinder with close to zero flow. To solve the temperature problem, it was decided to upgrade the hydraulic cylinder with FKM high temperature seals. Enerpac, a producer of high-pressure hydraulic components, confirmed that using FKM seals in one of their cylinders meant that it could be used in temperatures up to 140°C. Another measure to ensure that the seals stay intact, was using an oversized cylinder and operate it at a considerably lower pressure, than what it is limited to. For obtaining precision control with close to zero flow, the group found a proportional pressure reducing valve made by Parker. The valve, opposed to similar valves from other suppliers, can maintain precise pressure control on its outlet with zero flow.

Several hydraulic component suppliers were contacted to acquire the main parts needed to build the rig. The cost of other parts, that were easier to obtain, was estimated based on prices of various online stores. The total projected cost of the test rig came close to 80 000 NOK.

A PLC-program was developed to control the hydraulic rig. The program contains two modes of operation. The first mode is a load cycling programme, where force is cycled on a test object between a low and high value. The second mode is a constant load programme, where the rig maintains a given force for an unlimited time. The PLC-program also logs the pressure set on the hydraulic cylinder and the deformation of the test object. An operation dashboard has been created to operate the test rig, change test parameters on the PLC, and monitor test results in real time.


The designed test rig fulfils the specification set for quality and costs. If the rig is built it can contribute to testing of transformer cellulose insulation.

Forord

Denne bacheloroppgaven er et avsluttende arbeid for fire studenter på studieretningen Elkraft og bærekraftig energi på elektroingeniørstudiet ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Trondheim. Oppgaven er skrevet for og i samarbeid med forskningsinstituttet SINTEF Energi på vårsemesteret 2024. Med en tidsbruk på 550-600 timer per student tilsvarer bacheloroppgaven 20 studiepoeng.

Oppgavens hensikt er å utvikle et testoppsett til bruk i forskningsprosjekter. Testoppsettet skal brukes til å teste langtidsutfordringer knyttet til cellulosebaserte isolasjonsmaterialer i krafttransformatorer. Oppgaven har gitt utfordringer og verdifull lærdom knyttet til krafttransformatorer, styresystemer og hydraulikk.

Vi ønsker å rette en takk til Lars Lundgaard, Inge Madshaven og Per Ole Hasselvold ved SINTEF Energi for en interessant oppgave, gode innspill og hjelp i prosessen. Videre ønsker vi å rette en stor takk til intern veileder ved NTNU, Hans Kristian Høidalen, for gode innspill og veiledning. Til slutt ønsker vi å takke personer som på annen måte har bidratt til prosjektet.


Kristoffer Andreas Paulsen


Per Einar Storjord


Oliver Garden Sveen


Håkon Toften

Trondheim, 21.05.2024

Innhold

Sammendrag	v
Abstract	vii
Forord	ix
Innhold	xi
Figurer	xiii
Tabeller	xv
Kodelister	xvii
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	2
1.3 Avgrensinger	2
1.4 Mål og bærekraft	2
1.5 Rapportens struktur	4
2 Teori	5
2.1 Transformator	5
2.1.1 Transformator tap	6
2.1.2 Viklinger og forspenning	8
2.1.3 Aldring i transformatorer	10
2.1.4 Kortslutningssikkerhet	11
2.1.5 Transformatorolje	14
2.2 Materialeegenskaper til celluloseisolasjon	14
2.2.1 Impregnering av presspan	16
2.3 Testing av materialeegenskaper	17
2.3.1 Universitetet i Cantabria	17
2.3.2 SINTEF Energi	17
2.3.3 Weidmann	18
2.4 Hydraulikk	19
2.4.1 Hydraulisk pumpe	20
2.4.2 Hydraulisk ventil	22
2.4.3 Hydraulisk sylinder	23
2.4.4 Tetninger	23
2.4.5 Akkumulator	24
2.4.6 Rør og rørkoblinger	25
2.4.7 Trykksensor	25
2.4.8 Hydraulikkolje	25
2.4.9 Hydraulikksystem	25
2.5 Pneumatikk	26

2.6	Elektrisk styresystem	27
2.6.1	Hoved- og styrestrøm	27
2.6.2	PLS - Programmerbar logisk styring	27
2.6.3	Node-RED	28
3	Prosess og framgangsmåte	29
3.1	Bestilling av testoppsett	29
3.2	Undersøkelse av mulige testoppsett	30
4	Design og utvikling av testoppsett	33
4.1	Utvikling av hydraulisk system og presse	33
4.2	Utvikling av elektrisk styresystem	39
4.3	Utvikling av PLS-program	40
4.4	Utvikling av operatørdashbord	46
4.5	Verifikasjon av styresystem	53
5	Sammenstilling og bruk av testoppsett	55
5.1	Sammenstilling	55
5.2	Komponentlister og kostnader	57
5.3	Brukerinstruks	58
6	Diskusjon	61
6.1	Utfordringer med testoppsettet	61
6.1.1	Temperatur	61
6.1.2	Korrosjon	62
6.1.3	Presisjon og nøyaktighet	62
6.1.4	Styresystem	63
6.1.5	Operatørdashbord	64
6.2	Mulige forbedringer	64
6.3	Alternativer	65
6.4	Diskusjon av andre løsninger	65
6.5	FNs bærekraftsmål	67
7	Konklusjon	69
	Bibliografi	71
A	Dokumentasjon	77
A.1	PLS-dokumentasjon	77
A.2	Risikovurdering	87
B	Tilbud	89
B.1	Tilbud ventiler fra Partech	89
B.2	Tilbud akkumulator, sylinder og ombygging fra Hydraulikkteknikk	89
B.3	Tilbud hydraulisk pumpe fra Hydraulikkteknikk	89
C	Artikkel	95
C.1	Populærvitenskapelig publisasjon	95

Figurer

2.1	Oppbygging av krafttransformator	6
2.2	Sammenheng mellom effekt, viklingstemperatur og forspenning	7
2.3	Kjerne- og manteltransformator	7
2.4	Radielle og aksielle avstandsstykker	8
2.5	Forspenningssystemer.	10
2.6	Ekvivalentkrets for transformator ved kortslutning.	11
2.7	Buckling med og uten indre oppstøtting	13
2.8	Konsekvenser av for høye aksielle krefter	13
2.9	Prøvebiter av HDPB	14
2.10	Trykk- krympkurve for press av presspan	16
2.11	Illustrasjon - Paschals lov	19
2.12	Tannhjul- og tannringspumpe	20
2.13	Vingepumper.	21
2.14	Aksialstempelpumper.	21
2.15	Ventilsymboler	23
2.16	Dobbeltvirkende sylindere.	23
2.17	Illustrasjon - akkumulator	24
2.18	Illustrasjon - hydraulikksystem	26
2.19	Eksempel på funksjonsblokkdiagram	28
3.1	Prosjektprosess	32
4.1	Hydraulikkskjema for testoppsettet	33
4.2	Trykkbegrensningsventil	35
4.3	Pumpe og akkumulator	36
4.4	Trykksensor	36
4.5	Proporsjonal trykkreduksjonsventil	37
4.6	Monterings-tegning for pressen og bilde av sylindere	39
4.7	Hovedstrømskjema	40
4.8	Styrestrømskjema	41
4.9	PLS-skjema for pumpekrets	42
4.10	PLS-skjema for kraftsyklusprogram	43
4.11	Tidslinje for utgangssignal på PLS	44
4.12	Blokk-skjema for forrigling	45
4.13	PLS skjerm	46
4.14	Oversikt over signaltrafikk for testoppsettet	46
4.15	Skjerm-bilde av trykknapper fra flytredigereren i Node-RED	48
4.16	Skjerm-bilde av diverse funksjoner fra flytredigereren i Node-RED	49

4.17	Skjerm bilde av utgangsverdier i Node-RED flytredigereren	52
4.18	Skjerm bilde av målegrafene når motorvern eller nødstopp blir aktivert	53
4.19	Skjerm bilde av målegrafene når sylindetrykket kommer over 135 bar	54
5.1	Skisse av testoppsett	56
5.2	Modell av pressen	56
5.3	Operatørdashbord	59
5.4	PLS-skjerm.	60
5.5	Operatørdashbord.	60
6.1	Illustrasjon av avvik i stigetid	63
6.2	FNs bærekraftsmål	67

Tabeller

2.1	Sannhetstabell for RS-vippe	28
3.1	Kraftregnskap - sylinderdiameter	30
4.1	Adresstabell for Node-RED og PLS.	47
5.1	Komponentliste med pris for hydraulikksystem.	57
5.2	Forslag til elektriske komponenter med el-nummer.	57
5.3	Komponentliste med pris for mekanisk presse.	58

Kodelister

4.1	Node - Summering av presstid.	49
4.2	Node - Tid til steg per sekund.	50
4.3	Node - Tid til steg per sekund - konstant kraft.	51
4.4	Node - Forsinkelse for kraftsyklus	51

Kapittel 1

Innledning

1.1 Bakgrunn

Forskningsinstituttet SINTEF Energi jobber med et forskningsprosjekt med navn DynaLoad - Dynamic loading of transformer insulation. I dette prosjektet ønsker de å studere hvordan de mekaniske langtidsegenskapene til cellulosebaserte isolasjonsmaterialer i transformatorer blir påvirket av raske dynamiske lastendringer i strømmettet.

En krafttransformator må være designet slik at den de tåler mekaniske krefter som oppstår under en kortslutning. Kreftene kan være over hundre ganger større enn hva transformatoren opplever ved nominell drift [1]. For å motvirke elektromagnetiske krefter i transformatorer, er viklingene hardt presset sammen under produksjonen. Denne viklingsforspenningen er viktig for transformatorens evne til å motstå ytre kortslutninger [1].

Dagens strømmett blir stadig mer utsatt for hyppige lastvariasjoner. Dette kommer blant annet av dynamiske energikilder som vindkraft, større bruk av høyeffektsladere for kjøretøy og et mer dynamisk energimarked som fører til oftere start og stopp i vannkraftproduksjon [2]. Slike variasjoner skaper hyppige temperatursvingninger i krafttransformatorer. Alle materialer i transformatoren vil utvide seg eller trekkes sammen ved temperaturvariasjoner. Likevel vil celluloseisolasjonen utvide seg forskjellig fra kobbermaterialene i viklingene og stålet i kjernen [3]. Ved temperaturøkning som følger av økt last vil presset øke på isolasjonen. Presset vil synke igjen når lasten senkes på transformatoren og den gradvis kjøles. Over tid fører dette til at isolasjonen komprimeres [3], og da vil viklingsforspenningen også svekkes. Konsekvensen av dette er dårligere motstandsdyktighet mot kortslutninger og større sjanse for havari.

Presspan er et cellulosebasert isolasjonsmateriale, og er ett av hovedmaterialene i viklingssystemet til en krafttransformator. Materialet brukes i transformatorer på størrelser fra 10 kVA til 1500 MVA [4]. Presspan isolerer elektrisk, men er også en viktig komponent for mekanisk styrke i transformatoren. Det har blitt forsket betydelig på de kjemiske og elektriske egenskapene til materialet [5]. Hvordan de mekaniske langtidsegenskapene påvirkes av hyppige variasjoner av temperatur og trykk, finnes det derimot lite litteratur om.

For å undersøke langtidseffektene av dynamisk last på transformatorer, tester SINTEF Energi presspan med temperatursykling i et varmeskap. Testene er tidkrevende da det kan ta opp til flere timer å gjennomføre en syklus. Levetiden til en transformator kan være på over 50 år og kan oppleve minst en temperatursvingning om dagen. Det er derfor nødvendig med en

akselerert test, som kan utføre flere sykluser i løpet av kortere tid. I dag finnes det ingen standardiserte metoder for å teste langtidsegenskaper av presspan. Av den grunn ønsker SINTEF Energi at det designes et testoppsett hvor man kan utføre hyppigere trykkvariasjoner ved forhøyet temperatur. Det er ønskelig at det gjøres ved hjelp av en hydraulisk eller pneumatisk sylinder. Testoppsettet skal kunne plasseres i et varmeskap slik at man kan utføre testene under temperaturforhold helt opp til 140°C.

1.2 Problemstilling

Hvilke mekaniske langtidsutfordringer har cellulosebaserte isolasjonsmaterialer som brukes i krafttransformatorer? Hvordan kan man designe et testoppsett for å undersøke utfordringene?

Problemstillingen kan videre brytes ned i følgende punkter:

- Forklare cellulosebaserte isolasjonsmaterialer sin rolle i krafttransformatorer og belyse utfordringer med disse materialene.
- Belyse teori for å forstå valg av løsning og komponenter.
- Designe og beskrive et testoppsett som:
 - Kan stå i et klimaskap.
 - Tåler 140°C over en lengre periode.
 - Utøver varierende kraft fra 0-15 kN på et testobjekt.
 - Endrer kraft mellom null og maksimalt på minimum 1 min.
 - Kan opprettholde maksimalt kraft over lang tid.
 - Kan måle deformasjon.
 - Leveres med fungerende styresystem.

1.3 Avgrensinger

For å avgrense prosjektet ble det valgt å beskrive kun teori som var nyttig for å kunne forstå bakgrunnen for bestillingen. Dette omhandler cellulosebaserte isolasjonsmaterialer sin rolle i krafttransformatorer og hvilke konsekvenser temperaturvariasjoner har for dem. Hydraulikkteorien er begrenset til å beskrive det operatøren av systemet trenger for å sette sammen, drifte og forstå prinsippene til den ferdige løsningen. Det blir også gitt informasjon om styringsenheten og programmet den bruker, samt beskrivelse av bruk.

1.4 Mål og bærekraft

Målet med oppgaven er å prosjektere en løsning på et testoppsett som skal kunne teste prøveobjekter av presspan i henhold til oppdragsgivers spesifikasjoner. Dette innebærer å planlegge, dimensjonere og beskrive et testoppsett med anbefalte komponenter og styring. Det skal også leveres et kapittel med nødvendig bakgrunnsteori for å forstå problemstilling, valg og løsning.

Ved utviklingsprosjekter er det viktig å vurdere hvordan arbeidet påvirker bærekraftig utvikling. FN har definert 17 bærekraftsmål og 169 delmål som medlemslandene har forpliktet seg til å samarbeide om. Målene legger vekt på handlinger som har en positiv effekt på klima,

miljø, likestilling og bekjempelse av fattigdom [6]. Da formålet med denne oppgaven er å teste cellulosebaserte isolasjonsmaterialer, for bruk i krafttransformatorer, er målene som ansees relevante 7 - Ren energi til alle, 9 - Industri, innovasjon og infrastruktur og 12 - Ansvarlig forbruk og produksjon.

1.5 Rapportens struktur

Rapporten er delt inn i følgende kapitler:

Innledning inneholder bakgrunn for oppgaven, problemstillingen, avgrensingene og målet med bacheloroppgaven.

Teori gir bakgrunn for å forstå cellulosebaserte isolasjonsmaterialer sin rolle i krafttransformatorer. Det er også beskrevet teori som er relevant for å forstå bakgrunnen og løsningen til testoppsettet.

Prosess og framgangsmåte beskriver arbeidsmetoden gruppen har gått gjennom, ifra oppgaven ble tildelt til testoppsettet var ferdig prosjektert.

Design og utvikling gir en begrunnelse for de valgene som er tatt, med tanke på konsept og komponentvalg, i testoppsettet. Styreprogrammet er også forklart, gjennom beskrivelse av ønskede funksjoner, og løsninger i Node-RED og PLS Logo Soft!.

Sammenstilling og bruk presenterer resultatene gruppen kom fram til i løpet av utviklingsprosessen. I dette kapitlet ligger også fullstendige komponentlister, med pris, og en brukerinstruks til testoppsettet.

Diskusjon beskriver utfordringer og mulige forbedringer, av testoppsettet. Den gir også et innblikk i testoppsettene til lignende tester, sammenligner de med bachelorgruppens testoppsett, og vurderer fordeler og ulemper med de forskjellige testene. Dette kapitlet diskuterer også andre løsninger som kunne fungert. Til slutt er det vurdert hvilke av FNs bærekraftsmål som kan være aktuelle for oppgaven.

Konklusjon oppsummerer løsningen og hva rapporten har kommet frem til.

Kapittel 2

Teori

Dette kapittelet skal gi grunnlag for å forstå bakgrunnen for oppgaven, og forstå vurderingene og valgene som er gjort for å løse oppgaven. Kapittelet inneholder teori angående transformator og belyser konsekvensene av temperaturvariasjoner. Dette støtter opp om bakgrunnen for oppgaven og knytter den til fagområdet elkraftteknologi. Materialeegenskaper for celluloseisolasjon er også forklart, i tillegg til de viktigste prinsippene og komponentene i et hydraulisk system. Til slutt er det presentert teori for å forstå styringsystemet.

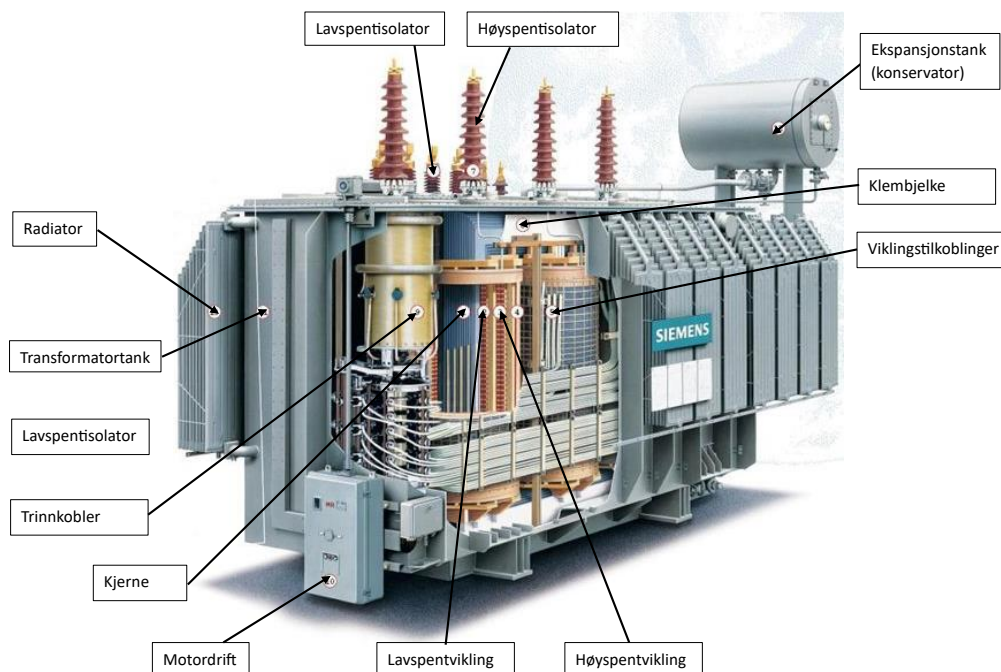
2.1 Transformator

Transformatorer er elektromagnetiske komponenter som er sentrale deler av det elektriske kraftnettet. Oppgaven til transformatorene er å transformere en elektrisk spenning fra et gitt nivå til et annet. I kraftnettet ønsker man å omforme spenningen til et betydelig høyere nivå for å senke strømmene i nettet ved overføring av energi og dermed redusere tapene. Påliteligheten til energisystemet er avhengig av krafttransformatorer.

Krafttransformatoren deles opp i aktive deler og omsluttende deler. De aktive delene er de elektriske og elektromagnetiske komponentene i transformatoren. Dette innebærer kjerne, viklinger og gjennomføringer/tilkoblinger. De omsluttende delene består av transformator-tanken, isolasjonsmaterialer, olje, konservator, radiator og forspenningstruktur. Figur 2.1 viser en oversikt over sammensetningen til krafttransformatoren.

En krafttransformator i drift har ohmske og magnetiske tap som fører til oppvarming. Varmen ledes fra kobberviklinger og stålkjerne over til transformatoroljen som videre transporterer varmen bort. Tapene, og derfor varmeutviklingen, er avhengig av lasten på transformatoren. Ved endring i temperatur på transformator eller omgivelser vil termisk ekspansjon i olje, viklinger, kjerne og tank, føre til endring i volum på transformatoren. Det er ikke ønskelig med overtrykk i transformatoren da dette øker kreftene på tanken. Derfor har de fleste krafttransformatorer ekspansjonstank (konservator), som oljen flyter til når den blir varm. Denne ekspansjonstanken er ventilert for å la transformatoren "puste". Ofte er ventilasjonen filtrert gjennom et silica-gel filter som skal fjerne fuktigheten i luften, før den går inn i transformatoren. Over tid vil dette likevel føre til at oljen kan tiltrekke seg fuktighet.

Kjerne, viklinger, tank og isolasjonsmaterialer ekspanderer forskjellig med temperaturendringer. Når temperaturen øker, vil forspenningen på viklingene også øke. Før de minsker når temperaturen synker igjen. Dette er illustrert i figur 2.2. En transformator er ofte beregnet til



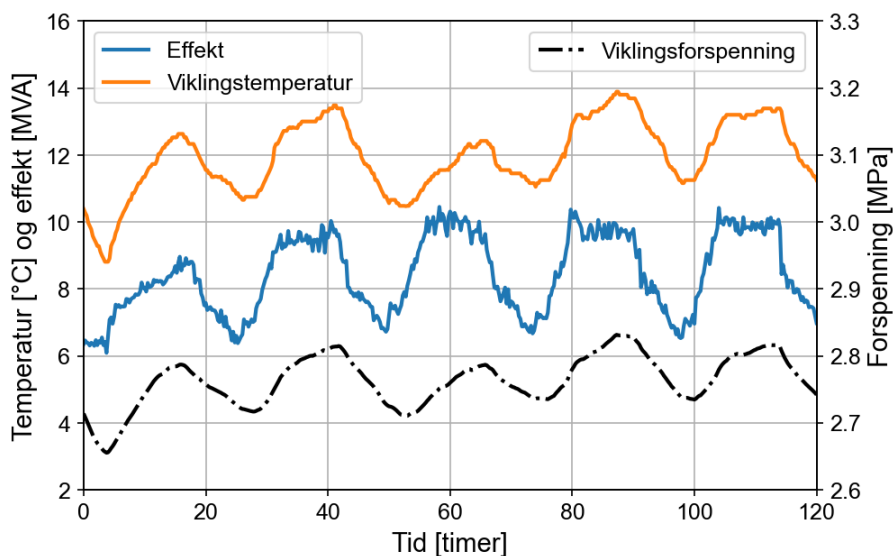
Figur 2.1: Illustrasjon av oppbygging av krafttransformator [7].

å være i drift i 50 - 80 år; dermed vil denne prosessen gjentas tusenvis av ganger i løpet av driftstiden. Celluloseisolasjonen er den mekanisk svakeste delen av transformatoren. På grunn av begrenset plass, vil isolasjonen bli komprimert ved stigende trykk [8]. Over tid vil dette føre til at celluloseisolasjonen deformeres.

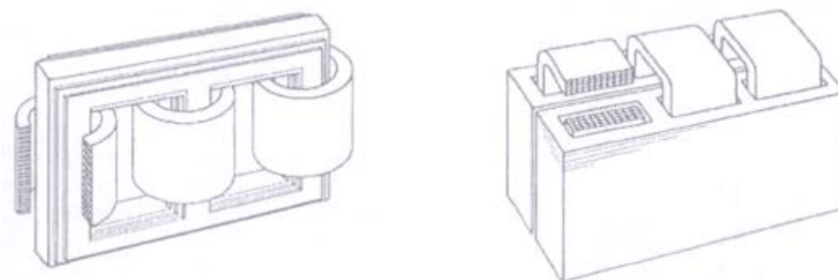
Krafttransformatorene kan kategoriseres som kjernetransformatorer (engelsk: core form) og manteltransformatorer (engelsk: shell form). Kjernetransformatoren kjennetegnes ved at den har en laminert jernkjerne der viklingene omslutter de vertikale benene til kjernen. Manteltransformatoren har motsatt oppbygging, der den magnetiske kjernen omslutter viklingene. Til tross for at manteltransformatoren er mer motstandsdyktig mot kortslutninger, er kjernetransformatoren mest vanlig på verdensbasis [9]. Derfor er det dette designet oppgaven fokuserer på. Figur 2.3 viser den prinsipielle forskjellen imellom designkonseptene.

2.1.1 Transformertap

I en transformator er det ingen bevegende deler, derfor er de også relativt effektive. Det er likevel noe tap som gjør at det dannes varme. Det er i hovedsak tre typer tap i en transformator, kjernetap, kobbertap og dielektriske tap. Det er de to førstnevnte som er hovedtapsfaktorene [11].



Figur 2.2: Sammenheng mellom effekt, viklingstemperatur og forspenning i 120 timer [8].



Figur 2.3: Prinsipielle skisser over kjerne- og manteltransformator [10].

Når et magnetisk materiale gjennomgår syklisk magnetisering, oppstår hysteresetap og virvelstrømstap. Siden strømmen i transformatoren er sinusformet vil dette oppstå i kjernen. Hysteresekommer av at magnetiseringen ikke forsvinner helt når magnetfeltet snur, den henger litt igjen. I maskiner hvor jern stadig blir magnetisert og ommagnetisert, som i transformatorer, velger man ofte bløte jernlegeringer som silisumlegert stål [12]. Virvelstrømmer skapes når en leder er utsatt for et varierende magnetfelt. Disse strømmene fører til et resistivt tap i selve transformatorkjernen [13]. Dette er virvelstrømstapet, og regnes som å være proporsjonale med kvadratet av spenningen på transformatoren [14].

Kobbertap er det resistive varmetapet som kommer av at det går en laststrøm i kobberviklingene i transformatoren. Disse er proporsjonale med kvadratet av strømmen i viklingene [11]. Det er også virvelstrømstap i viklingene.

Induserte tap kommer av at lekkasjefeltene induserer virvelstrømmer i transformatorveggene og ledere [11].

Dielektriske tap i en transformator er tapene som kommer fra isolasjonsmaterialet, da i hovedsak av olje og den faste isolasjonen som presspan [11].

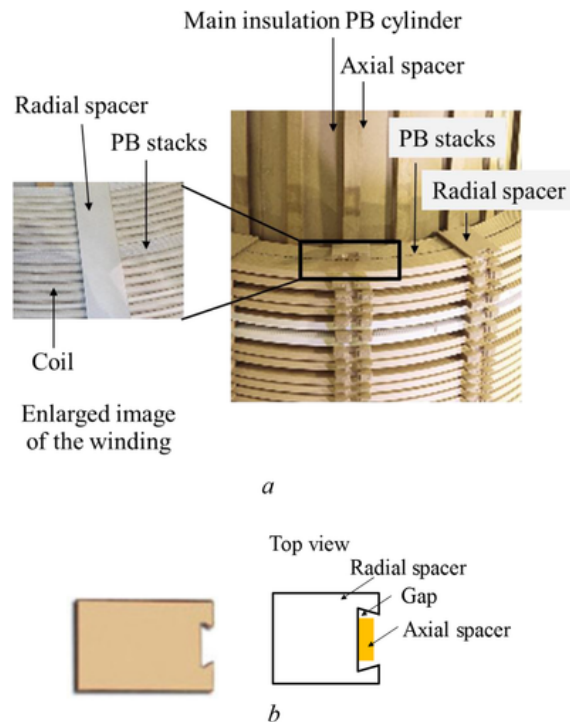
2.1.2 Viklinger og forspenning

Cellulosebaserte isolasjonsmaterialer er en sentral del av viklingene og viklingsforspenningen. Derfor er det viktig å forstå oppbygningen av viklingene for å skjønne de mekaniske utfordringene til cellulosebaserte isolasjonsmaterialer.

Krafttransformatorer har minst to viklingsett. Typisk en lavspennings- og en høyspenningsvikling. I trefasetransformatorer omslutter lavspennings- og høyspenningsviklingen for hver fase, konsentrisk om samme kjerneben. Lavspenningsviklingen monteres oftest nærmest kjernen, og høyspenningsviklingen utenfor denne. Lavspenningsviklingen er nærmest kjernen fordi det er enklere å isolere disse viklingene mot transformatorkjernen [15]. I tillegg gjøres trinning for spenningsregulering normalt sett på høyspenningssiden, da er det fordelaktig at den viklingen er tilgjengelig på utsiden.

Et viklingsett består av en kopperleder som er dreid rundt transformatorkjernen et gitt antall vindinger. Lederen er ofte sammensatt av flere mindre koppertråder som ligger parallelt. Dette gjøres for å få en mer fleksibel leder og minimere virvelstrømstap [16]. Hver tråd isoleres enten med papir eller en lakk [16]. Ledere kan være runde i form, men firkantede ledere er ofte å foretrekke da de er mer arealeffektive [16]. Rundt lederne finner man papirisolasjon. Avstandsstykker og aksielle lister laget av pressspan med høy tetthet (HDPB), plasseres også i viklingene. Da får man avstand fra andre ledende deler og gjør det enklere for olje å sirkulere. I tillegg legges det sylindformede isolasjonsbarrierer imellom viklinger, og imellom viking og kjerne [17].

Figur 2.4 viser hvordan radielle avstandsstykker separerer viklingslagene i aksiell retning. I tillegg lager aksielle lister avstand mellom viklingen og den sylindformede isolasjonsbarrieren. Lederene i denne transformatoren ligger tett sammen radielt, men er separert vertikalt med pressspan i midten, for å lage en kjølekanal der det kan sirkulere olje.



Figur 2.4: Radielle og aksielle avstandsstykker [18].

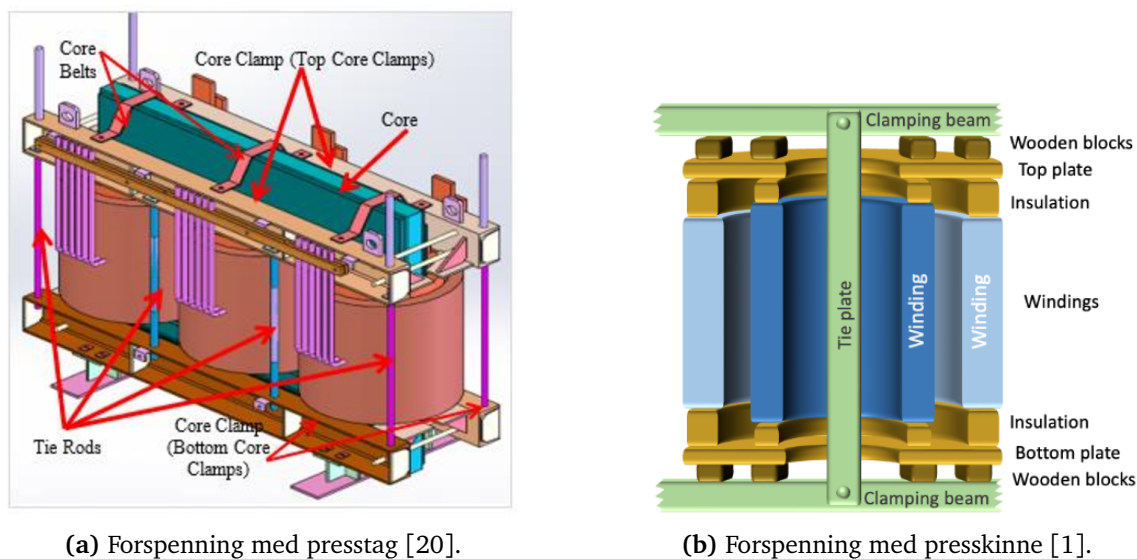
Det finnes flere viklingstyper for kjernetransformatorer. De vanligste er lagvikling, skruevikling, skivevikling og folievikling. Skruevikling og skivevikling vil bli beskrevet nærmere da de brukes i større krafttransformatorer. Lagviklinger kan også brukes i større transformatorer, men da er det for reguleringsviklinger [17]. Altså viklinger som brukes til spenningsregulering.

Skrueviklingen har flere parallelle ledere som danner vindinger i en skrueform i aksial retning rundt transformatorbenet. Mellom hver vinding legges det avstandsstykker (også kalt knotter) av pressspan, for å separere lederen i aksial retning og sikre god kjøling. Viklingstypen tåler høye strømmer [19], og er derfor godt egnet som lavspenningvikling i store krafttransformatorer.

Skiveviklingen er laget slik at man stabler skiver av kopperledere ovenpå hverandre med avstandsstykker imellom [17]. Skivene har samme skrueform som skrueviklingen. Forbindelsen mellom hver skive skjer vekselvis ved kjerne og ved ytterkant. Hovedforskjellen mellom skive- og skruevikling, er at skiveviklingen kan ha flere vindinger per skive. Av den grunn er den bedre egnet for transformatorer med et stort antall vindinger. Skiveviklinger brukes i større transformatorer med høye spenninger og stor ytelse [17].

For å holde viklingene på plass og motvirke elektromagnetiske krefter i transformatoren, må viklingene forspennes. Forspenningssystemet består av klembjelker som monteres i topp og bunn langs kjernen. Bjelkene presser isolasjonsblokker, enten av tre eller pressspan med høy tetthet, mot en klemlate [1]. Videre fordeler klemlaten trykket over isolasjonslag og viklinger. Klembjelkene i topp og bunn kan trekkes sammen av presstag (engelsk: tie rods) som ligger på utsiden av viklingene. Dette kan ses i figur 2.5a. En annen løsning er å montere presskinner (engelsk: tie plates) langs kjernebenene, for å trekke klembjelkene sammen. Figur 2.5b illustrerer prinsipielt hvordan dette kan gjøres.

Sammenpressingen av viklingene skjer i slutten av produksjonsprosessen av transformatoren. Man plasserer hydrauliske jekker mellom klembjelkene og pressplatene, og presser viklingene til de har ønsket trykk. Typisk trykk for skiveviklinger er 5 N/mm^2 , mens 2 N/mm^2 er vanlig for skrueviklinger [1]. Videre blir presstag eller presskinner justert. Til slutt plasseres isolasjonsblokker og treklosser imellom klembjelkene og klemlatene, for å opprettholde trykket når jekkerne fjernes.



Figur 2.5: Forspenningssystemer.

2.1.3 Aldring i transformatorer

Alt inne i og rundt en transformator vil aldres. Ny og tørr transformatorolje har liten elektrisk ledningsevne. Dette endres derimot raskt om oljen tar opp fukt eller blir forurenset. Aldringen er også med på å øke ledningsevnen. Alle transformatoroljer vil med tiden aldres på grunn av kjemisk nedbryting og forurensing. De vanligste årsakene til aldring er dannelse av vann, syrer og slam i transformatoren. Dette kan skje om oljen kommer i kontakt med luft. Vanddannelse akselerer oksidasjonsprosessene [21].

Det er viktig for kortslutningssikkerheten til transformatoren, at trykket på forspenningen holdes konstant over levetiden. Dette er ikke like lett i praksis, da presspan og papirisolasjon er laget av cellulosefibre, som er et plastisk materiale. Det gjør at presspanen utvides eller trekkes sammen ved fukt- eller temperaturvariasjoner [22]. På grunn av temperatursvingningene, vil de ulike delene av en transformator utvide seg og trekkes sammen i ulik grad. Dette skaper et høyt press over viklingene. Det er kjent at disse komprimeres med tiden. Kobberviklingene kan bevare sin mekaniske styrke i temperaturer opptil flere hundre grader. Transformatorolje vil også kunne fungere i temperaturer opp mot 140°C uten å få betydelig dårligere egenskaper. Papirisolasjonen derimot, vil forringes med strekt økende alvorlighetsgrad hvis temperaturen stiger over 90°C [23]. Reaksjonshastigheten for cellulosenedbrytingen doubles for hver 6-9°C [24].

Når de faste isolasjonsmaterialene som presspan aldres, vil de gi oksidasjonsprodukter. Aldringen av celluloseprodukter vil gi mye av de samme oksidasjonsproduktene som oljen når den aldres. Disse to aldringsprosessene henger dessuten sammen, ved at deres oksidasjonsprodukter virker akselererende på hverandre. Når transformatoroljen forurenses blir utstyrets levetid kortere. Det vil også gi dårligere driftsresultater ved at både de elektriske- og varmetransportegenskapene blir dårligere [21]. Med tilgang til oksygen øker cellulosealdringen 2-3 ganger sammenlignet med cellulose uten tilgang til oksygen [24].

Aldring av cellulosen kan forkomme selv uten tilgang på vann eller oksygen. Dette kalles pyrolyse og kan oppstå ved svært høye temperaturer. Pyrolyse karboniserer papiret og kan skje svært raskt. Dette er ikke noe som vanligvis skjer i en transformator, men kan oppstå ved feil som

dårlig lodding eller lignende [24].

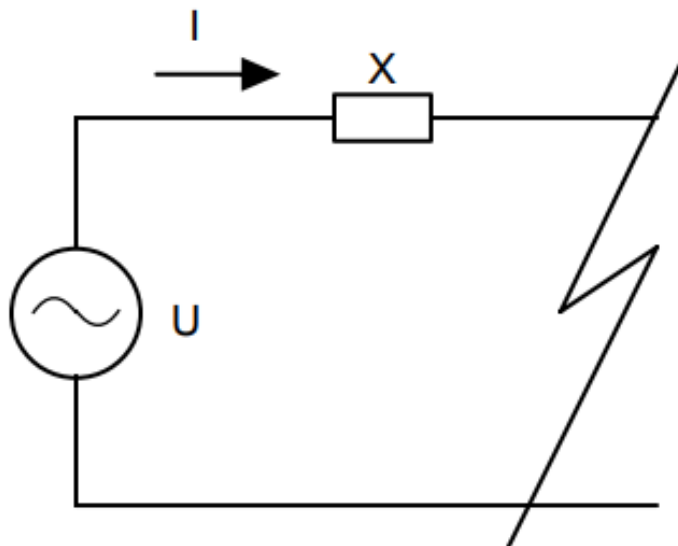
Den elektriske holdfastheten i cellulosematerialet inne i transformatorer vil ikke svekkes selv om de aldres. Den mekaniske styrken vil derimot svekkes, og man kan oppleve at papirflak faller av og tetter kanaler. I en ny transformator er polymerisasjonsgraden (DP) omtrent 1000. Denne måleenheten sier noe om rivestyrken til cellulosematerialet og bestemmes av lengden på papirfibrene. IEEE bruker 50% reduksjon i rivestyrke som en indikator for at en transformator bør byttes. I senere tid er det også brukt $DP = 200$ [24]. Formel (2.1) kan benyttes for å regne på cellulosealdring.

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = A \cdot e^{\frac{-E_A}{RT}} \cdot t \quad (2.1)$$

Her er DP_0 og DP_t polymerisasjonsgraden ved start og etter en tid t , A er en konstant gitt av forurensningsgrad, E_A er aktiveringsenergien som angir hvor temperaturavhengig aldringsprosessen er. R er den molare gasskonstanten og T er temperatur i kelvin.

2.1.4 Kortslutningssikkerhet

Kortslutningssikkerhet angir transformatorens evne til å tåle høye startstrømmer eller høye strømmer forårsaket av ytre kortslutninger. Startstrømmer og kortslutningsstrømmer kan være over 10 ganger høyere enn den nominelle strømmen til transformatoren. Dette kan utledes fra en enkel ekvivalentkrets av transformatoren. På merkeskiltet til en transformator er det oppgitt transformatorytelse (S), linjespenning (U) og kortslutningsimpedans (e_k) i prosent, eller per unit. Reaktansen i høyspenningssystemer er langt større enn resistansen, derfor kan man ofte si at impedansen er tilnærmet lik reaktansen [25]. Den beregnede kortslutningsstrømmen blir da noen få prosent høyere enn den faktiske strømmen. Dette kan tenkes som en ekstra sikkerhetsmargin ved dimensjonering.



Figur 2.6: Ekvivalentkrets for transformator ved kortslutning.

Linjestrømmen ved full effekt kan uttrykkes slik det er vist i (2.2).

$$I_L = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (2.2)$$

Reaktansen kan uttrykkes slik det er vist i (2.3).

$$X = \frac{e_k}{100} \cdot \frac{U^2}{S} \quad (2.3)$$

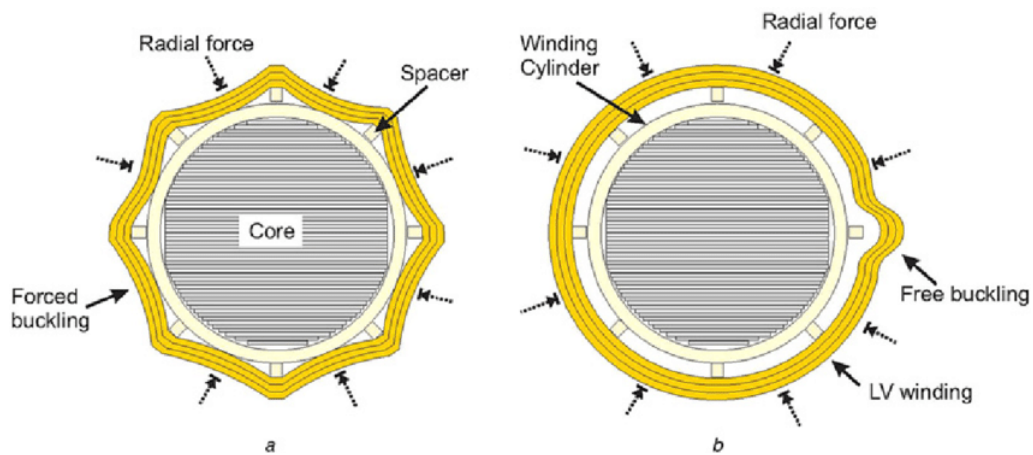
Ved en symmetrisk kortslutning nær krafttransformatoren får man da følgende uttrykk:

$$I_K = \frac{U/\sqrt{3}}{X} = \frac{U/\sqrt{3}}{\frac{e_k}{100} \frac{U^2}{S}} = \frac{1}{\sqrt{3} \frac{e_k}{100} \frac{U}{S}} = \frac{I_L \cdot 100}{e_k} \quad (2.4)$$

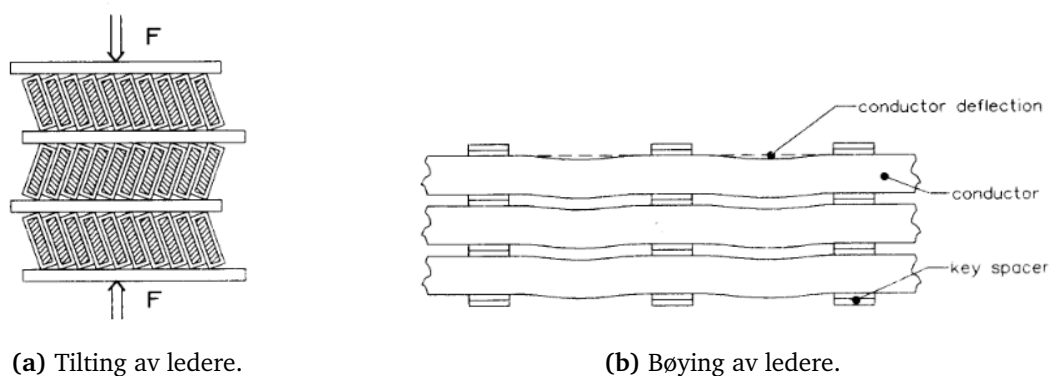
NEK IEC 60076-5:2006 Tabell 1 fastslår hva transformatorers minste kortslutningsimpedans oppgitt i prosent skal være ved nominell strøm. Tabellen illustrerer at minste kortslutningsimpedans øker med transformatorstørrelsen. Likevel er minste kortslutningsimpedans for transformatorer med ytelse over 100 000 kVA 12,5% [26]. Da er $e_k > 12,5\%$, og ved formel (2.4) finner man $I_K < 8I_L$. Ved mindre transformatorer vil minste kortslutningsimpedans kunne være enda lavere, og kortslutningsstrømmen enda flere ganger større enn nominell laststrøm. De mekaniske kreftene som inntreffer på grunn av en kortslutning er proporsjonal med kvadratet av kortslutningsstrømmen [27], og kan derav være over hundre ganger større enn hva transformatoren påkjennes med nominell drift.

Kortslutninger utsetter viklingene i transformatoren for større radielle og aksielle krefter. Viklingene må forspennes med en så stor kraft, at friksjonskreftene imellom avstandsstykker er større enn radielle krefter som kan oppleves under kortslutning. I tillegg må rivestyrken på papirisolasjonen være så sterk at den ikke rives i stykker [3]. Radielle krefter vil prøve å sammenpresse lavspenningsviklingen mot transformator kjernen [27]. Hvis kortslutningskreftene blir for store, kan det oppstå feil. På lavspenningsviklingen er buckling en mulig feil. Her skiller man mellom buckling med eller uten indre oppstøtning (engelsk: forced buckling og free buckling). Buckling med indre oppstøtning kommer av at den radielle bevegelsen til viklingen stopper der avstandsstykker er plassert. Likevel vil kreftene være så store at viklingen sammenpresses mot kjernen i mellom avstandsstykkene. Dette illustreres i figur 2.7a. Uten indre oppstøtning, kan man få en større bøy i viklingen slik det er illustrert i figur 2.7b. På høyspenningsviklingen, prøver de radielle kreftene å utvide diameteren til viklingen, og den presses vekk fra transformator kjernen. Men på grunn av kobberlederens fasthet og et høyt antall vindinger, er de radielle kreftene som virker på høyspenningsviklingene sjeldent et problem [28].

Aksielle krefter under kortslutning, kommer av at parallelle ledere som leder strøm i samme retning tiltrekker hverandre [28]. Kreftene sammenpresser viklingene i aksiell retning. Flere feiltyper kan forekomme som konsekvens av høye aksielle krefter. Blant annet kan avstandsstykker ta skade, ledere tilte, eller bøyes imellom avstandsstykker. Dette kan også skade papirisolasjonen rundt lederne. Alt dette kan føre til havari. I tillegg kan høye aksielle krefter føre til plastisk deformasjon av avstandsstykker og isolasjon [30]. Dette er problematisk da det kan svekke forspenningen. Blir forspenningen svekket blir motstandsdyktigheten mot kortslutninger dårligere, og det er fare for at deler løsner i transformatoren. Hvis en vikling eller en annen



Figur 2.7: Buckling med og uten indre oppstøtning [29].



(a) Tilting av ledere.

(b) Bøying av ledere.

Figur 2.8: Konsekvenser av for høye aksielle krefter [24].

del av transformatoren løsner under en kortslutning, kan det oppstå en hamringseffekt, som vil ødelegge transformatoren i løpet av kort tid [1].

2.1.5 Transformatorolje

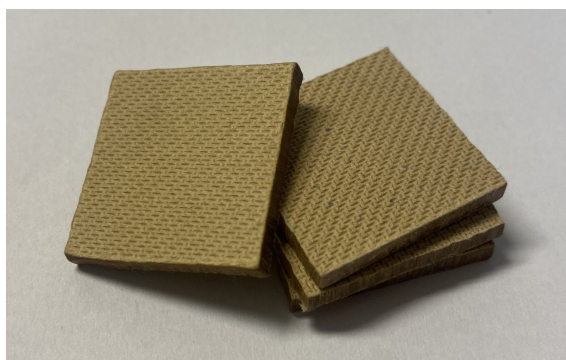
Transformatorolje er en flytende dielektrika, altså en isolerende olje. Isolasjonsolje brukes normalt sammen med et fast isolasjonsmateriale som for eksempel papir og presspan. I transformatorer er denne oljen også en viktig kjølingskomponent. Olje og papirisolasjon er mest vanlig, selv om nye materialer etterhvert blir tatt i bruk. Olje og papir har den gunstige kombinasjonen av elektriske, mekaniske og tekniske egenskaper, bearbeidingsmuligheter og pris [21].

Siden en transformator aldri er ideell, vil man få tap i form av varme. Denne varmen må ledes vekk og fordrives av transformatoroljen. For at oljen skal kjøle transformatoren er oljesirkulasjon nødvendig. Det er mulig med både naturlig sirkulasjon og tvunget sirkulasjon. Ved naturlig sirkulasjon, som er vanligst ved store krafttransformatorer, utnytter man at varm olje er lettere enn kald olje. Olje stiger opp gjennom viklingene når den varmes opp, og faller når den går gjennom radiatorene og avkjøles. Ved tvunget sirkulasjon, er olje pumpet fra radiatorene og inn i bunnen av viklingene [31].

I transformatorer er det vanlig og bruke enten mineralolje, silikonolje eller estere. Mineraloljer og estere kan blandes for å tilpasse egenskapene. Dette er ikke mulig med silikonolje. Man kan tilsette 7% mineralolje i naturlige estere uten å redusere brennpunktet. Om man tilsetter estere i mineralolje vil man redusere vanninnholdet i papirisolasjonen. Esterolje kan dermed tørke celluloseisolasjonen uten at holdfastheten i oljen endres mye [32]. For å sjekke tilstand på transformatoren kan man teste oljen basert på oljeparametrene nøytralisasjonsverdi, grenseflatespenning, gjennomslagsspenning og vanninnhold [33].

2.2 Materialeegenskaper til celluloseisolasjon

De cellulosebaserte isolasjonsmaterialene som brukes i krafttransformatorer er papir og presspan. Papiret brukes til å isolere lederne i transformatoren. Dette kan være såkalt kraftpapir, eller termisk oppgradert papir, som er papir behandlet med andre kjemikalier for å tåle høyere temperaturer [34]. Presspanen som brukes i transformatoren kommer med høy og lavere tetthet i varierende grad. Typen som har høy tetthet kalles for HDPB (High Density Pressboard), og brukes der det trengs mekanisk styrke. Det kan for eksempel være i radielle avstandsstykker. Presspan med lavere tetthet brukes der det er behov for å forme isolasjonen.



Figur 2.9: Prøvebiter av presspan med høy tetthet, 25 mm · 25 mm.

Kvaliteten på råmaterialene som brukes i tilvirkningsprosessen av presspan, påvirker følgelig kvaliteten og materialeegenskapene til det ferdige produktet; både når det gjelder mekaniske og elektriske egenskaper. Produsenten Weidmann bruker trevirke fra saktevoksende barskog,

gran og furu til framstilling av cellulosemasse. Det brukes tømmer fra Skandinavia, Canada og nordlige deler av Russland. Begrunnelsen for å bruke saktevoksende tømmer fra kalde områder, er at disse har sterke trefibre som gir god mekanisk, dielektrisk og termisk styrke [35]. Videre er god vannkvalitet svært viktig under tilvirkning av cellulosemassen, der faktorer som pH-verdi, konduktivitet og generell renhet overvåkes nøye.

Produksjon av presspan foregår i flere steg med flere prosesser. Overordnet kan tilvirkningen beskrives som følgende: Trevirke behandles fra tømmer til cellulosemasse, og massen tynnes ut med vann. Urenheter fjernes fra massen og går gjennom en raffineringssprosess, med hensikt å øke den spesikke overflaten til trefibrene. Formålet er at trefiberene skal bindes best mulig til hverandre både mekanisk og ved kjemisk binding av molekylene [35]. Massen går gjennom produksjonanlegget, som former og valser materialet til en viss tykkelse. Videre sendes presspanet inn i en presse, som har til oppgave å presse og tørke materialet samtidig [36]. Til slutt testes den ferdige presspanen grundig, for å sikre at den oppfyller gjeldende krav i henhold til internasjonale normer. Dette gjelder blant annet elektriske, mekaniske og kjemiske egenskaper [35].

Produsenten Weidmann har gjort forsøk for å undersøke materialeegenskaper til presspan med og uten oljeimpregnering. I testene kommer det fram at prøveobjekter som ikke er oljeimpregnert, tiltrekker seg en betydelig større mengde fuktighet enn oljeimpregnerte i løpet av samme tidsrom [37]. Videre viser resultatene at presspanen mister noen få prosent press nokså raskt, ved temperaturendringer. Dette stabiliserer seg også raskt ved stabil temperatur. Likevel er det vanskelig å forutsi langtidsegenskapene, med tanke på at materialene i en transformator på ene siden komprimeres som følge av trykk, og på andre siden utvides som følge av fuktighet [37].

En annen materialeegenskap til presspan er at den har mest plastisk deformasjon ved første press [38]. Derfor blir viklinger førpresset før de settes inn i transformatoren. Ved å gjøre dette før man ferdigstiller transformatoren, vil den ferdige forspenningen være mer motstandsdyktig mot variasjoner i forspenningen [38].

Komprimerbarhet (engelsk: compressability), blant andre, er en av egenskapene som skal være kjent når en kunde går til anskaffelse av presspan. Måten produsenten skal teste dette på er spesifisert i IEC 60641-2 (2004)[39]. Forenklet forklart gjøres denne testen ved å tørke et nummer av prøvebiter i 105°C, deretter presses stablede biter med et press på 20 MPa. Komprimerbarhet i % regnes med følgende formel:

$$C = \frac{\Delta h_1}{h_0} \cdot 100 \quad (2.5)$$

Her er h_0 høyden til prøven ved start og h_1 høyden til prøven ved full kompresjon.

Det er også gitt hvor mye den utvider seg igjen når presset avtar. Kompresibilitet i prosent som er igjen i prøven etter at trykket er borte. Dette regnes ved

$$C_{res} = \frac{\Delta h_2}{\Delta h_1} \cdot 100 \quad (2.6)$$

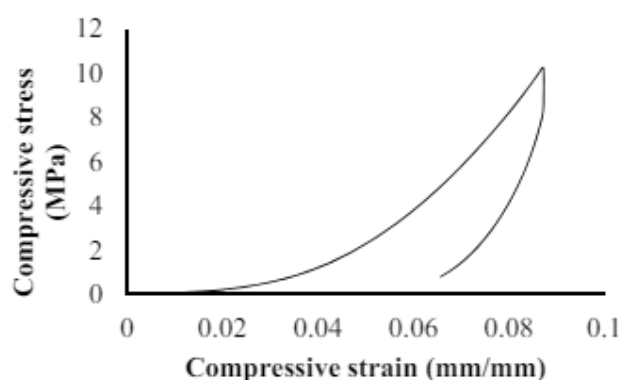
h_2 er høyden til prøven etter endt test.

Den reversible delen av komprimerbarheten skal også oppgis i prosent og regnes ved

$$C_{rev} = \frac{\Delta h_1 - \Delta h_2}{\Delta h_1} \cdot 100 \quad (2.7)$$

Alle tre verdiene skal oppgis og snittet er resultatet av krympingen[39].

En test gjort av Naranpanawe, Ekanayake, Saha og Annamalai illustrerer deformasjon ved første press [40]. Her er et prøveobjekt bestående av HDPB, presset under et trykk på maksimalt 10 MPa. Prøvestykket har dimensjon $10\text{mm} \cdot 10\text{mm} \cdot 10\text{mm}$. Figur 2.10 viser tydelig deformering etter bare en kompresjon. Figur 2.10 viser at under trykk deformeres denne nesten 0,09 mm/mm, men når trykket avtar går den tilbake til en deformasjon på 0,06 mm/mm. Dette vil si at ved en kompresjonssyklus på 10 MPa deformeres prøven 6%.



Figur 2.10: Deformasjon ved en kompresjon på 10 MPa [40].

2.2.1 Impregnering av presspan

Cellulosebasert transformatorisolasjon har små uønskede hulrom på innsiden. Hulrommene har ikke direkte tilgang til oljen rundt, og påvirker impregneringsprosessen. Disse hulrommene lar seg ikke like enkelt som resten av cellulosematerialet fylle av olje. Man impregnerer ofte presspan i et vakuum, men trykket vil ikke alltid bli tilstrekkelig redusert inne i hulrommene til at de tar inn olje. Dette gjør at luftbobler fortsatt kan finnes inne i presspanet, og disse vil kun impregneres over veldig lang tid i olje. Dette fører igjen til at man ved testing av transformatorer kan oppleve partielle utladninger, avhengig av elektrisk påkjenning, størrelsen og plasseringen av luftboblene, og trykket i luftboblen, i følge Paschens lov [41].

Presspan vil naturlig kunne trekke til seg vann om den er eksponert for fukt. Vann i elektrisk-isolasjonsmateriale som presspan, vil påvirke de dielektriske egenskapene negativt. Derfor er det fra industriens side ønskelig at så mye vann som mulig er trukket ut før testing og igangkjøring. Imidlertid setter cellulosens hygroskopiske natur, økonomiske hensyn og industrielle begrensninger grenser for perfekt tørking [42].

2.3 Testing av materialegenskaper

Det eksisterer per idag ingen standardiserte testprosedyrer for langtidstesting av presspan. Tilsvarende tester som den SINTEF Energi ønsker å gjennomføre har heller ikke vært gjennomført tidligere, så designet av testoppsettet er nytt. Det har i midlertid vært gjort lignende forsøk, blant annet av Oria et al., ved universitet i Cantabria, Santander i 2023, Inge Madshaven for SINTEF Energi i 2023 og produsent av transformatorisolasjon, Weidmann, i 2022. For å sammenligne løsninger har disse testene blitt studert.

2.3.1 Universitetet i Cantabria

Oria et al., fra Universidad de Cantabria i Spania gjennomførte en test i 2023. Testen har i stor grad samme bakgrunn som oppgaven gitt fra SINTEF Energi og DynaLoad til bachelorgruppen. Testrapporten til Oria et al., heter "Degredation of the compression strength of spacers made of high-density pressboard used in power transformers under the influence of thermal aging" [43]. Testen skulle undersøke hvordan deformasjon avhenger av aldringen. Først ble flere prøver aldret i ulik tid før man utsatte disse prøvene for et mekanisk trykk. I tillegg ble de dielektriske egenskapene i oljen testet, noe som ikke blir sett nærmere på i denne rapporten.

Aldringsprosessen ble gjort som følger: Først ble 30 mm · 30 mm · 2 mm biter av HDPB lagt i en ovn og tørket på 105°C i fire timer. Parafinolja som også ble brukt i testen ble vakumtørket på 105°C i tre timer og fikk da en fuktighet på 32.1 ppm. Deretter ble de tørkede bitene av HDPB lagt til impregnering i denne oljen i 60°C i 24 timer. Etter at prøven var tørket og impregnert ble den lagt i en beholder med 700 mL olje og med noen biter av kobberledere, i omtrent samme andel kobber/presspan som man finner i viklingene i en transformator. Dette var for å ta høyde for enhver eventuell katalytisk effekt i disse materialene mens de aldres. Deretter ble karet vakuumforseglet og tilsatt nitrogen for en inert atmosfære, før de forskjellige prøvene ble satt i ett klimaskap med temperatur på 150°C over ulik tid mellom 3 dager til 20 uker.

Først når presspanen var ferdig aldret ble den utsatt for mekanisk press. Dette skulle simulere forspenningen presspan blir utsatt for i viklinger. Deretter ble deformasjon målt. For å gjøre dette mer nøyaktig ble det lagt 5 biter av presspan med samme aldring i tårn. Tårnet ble utsatt for tre lastsykluser ved hjelp av en servohydraulisk universell testmaskin. Testmaskinen er utstyrt med en ±5 kN vektcelle og en aktuator med ±50 mm slaglengde. Under lastsyklusene økte kraften til 4 kN med en hastighet på 0,1 kN/s. Deformasjonen ble målt av forskyvningen på aktuatoren.

2.3.2 SINTEF Energi

Madshavens test går ut på å stable 10 biter HDPB og påføre trykk fra en elektromekanisk sylindere (EMC) levert av Bosch Rexroth. I testen blir det brukt to typer prøver. Den ene prøven av presspan har ligget eksponert for luft i lang tid, den andre prøven har ligget i forseglede poser noen måneder. Den elektromekaniske sylinderen er programmert til å presse til den har 500 N trykk, gå tilbake til 100 N før den øker trykket med 500 N, i tillegg til trykket ved forrige påkjenning. Dette repeteres til man har et trykk på 3500 N altså 7 repetisjoner. Presspanet brukt i forsøket har et areal på 625 mm² samt en tykkelse på 3 mm. Trykket over platene blir målt av en vektcelle i bunn. Hele denne syklusen tar bare noen få minutter totalt. Får å måle deformasjonen i denne testen ga sylinderen tilbakemelding på posisjonen [44].

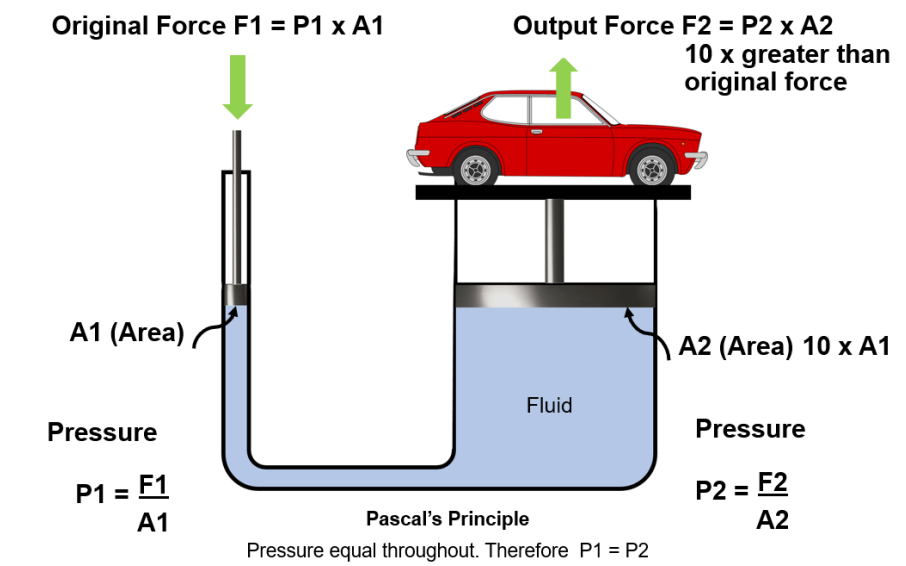
2.3.3 Weidmann

Produsenten Weidmann har utført tester av pressspan, der de utsetter materialet for mekanisk press og varierende temperaturer [37]. Testene er utført for både fortørkede og oljeimpregnerte prøvestykker. Prøvestykkene ble stablet i et manuelt mekanisk testoppsett med vektcelle. Deretter ble de utsatt for et press på $2,5 \text{ N/mm}^2$. Testoppsettene ble plassert i klimaskap med kontroll over temperatur og fuktighet. De fortørkede og oljeimpregnerte prøvestykkene ble utsatt for ulike temperatur og fuktighetsomgivelser.

2.4 Hydraulikk

Et hydraulisk teknisk system består av en rekke komponenter som i samspill med hverandre, utfører et arbeid ved hjelp av en væske, ofte olje, under trykk [45]. Sentrale komponenter i et slikt system er motor, pumpe, arbeidssylinder, ventiler, rørkoblinger og slanger. I dette kapitlet vil de relevante hydrauliske komponentene for denne oppgaven bli beskrevet, for å gi et teoretisk grunnlag for å forstå virkemåten til hver enkelt komponent, og underbygge beslutningene som beskrives i kapittel 3. I slutten av kapitlet finnes et sammendrag, som kort oppsummerer samspillet mellom komponentene.

Hydrauliske systemer er basert på Pascals prinsipp, som sier at en trykkøkning i en del av et lukket hydraulisk system, vil føre til en tilsvarende trykkøkning i hele systemet [46]. Dette prinsippet brukes i hydrauliske systemer for å overføre kraft fra en komponent til en annen, for eksempel fra en pumpe til en sylinder. Kraften som en komponent utsettes for, er produktet av trykket og arealet som trykket virker på. Ved bruk av forskjellige areal kan dette utnyttes til å forsterke kraften, slik som i en jekk hvor et enkelt håndtak gjør det mulig å løfte en hel bil [47]. Figur 2.11 illustrerer den grunnleggende sammenhengen mellom væsketrykk, areal og kraft som benyttes i et hydraulisk system.



Figur 2.11: Illustrasjon - Paschals lov [46].

2.4.1 Hydraulisk pumpe

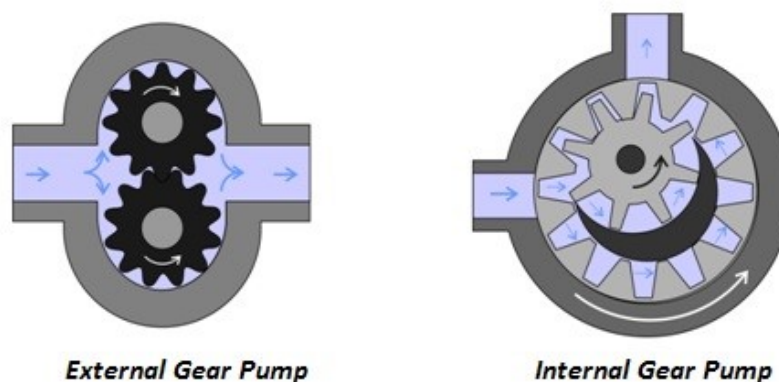
Hydrauliske pumper er en essensiell del av ethvert hydraulisk system. De brukes for å tilføre energi til systemet. For å drive hydraulikkpumper brukes ofte elektriske motorer, men for små jekker og verkstedutstyr brukes gjerne hånd- eller trykkluftpumper [48]. I små industrielle applikasjoner brukes gjerne hydraulikkaggregat med pumpe, tank, motor og sikkerhetsventiler montert til en ferdig enhet. Slike enheter kalles kraftpakker og inneholder alle komponenter som er nødvendige for å drive systemet.

Valg av pumpe gjøres ut ifra krav til effekt, volumstrømning og systemdesign. Hydraulikkpumper deles ofte inn i to kategorier, konstant flyt og variabel flyt [49]. Pumper med konstant flyt leverer en fast væskemengde per rotasjon, dette er typisk for ulike typer girpumper. Pumper med variabel flyt justerer oljemengden de pumper per rotasjon for å opprettholde et bestemt trykk på utløpet. Dette er ofte stempelpumper eller vingepumper [50]. Hvilken type pumpe som brukes setter forskjellige krav til hvordan resten av systemet designes. Ved bruk av pumper med konstant flyt må systemet designes slik at overtrykk ikke forekommer. Dette kan sikres med bruk av ventiler med åpent senter, eller akkumulator og trykkbryter.

Girpumper

Girpumper bruker roterende tannhjul for å pumpe olje. Girpumper har fast geometri, og vil pumpe en fast oljemengde per rotasjon [50]. De deles inn i tannhjulpumper og tannringspumper. En tannhjulpumpe består av to tannhjul inne i et tett pumpehus. Det ene tannhjulet er montert på en drivaksel, som er drevet av for eksempel en elektrisk motor. Det andre tannhjulet er drevet av tannhjulet montert på drivakselen, og roterer i motsatt retning [50] [48]. Tannringspumpen har et indre og et ytre tannhjul. Det indre tannhjulet er plassert i tannhjulsringen [48]. Tannhjulet i senter er drevet av en motor, på samme måte som på tannhjulpumpen, og det driver tannringen rundt. Se illustrasjon av pumpene i figur 2.12.

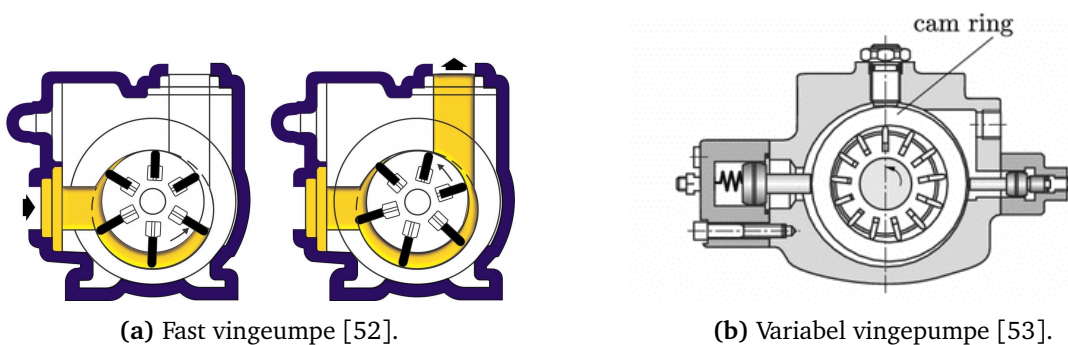
Når tannhjulene roterer, fører det til en volumendring på henholdsvis inn- og utgangsside av pumpehuset. På inngangssiden vil volumet øke, dermed dras en fast mengde væske inn og transporteres mekanisk fra inn til utgangsside mellom tannhjulenes tenner og stasjonære deler av pumpen [48]. På utgangssiden fører sammenføyningen av tannhjulene til at volumet blir mindre, dermed fortrenses væsken ut i utløpet på pumpehuset.



Figur 2.12: Tannhjul- og tannringspumpe [51].

Vingepumpe

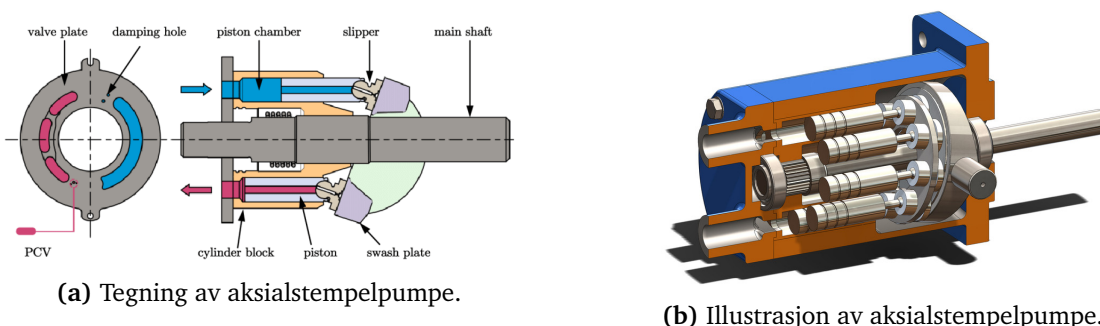
Vingepumper har et rundt hus med rotor. På rotoren er det spor hvor det er plassert plater eller vinger. Disse vingene slynges ut av rotoren mot veggen i pumpehuset når pumpen er i drift. Rotoren er plassert ute av senter i huset, som fører til at avstanden mellom rotor og hus varierer og gir pumpeeffekten [48]. Vingene går inn og ut av sporene i rotoren etterhvert som rotoren går rundt. Det finnes faste og variable vingepumper. Faste pumper oppfører seg tilnærmet likt tannhjuls-pumper, se figur 2.13a. Variable vingepumper har tilnærmet lik utforming, men istedenfor at vingene løper direkte mot huset, er de omsluttet av en ring/sylinder som kan forflytte seg i huset, se figur 2.13b. En servo styrt av utgangstrykket styrer pumpevolumet ved å flytte ringen i forhold til rotoren. Dersom rotoren er konsentrisk med ringen, vil oljemengden som pumpes bli null. Dersom den flyttes ut av senter økes oljemengden per rotasjon. På denne måten kan pumpen variere oljemengde per rotasjon, og opprettholde fast trykk i et systemet ved variert oljeforbruk [48].



Figur 2.13: Vingepumper.

Stempelpumpe

Hydrauliske stempelpumper bruker en roterende aksling med stempel, for å pumpe systemvæsken. De fleste roterende aksialstempelpumper har variabel fortregning. Pumpen har en intern “swashplate” eller skråplate. Denne skaper en lineær bevegelse i stemplene, fra roterende bevegelse i akslingen, ved at platen har en vinkel i forhold til akslingen [48]. Vinkelen på skråplaten endres av en servo i pumpen, og styrer oljemengden som pumpes for hver rotasjon. På samme måte som den variable vingepumpen, kan stempelpumper bruke tilbakemelding fra systemtrykket til å bestemme nødvendig oljeflyt, for å opprettholde trykket.



Figur 2.14: Aksialstempelpumper [54].

2.4.2 Hydraulisk ventil

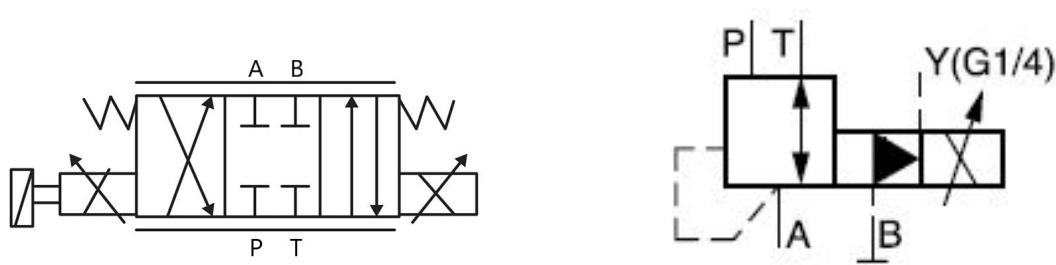
Væskeflyten i et hydraulisk system er i all hovedsak styrt av forskjellige ventiler. Disse kan deles inn i tre hovedtyper. Ventiler som styrer retning, trykk eller oljeflyt [55]. Disse ventilene kan styres av fjærer, pilottrykk, trykkluft, elektrisk eller mekanisk. [56]. Ventiler brukes til å styre retning og hastighet på aktuatorer som sylindre eller motorer. De kan begrense, senke, dempe eller variere trykket i forskjellige deler av systemet. Det finnes en rekke typer og variasjoner av hydrauliske ventiler tilpasset ulike oppgaver. Videre beskrives de relevante for oppgaven:

- Trykkbegrensningsventiler sørger for at trykket i systemet ikke går over ett satt punkt, de refereres også til som sikkerhetsventil. Denne ventiltypen er nødvendig i et hvert hydraulisk system, for å beskytte pumpe og resten av systemet mot overtrykk [57].
- Retningsventiler styrer retningen på væskeflyt. De kan for eksempel brukes for å styre en motor som kan gå i begge retninger, eller et stempel som går inn og ut. Retningsventiler finnes i mange konfigurasjoner med forskjellig antall løp og posisjoner [57]. De enkleste variantene kan ha bare to løp, og veksle mellom åpent og lukket [56].
- Trykkreduksjonsventil senker trykket på utløpet til en bestemt verdi, selv om trykket bak er høyere. Ventilen er normalt åpen, og lukker seg ved et bestemt trykk på inngangen [57].
- Tilbakeslagsventilen slipper veske gjennom i bare en retning. I motsatt retning vil ventilen stenge. Den brukes for å forhindre utilsiktet oljeflyt [55].
- Kuleventiler brukes når det er krav om ventiler som ikke har intern lekkasje. Kuleventiler finnes blant annet som retningsventiler med interne tilbakeslagsventiler som hindrer intern lekkasje [57]. Disse kan brukes på mindre systemer og er begrenset til rundt 30 L/min [57].

Ventiler med flere posisjoner refereres ofte til etter antall porter og posisjoner. For eksempel har en 4/3 ventil fire porter og tre posisjoner, se figur 2.15a. Portene forteller hvor mange tilkoblinger en ventil har. Ofte brukes bokstavene P, T, A og B for å beskrive henholdsvis trykk (Pressure), tank og A/B for to utløp. Ventilen på bilde 2.15a kan brukes for proporsjonal retningskontroll av en aktuator som for eksempel en sylinder. Utløpene A og B går da til hver side av sylinderen. Etter hvilken posisjon (blokk) ventilen står i kan den styre retning, eller holde utstyret i ro.

Enkle ventiler har ofte faste posisjoner, altså at de enten er i en eller annen posisjon, ofte kalt klikk-klakk ventiler. Mer avanserte ventiler kan ha proporsjonal kontroll. Da kan de være i en "mellomposisjon" og brukes for å justere trykk eller hastighet på en bevegelse [58]. På illustrasjonen figur 2.15a vises en parallell strek over og under ventilen som forteller at dette er en proporsjonalventil. Eksempel på slike ventiler er de som brukes i kraner eller gravemaskiner, hvor operatøren trenger nøyaktig kontroll av hydraulikken, for å gjøre jobben trygt og effektivt [58]. Portene i ventilene kan være åpne eller stengt avhengig av applikasjon. Ofte brukes symboler som gjør det enkelt å visualisere oljeflyten.

Figur 2.15b en proporsjonal trykkreduksjonsventil [58]. Symbolet viser utløp, interne pilotløp og proporsjonal solenoid for kontroll. Denne ventilen mottar et elektrisk signal, og gir et proporsjonalt trykk ut på port A.



(a) Proporsjonal retningsventil 4/3 [58].

(b) Proporsjonal trykkreduksjonsventil VMY [59]

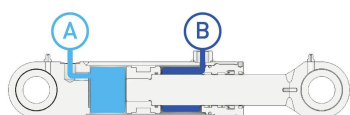
Figur 2.15: Ventilsymboler.

2.4.3 Hydraulisk sylinder

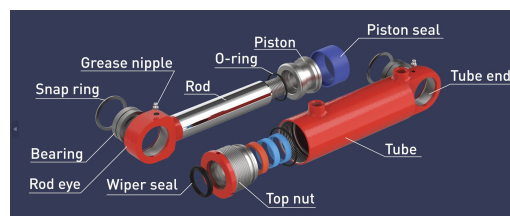
En hydraulisk sylinder er en innretning som omformer hydraulisk trykk til en lineær bevegelse. Ved hjelp av enkle styresystemer og ventiler, kan hydraulikksystemet styre kraft og hastighet på bevegelsen svært nøyaktig [60]. Det finnes to hovedtyper hydrauliske sylindere, enkeltvirkende og dobbeltvirkende [61].

En enkeltvirkende sylinder bruker hydraulisk trykk for å bevege seg i en retning, og krever fjærpress eller en ekstern kraft for returbevegelsen [60]. Typiske enkeltvirkende sylindere er verktøysylindere og løftesylindere på gaffeltrucker [61].

En dobbeltvirkende sylinder kan utøve kraft eller bevegelse i begge retninger [60]. Sylinderen bruker en sylinderstang med et stempel på enden. Ved å styre oljeflyten inn og ut på begge sider kontrolleres bevegelsen, se figur 2.16a.



(a) Dobbeltvirkende sylinder [61].



(b) Sylinder - sprengskisse [61].

Figur 2.16: Dobbeltvirkende sylinder.

2.4.4 Tetninger

Tetninger brukes for å holde væsken i systemet på rett plass [61]. I hydraulikksylindere må oljen holdes på rett side av stampelet og inne i sylinderen. Avhengig av applikasjon kan det brukes flere forskjellige profiler, materialer og design.

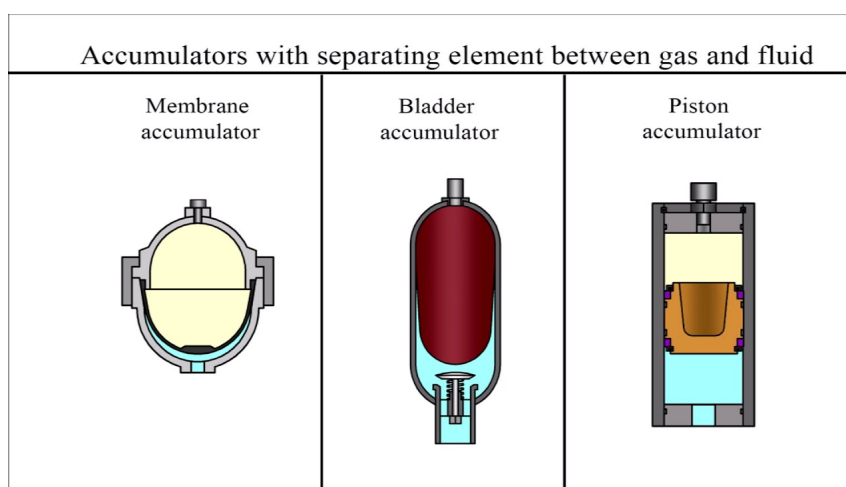
Et svært vanlig tetningsmateriale for O-ringer er NBR/nitrilgummi. Dette er en allsidig, billig og svært mye brukt syntetisk gummiblanding [62]. Den har god motstandsdyktighet mot oljer, og relativt stort temperaturområde hvor de fungerer godt. Øvre grense på temperatur er cirka 100°C (tall varierer fra 100°C til 110°avhengig av blanding og produsent) [63]. For fluorgummitetninger som FKM/Viton[®] økes øvre teoretiske temperaturgrense opp til 205°C [63] [64].

Tetninger av dette materialet har god motstandsdyktighet mot kjemikalier og høy temperatur, men blir hard ved lave temperatur, og er mer kostbar enn andre alternativer [63].

2.4.5 Akkumulator

Akkumulatoren kan ha flere ulike formål i et hydraulisk system ut i fra anleggets hensikt og behov. Eksempelvis kan dette være energilagring, trykkabsorpsjon, pulserings- og støydemping samt å oppta volumendringer i væsken som følge av temperaturendringer [65] [66]. Videre vil det å implementere en akkumulator i et hydraulisk system føre til at man kan benytte en mindre og enklere pumpe. Akkumulatoren utjevner pumpestøt og avgir effekt ved å tilføre ekstra systemvæske når det er behov for større effekt over en kort tidsperiode [67].

Grunnleggende sett deles akkumulatorene inn i to kategorier; mekaniske og hydropneumatiske. Hydropneumatiske akkumulatorene har flere ulike typer design. De tre vanligste er blæreakkumulator, membranakkumulator og stempelakkumulator. Prinsippet for de tre typene er likt. Akkumulatorene har to adskilte sider hvorav den ene siden inneholder gass under trykk. Den andre siden fylles av systemvæsken som følge av at pumpen genererer trykk i systemet som er høyere enn gassens ladetrykk. Når væskesiden av akkumulatoren fylles vil gassen på motsatt side av skillet komprimeres. Dermed lagres det potensiell energi i form av økt gasstrykk. Vanligvis benyttes nitrogengass til dette formålet [65]. Som navnet tilsier har blæreakkumulatoren en tett elastisk gassfylt blære. Trykket i blæreakkumulatoren bygges opp ved at olje strømmer inn i akkumulatorbeholderen gjennom ventilen, og den gassfylte blæren komprimeres. Ettersom gummiblæren kan ta skade av kraftige kompressjoner, egner den seg best i anlegg der det er snakk om mindre volumendringer. Til gjengjeld har den rask trykkrespons og gode pulserings og trykkabsorpsjonsegenskaper [67]. Membranakkumulatoren har en tett membran som skiller akkumulatorbeholderen i to, med gass på den ene siden og væske på den andre siden. I stempelakkumulatoren er det et stempel med tette pakninger som skiller væske og gasside [67]. De mekaniske akkumulatorene benytter en form for mekanisk belastning i stedet for gasstrykk, gjerne vekt eller fjærbelastning.



Figur 2.17: Illustrasjon av akkumulatorene med skille mellom gass og væske [68].

2.4.6 Rør og rørkoblinger

Sammenkoblingene mellom de ulike delene i et hydraulisk anlegg må være av god kvalitet, ettersom anlegget drives under et tidvis høyt driftstrykk med vibrasjoner, temperaturendringer og andre mekaniske påkjenninger. Fordelen med å bruke slanger er blant annet høy fleksibilitet, samt at de demper vibrasjoner i anlegget. I andre tilfeller er rør hensiktsmessig fordi de er mer robust og systemet blir stivere. I hydrauliske anlegg brukes vanligvis kaldtrukkede stålrør som et kompromiss mellom egenskaper og kostnader [69]. Når man dimensjonerer slanger og rør må det tas hensyn til faktorer som oljemengde og rørets hensikt i systemet, eksempelvis trykk, suge eller lekkoljerør [70]. Det brukes en rekke forskjellige standarder for koblinger mellom rør, slanger og komponenter som i varierende grad er compatible med hverandre. Compatible standarder og korrekt montering er avgjørende for at det ikke oppstår lekkasje på systemet under drift.

2.4.7 Trykksensor

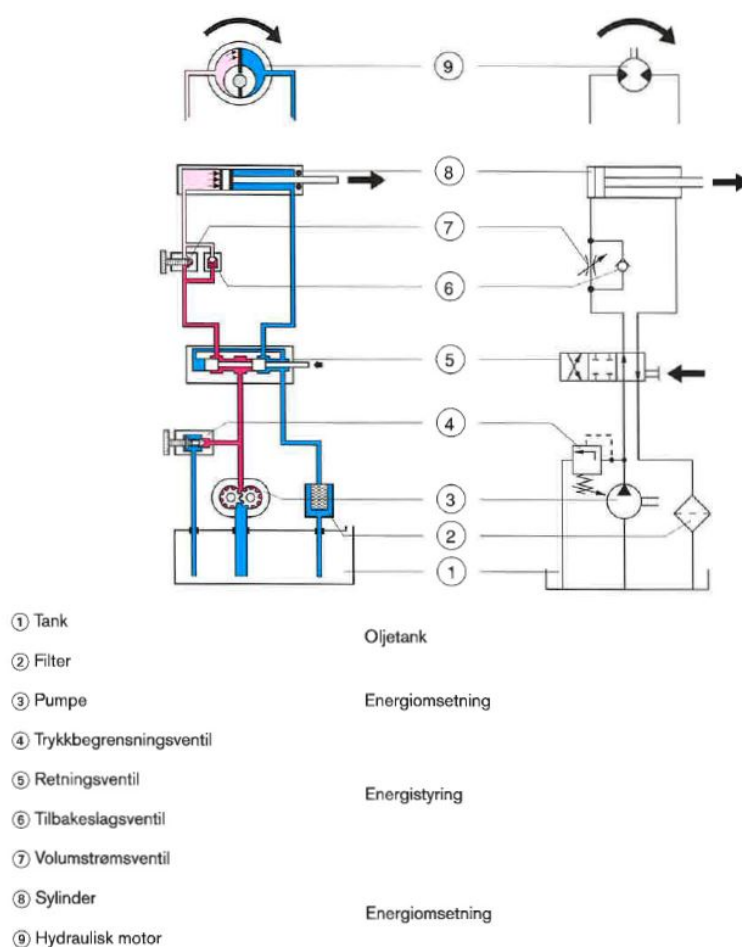
En trykksensor/trykkomformer er en enhet som registrerer væsketrykket i det hydrauliske anlegget, og omformer signalet til et elektrisk signal. Det elektriske signalet kan brukes i samspill med en styreenhet som for eksempel en PLS. Det elektriske signalet fra trykksensorer er vanligvis i intervallene 4-20 mA eller 0-10 V, men andre intervaller samt frekvensmåling forekommer. Signalet fra sensoren genereres ved at trykket i systemet strekker sensorens fleksible membran. Strekkendringen konverteres videre til et elektrisk signal [71].

2.4.8 Hydraulikkolje

For optimal drift av et hydraulisk anlegg med tanke på driftsikkerhet, slitasje og lønnsomhet, er kvalitet og riktig valg av olje avgjørende [72]. Forskjellige typer anlegg stiller ulike krav til oljens egenskaper. Typiske krav er smøreegenskaper, rust- og korrosjonsbeskyttelse, brennbarhet, antiskumegenskaper, viskositet, inkompressibilitet, renhet og miljømessige faktorer [73]. Forurensninger fra anleggets komponenter vil over tid oppstå. Derfor utstyres hydrauliske anlegg med flere filtre med ulike hensikter og egenskaper, for å holde oljen så ren som mulig. Forurenset olje akselererer slitasjen på systemet. Eksempler på forurensing er støv, metallspion og rustavskaling [72]. Driftstemperaturen i oljen påvirker aldriingshastigheten betydelig. En tommelfingerregel som benyttes med hensyn på aldriing av hydraulikkolje er at ved driftstemperaturer over 70 °C fordobles oksidasjonshastigheten på oljen hver gang temperaturen stiger med 10 °C [72].

2.4.9 Hydraulikksystem

I et hydraulikksystem er hver og en komponent avhengig av hverandre, for at systemet skal fungere etter hensikt. Systemet er avhengig av oljetrykk, for å utføre et arbeid. Oljetrykket genereres av en hydraulisk pumpe som drives av en motor [48]. Oljen ledes videre i rør og slanger til en eller flere ventiler som styrer systemet. Her kan trykk, oljeflyt og retning kontrolleres [74]. Videre går oljen til aktuatoren som gjør et arbeid. Dette er ofte en motor som går rundt eller en sylinder som går inn og ut (rotasjon eller lineær bevegelse) [75]. Etter at energien i oljen er brukt opp, ledes oljen tilbake til tank hvor den kan trykkesett i pumpen og brukes på nytt [74]. Typisk virkningsgrad for et hydraulisk system er i størrelsesordenen 50 til 75% [76].



Figur 2.18: Hydraulikksystem som viser retningskontroll av en aktuator. Skisse med illustrasjon på venstre side, tegning med hydraulikksymboler på høyre side [74].

2.5 Pneumatikk

Prinsippene for pneumatikk og hydraulikk er i stor grad like. I pneumatiske anlegg brukes luft eller inertgass under trykk som arbeidsmedium. I pneumatiske systemer er energien lagret i den komprimerte luften. Luft komprimeres i en luftkompressor til et ønsket arbeidstrykk og lagres i en beholder. Fra beholderen føres den komprimerte luften i rør eller slange fram til arbeidsstedet. På arbeidsstedet brukes den komprimerte luften til å utføre et arbeid. Dette kan for eksempel være en muttertrekker eller en sylinder. Pneumatiske systemer opererer med luftrykk i størrelsesorden opp til 10 bar, men unntak med høyere trykk finnes [77]. Luft lar seg i motsetning til olje komprimere. Det kan føre til svinginger i systemet hvis det arbeider mot store mottrykk [78]. Dette medfører at det er utfordrende å kontrollere aktuatorer med konsant hastighet. Som følge av det relativt lave arbeidstrykket, må komponentene i et pneumatisk system være større enn i et hydraulisk anlegg. Økonomisk sett har pneumatikk den fordelen at arbeidsmediet er gratis og mengden er ubegrenset [79]. I tillegg er pneumatiske komponenter som sylindere, ventiler og annet verktøy billigere enn tilsvarende hydrauliske komponenter. Pneumatiske anlegg kan ha svært lav virkningsgrad, ofte i størrelsesordenen 2 til 20% [80].

2.6 Elektrisk styresystem

2.6.1 Hoved- og styrestrøm

I elektriske motorkretser skiller man mellom hoved- og styrestrømkretser. Det lages to separate skjema for hver av kretsene. Hovedstrømskjemaet illustrerer hvordan ledninger fra tilførsel til motoren skal kobles. Styrestrømskjemaet viser hvordan komponentene som skal styre motoren skal kobles, gjerne ved hjelp av sluttekontakter og brytekontakter. Disse kan finnes på kontaktorer, separate releer samt start og stopp brytere. Sluttekontakter kjennetegnes også som NO-kontakter (Normally Open), da de normalt står i åpen posisjon. Brytekontakter er normalt sluttet og kalles NC-kontakter (Normally Closed). Ved hver komponent i skjemaene finner man symbolnavn og to tall som beskriver tilkoblingspunkter. Tallene ved tilkoblingspunktene på hver komponent på skjemaene, skal finnes igjen ved tilkoblingspunktene på de gitte komponentene.

En kontaktor er en elektrisk bryter som brukes mye i automatiserte systemer for å styre store strømmer [81]. Komponentene deles opp i hovedkontakter, hjelpekontakter og en spole. Ved å koble en spenning på spolen vil den slutte hovedkontaktene, i tillegg til å bryte eller slutte hjelpekontaktene. Tilførselen til en motor kan da kobles på den ene siden av hovedkontaktene, og motoren på den andre. Sammen med kontaktoren monterer man ofte et motorvern. Vernet beskytter motoren mot overbelastning. Ved overbelastning bryter det tilførselen til motoren. I tillegg har vernet to hjelpekontakter som vil slutte eller bryte når vernet kobler av tilførselen.

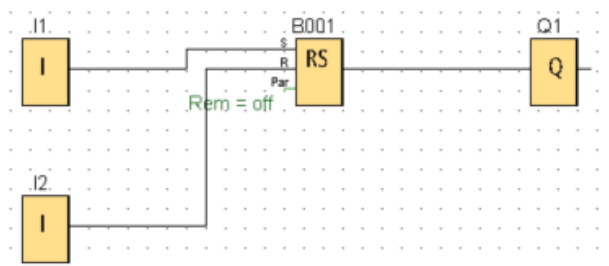
2.6.2 PLS - Programmerbar logisk styring

En PLS (programmerbar logisk styring) er en datamaskin som brukes for styring- eller automatiseringsoppgaver. Oppgavene kan blant annet være styring av lys, varme, motorkretser og mye mer. PLS-en kan håndtere analoge og digitale inn- og utgangssignaler [82]. De analoge signalene er ofte basert på standardsignalene 0-10 V eller 4-20 mA. Programmene PLS-en kjører kan lages ved fire forskjellige språk som er definert i IEC 61131-3:2013, der to av dem er basert på tekst og to er basert på grafiske blokker [83].

Grafisk programmering med logiske blokker (Function Block Diagram) er mye brukt til å programmere PLS-er. Da bruker man logiske funksjoner representert i grafiske blokker, for å programmere styresignalene fra inngang til utgang. Blokkene kobles sammen med linjer i programmet.

Figur 2.19 viser hvordan en enkel motorkrets kan programmeres i PLS-programvaren LOGO! Soft Comfort. Signalflyten går fra innganger på venstre side til utgang på høyre side. Hvis inngang I1 blir høy vil den aktivere RS-vippen slik at utgangen dens blir høy. Da vil utgang Q1 på PLS-en aktiveres. Blir inngang I2 høy vil dette resette RS-vippen og slå av Q1.

RS-vippe er en logisk blokk som ofte er brukt i PLS-programmer som er laget som funksjonsblokkdiagram. Blokken har to innganger og én utgang. R-inngangen står for reset; om den blir høy gis det lavt utgangssignal. S-inngangen står for set; om den blir høy blir utgangssignalet høyt. RS-vippen holder dette høye signalet helt til reset blir høy igjen. Under følger sannhetstabell til en RS-vippe.



Figur 2.19: Skjermbilde av funksjonsblokkdiagram laget i LOGO! Soft Comfort.

Tabell 2.1: Sannhetstabell for RS-vippe

S	R	Q	Hendelse
0	0	x	Status uendret
0	1	0	Reset
1	0	1	Set
1	1	0	Reset

2.6.3 Node-RED

Node-RED er et programmeringsverktøy for å enkelt koble sammen maskinvare som PLS, med andre datamaskiner, API-er og onlinetjenester ved å bruke en nettbasert flytredigerer. Den lar deg koble til forskjellige enheter ved å bygge en kombinasjon av noder som skaper ønsket flyt [84]. Node-RED lar deg lage dashbord hvor man visualisere data, endre parametere og styre brytere. Node-RED har toveis kommunikasjon så lenge man er tilkoblet samme nettverk.

Meldingene som går igjennom en flyt, er JavaScript objekter som kan ha forskjellige egenskaper. Standardegenskapen er **msg.payload**; den noder vanligvis jobber med [85]. Meldingene som legges i **msg.payload** kan blant annet være heltall, flyttall, boolske variabler og tekststrenger. Enkelte noder behandler også **msg.topic**. Dette kan brukes for å identifisere kilden til meldingene, samt de forskjellige strømmene av meldinger i en flyt [85].

Kapittel 3

Prosess og framgangsmåte

I dette kapitlet presenteres først kravene og ønskene som ble gitt av SINTEF Energi i forbindelse med testoppsettet og endringer som har oppstått underveis. Videre beskrives prosessen gruppen har gått gjennom for å komme fram til det endelige resultatet. Dette innebærer utviklingen av det hydrauliske systemet og styresystemet. Kapitlet inneholder begrunnelse for design og komponentvalg.

3.1 Bestilling av testoppsett

Bacheloroppgaven startet med oppgavebeskrivelsen gitt av SINTEF Energi, med arbeidstittel “Hydraulisk/pneumatisk testing av materialer for transformatorer”. Oppgaven beskriver design og utvikling av et testoppsett for akselerert langtidstesting av presspan. Spesifikasjoner gitt for testoppsettet var at det skulle utsette prøvebiter på 25 mm · 25 mm for et press på 10 MPa. Videre måtte testoppsettet kunne plasseres i et varme- eller klimaskap. Deformasjon skulle også måles. Testoppsettet skulle ha en sylinder, enten pneumatisk eller hydraulisk, for å utøve kraften. Kraften måtte kunne varieres fra null og maks kraft på en tid under ett minutt.

Under første møte med oppdragsgiver ble det enighet om å utarbeide en mer konkret bestilling. Denne beskrivelsen ble mottatt 19.01.2024, og beskriver i større detalj kravene som stilles til testoppsettet. I de nye kravene er maksimal kraft satt til 15 kN og høyeste temperatur til 140°C. Testutstyret skal kunne styres av en ekstern kontroller, hvor trykk/kraft og deformasjon måles kontinuerlig. I tillegg ble det forespeilet at testoppsettet sannsynligvis kunne bygges som en del av oppgaven om kostnadene kom i underkant av 100 000 kr.

Da det var uklart hvorfor testoppsettet skulle bli plassert i et varmeskap, ble det utarbeidet en alternativ løsning hvor prøvebitene kunne plasseres i en oljebeholder. I denne løsningen var det tenkt at temperaturen ble regulert med oljen. Løsningen ble foreslått fordi de fleste hydrauliske standardkomponenter ikke tåler temperaturer opp til 140 °C. Etter et prosjektmøte med oppdragsgiver ble dette imidlertid forkastet. Det ble da redegjort for at testen må gjennomføres i et klimaskap, hvor både temperatur og fuktighet er kontrollert, uten prøvene nedsenket i olje. I klimaskapet brukes det salt for å justere relativ fuktighet i luften. Dette muliggjør betydelig raskere endring av fuktighet i prøvene. Med de siste spesifikasjonene ble den endelige løsningen utarbeidet. Denne gangen med utstyr som skal tåle temperatur og fuktighet, samt ha tilstrekkelig kraft, responstid og nøyaktighet.

3.2 Undersøkelse av mulige testoppsett

Bestillingen fra SINTEF Energi hadde ikke en åpenbar løsning. Derfor var det viktig for prosjektgruppen å få god oversikt over oppgaven og finne flere ulike alternative løsninger. Det er viktig å nevne at bachelorgruppen studerer elkraft og bærekraftig energi. Derfor er mekanisk konstruksjon, hydraulikk og pneumatikk, på siden av det gruppen vanligvis har jobbet med gjennom utdanningsløpet. Av den grunn har det vært viktig underveis i prosessen, å tilegne seg kunnskap om både pneumatiske og hydrauliske systemer ved å lese faglitteratur og se læringsvideoer. Dette er jobbet med kontinuerlig gjennom hele prosjektet. Videre er dette formidlet i teorikapittelet, siden oppdragsgiver hadde samme utfordring som gruppen med lite bakgrunnskunnskap om hydraulikk og pneumatikk.

Etterhvert var det naturlig å forhøre seg med fagpersoner innenfor de aktuelle fagfeltene. SINTEF Energi ønsket i utgangspunktet en hydraulisk eller pneumatisk løsning. Utfordringen med en pneumatisk løsning er at trykkluft er begrenset til omlag 8 bar (0,8 MPa), mot 700 bar (70 MPa) i en hydraulisk løsning. Dette gjør at det kreves en sylinder med mye større diameter om man velger å gå for pneumatikk over hydraulikk. Ved dette tidspunktet ble det ikke funnet en pneumatisk sylinder som passet i varmeskapet. Under et møte med senioringeniør ved Institutt for energi- og prosessteknikk Øyvind Haave, ble det gjort klart at dette problemet kunne løses ved å bytte ut trykkluftsynderen med en trykkluftbelg.

Tabell 3.1: Kraftregnskap som viser minste størrelse på hydraulisk og pneumatisk sylinder ved 15 kN og 20 kN. Her er det tatt utgangspunkt i et begrenset lufttrykk på 8 bar (0,8 MPa) og et hydraulisk sylindetrykk på 190 bar (19 MPa).

Kraft [N]	Trykk [Pa]	Areal [cm ²]	Min. syl.diameter [cm]
Hydraulikk			
15000	1.90E+07	7.89	3.17
20000	1.90E+07	10.53	3.66
Pneumatikk			
15000	800000	187.5	15.45
20000	800000	250	17.84

Videre ble det klart at hovedutfordringen med oppgaven var å bygge ett testoppsett som kunne tåle temperaturkravet på 140°C. Den høye temperaturen førte til at luftbelgen ikke kunne brukes. Trykkluftbelgen som ble vurdert, har en oppgitt maksimaltemperatur på 115°C. Selv om testoppsettet skulle driftes som en del av et forskningsprosjekt, er det ikke aktuelt å overskride denne temperaturen på grunn av eksplosjonsfare. Temperaturproblemet var også tilstede med en hydraulisk løsning. Sylindere som ble vurdert var spesifisert til å tåle 65°C. Gruppen gikk, i samråd med oppdragsgiver, ut ifra at sylindere kunne driftes med noe høyere temperatur, muligens opp mot 85°C, gitt at det skulle brukes i et forskningsprosjekt. I tillegg var tanken å drifte sylindere på et betydelig lavere trykk enn det den har som maksimumsgrense. Til tross for dette kunne heller ikke denne løsningen nå ønsket temperatur. Hovedproblemet med økt temperatur for sylindere, er at materialene som typisk brukes i tetningene svekkes betydelig ved temperaturer over 100°C. Det er imidlertid mulig å spesialbestille komponenter som tåler større påkjenninger enn standardkomponentene. Gruppen tok derfor kontakt med Servi AS, som lager spesialbestilte hydraulikkkomponenter, og forespurte om de kunne lage en sylinder i syrefaste materialer som kunne stå med omgivelsestemperatur på 140°C over tid. Dette kunne løses, men en slik bestilling kom til å koste nærmere 100 000 kroner og hadde leveringstid på 24 uker. Dermed ble det utelukket å gå videre med spesialsylindere.

Et siste alternativ Øyvind Haave foreslo, var å bygge en løsning hvor man verken hadde hydraulikk eller pneumatikk inne i klimaskapet. Da var det tenkt å ha testoppsettet på utsiden med en momentarm gjennom veggen av skapet. I samråd med oppdragsgiver ble denne løsningen forkastet, på grunn av at den ble for komplisert. I tillegg måtte løsningen tilpasses hvert enkelt klima- eller varmeskap.

Prosjektgruppen gikk tilbake til å undersøke en hydraulisk løsning, og kontaktet ON Hydraulikk AS. De mente at en hydraulisk løsning ville kunne fungere også ved 140°C, dersom man byttet tetningene i sylindere til FKM-tetninger. Gruppen tok kontakt med Hydraulikk Teknikk AS, som importerer Enerpac sylindere, som videre tok kontakt med Enerpac. De kunne bekrefte at ved å bytte tetninger i deres sylindere, ville den kunne tåle opp mot 205°C. Det ble også bestemt å gå for en overdimensjonert sylinder, for dermed å kunne kjøre den på et mye lavere trykk enn den er dimensjonert for. Dette er også et tiltak der man reduserer faren for å sprengte tetningene.

Videre ble det utarbeidet en hydraulisk løsning. Denne består av en pumpe, som lader en akkumulator mens en kontrollerbar proporsjonalventil styrer hvor mye olje som slippes ut i sylindere, og dermed kraften den utøver. Dette er løsningen som ble levert i forprosjektet 15.02.2024. Øyvind Haave anerkjente løsningen dersom utfordringene med temperatur ble løst. ON Hydraulikk AS kom også med et forslag til en lignende løsning, hvor proporsjonalventilen ble erstattet av en proporsjonal trykkreduksjonsventil. Det ville gi en bedre kontroll av trykket på sylindere og mindre hysteresis.

Gruppen ble videre anbefalt å konsultere Per Ole Hasselvold, senioringeniør hos SINTEF Energi, som har god kunnskap til både hydraulikk og styresystemer. Hasselvold mente at det kunne bli for stor usikkerhet på grunn av hysteresis i en proporsjonalventil. Hvis man skulle ha en ventil av denne typen som var nøyaktig nok, ville det bli kostbart. Hasselvold kom med et annet alternativ, som benytter pumpen koblet direkte til sylindere, med en proporsjonal trykkbegrensningsventil som slipper trykket til tank. Ideen her er å bruke en så liten pumpe som mulig, og la denne gå kontinuerlig så lenge trykket i sylindere skal økes. For å begrense trykket i sylindere, ventileres noe av oljen til tank. Det er denne ventilen som bestemmer trykket inn på sylindere. Her vil ikke hysteresis bli noe problem, men pumpen vil gå betydelig mer enn på andre løsninger. Noe som vil føre til høyere energiforbruk og mer varme. Likevel er dette trolig den løsningen som ville vært billigst å bygge. Denne løsningen hadde fungert, men både Hasselvold og gruppen ble enige om å gå for en modifisert versjon av den originale løsningen, bare med ventilen anbefalt av ON hydraulikk AS.

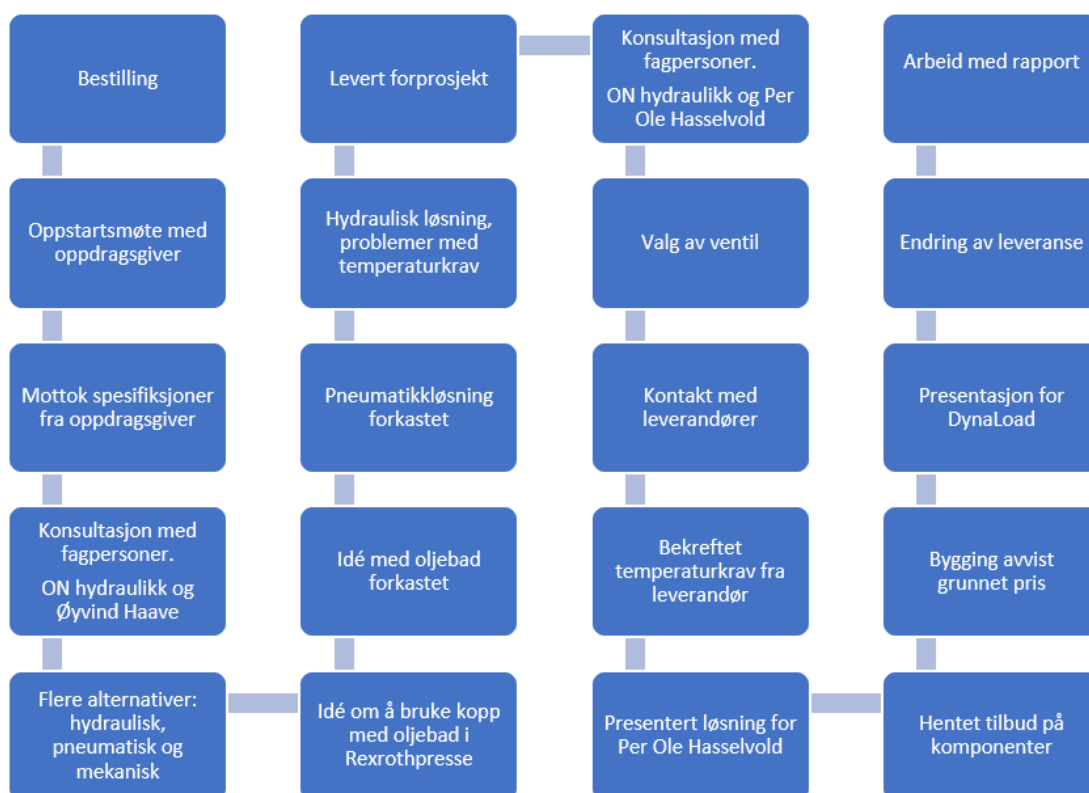
Til slutt måtte det vurderes hvilken kontroller som skulle styre testoppsettet. I første beskrivelse fra oppdragsgiver, var det spesifisert at det er ønskelig å kontrollere testoppsettet fra en lab-pc, helst ved bruk av programmeringsspråket Python. Underveis i gjennomføringen av prosjektet, har gruppen undersøkt flere alternative kontrollere, blant annet LabVIEW, pyboards (mikrokontrollere basert på microPython) og arduino/ESP32-alternativer. En vurdering ble gjort i samråd med Per Ole Hasselvold, og til slutt ble løsningen å bruke en PLS av typen Siemens LOGO!, grunnet dens høye driftsikkerhet og lave investeringskostnader.

Da gruppen hadde foreslått et konsept som alle parter hadde tro på at skulle fungere, ble det satt igangsatt innhenting av tilbud på deler. For hydrauliske deler som ikke var hyllevarer, ble det sendt ut forespørsel om tilbud til ParTech AS, Hydraulikkteknikk AS, ON Hydraulikk AS og X-Tech AS. Den mest lønnsomme løsningen ble å bestille enkelte deler fra Hydraulikkteknikk AS, og andre deler fra ParTech AS. Hydraulikkteknikk AS ville også ta jobben med å skifte tetninger på sylindere. For rør, fittings, elektriske komponenter og andre hyllevarer, ble det

laget en handlekurv på RS-online. Da fikk man estimert en pris for disse varene også. Beregnet totalpris på denne komplette løsningen, ble i underkant av 100 000 kroner.

Til tross for at 100 000 kroner var forespeilet budsjett, hadde ikke DynaLoad-prosjektet økonomiske midler til rådighet, for å investere i testoppsettet så sent i prosjektet. Bachelorgruppen ble bedt om å holde en presentasjon for en arbeidsgruppe i DynaLoad som var samlet i Trondheim. Presentasjonen ble holdt med formål om å vekke interesse for et fortsettelsesprosjekt, der testoppsettet kan realiseres. Videre avtalte bachelorgruppen og SINTEF Energi, at oppgaven ikke trengte å omformuleres helt. Systemet kan prosjekteres ferdig og fungerende styreprogram utvikles.

Figur 3.1 viser tidslinjen for hele prosessen fra start til slutt.



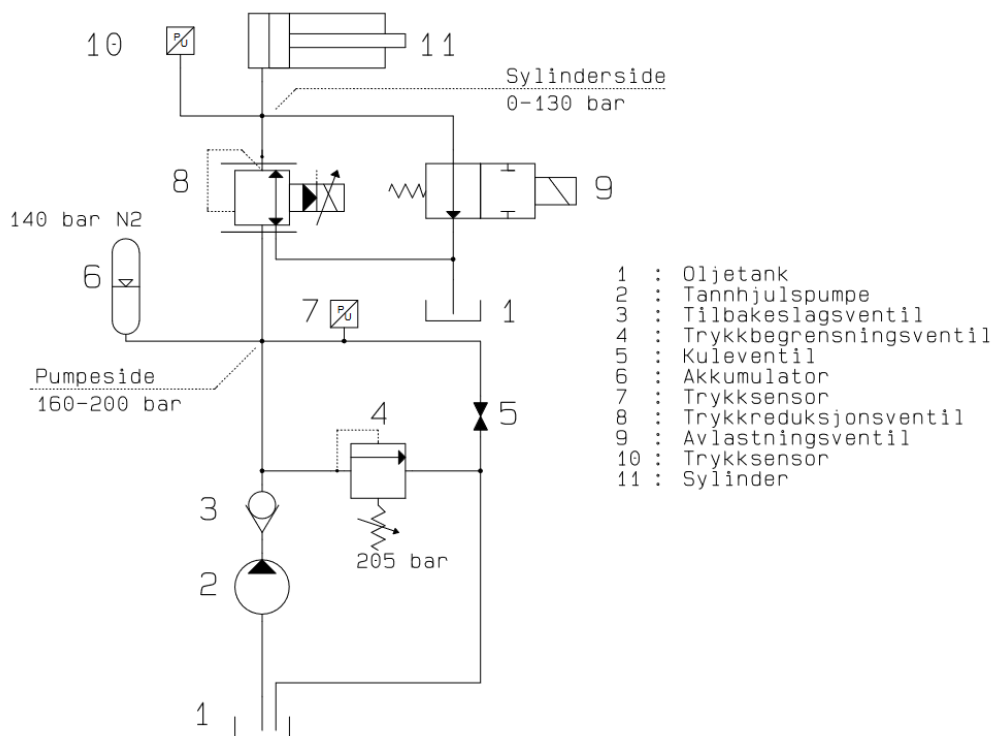
Figur 3.1: Overordnet tidslinje for prosessen.

Kapittel 4

Design og utvikling av testoppsett

4.1 Utvikling av hydraulisk system og presse

I utviklingsprosessen ble det besluttet å bruke et hydraulisk system for å lage testoppsettet. Ønsket funksjon av hydraulikksystemet er at det skal utøve en variabel kraft på et testobjekt. Da er det nødvendig å bygge trykk som kan drive en hydraulisk sylinder. Hydraulikksystemet deles opp i en pumpe-side og en sylinder-side slik det illustreres i figur 4.1. Ved å ha et større trykk på pumpe-siden, kan ventilen som separerer sidene overføre ønsket trykk til sylinderen. Hva som skal til for å gjøre dette blir beskrevet i følgende underkapittel. I tillegg blir alle komponentvalg i hydraulikksystemet beskrevet og hvilken funksjon komponentene har.



Figur 4.1: Hydraulikkskjemaet viser hvordan komponentene kobles sammen.

Oljetank

Det er valgt en oljetank på 5 liter til hydraulikkaggregatet. Oljetanken til testoppsettet trenger ikke være veldig stor grunnet liten oljemengde som brukes under drift. Oljemengden som trengs fra å flytte stempelet fra indre til ytre posisjon er bare 0,078 liter. Likevel sees det på som en fordel med 5 liter tank med hensyn på naturlig kjøling av væsken og for å fylle akkumulatoren. Videre er testoppsettet designet for å kunne operere flere parallelle tester samtidig. Dermed kan det være behov for større oljemengde enn til bare én testsløyfe. I figur 4.1 er dette komponent nummer 1. Pumpen henter olje fra tanken, og returløpene fører oljen tilbake til tank.

Tannhjulpumpe

Tannhjulpumpen er komponent nummer 2 i figur 4.1. Den er koblet til en 0,55 kW elektrisk motor som går på 1500 o/min. For hver omdreining pumpes det 2,1 cm³ olje. Dette gir en maksimal oljeflyt på 3,15 liter per minutt. Det er flere grunner til at valget falt på en tannhjulpumpe framfor en mer kompleks Pumpe. Tannhjulpumpen er enkel i konstruksjon og mye brukt, derfor er prisen lavere enn andre aktuelle alternativer. Videre har testoppsettet akkumulator som kompenserer for pulserende oljestrømning ut fra pumpen. Dette motvirker de negative egenskapene til pumpen, og dermed er denne pumpetyperen tilfredsstillende for testoppsettet. Det er valgt en Pumpe og motor med relativt lav effekt da det er tilstrekkelig for applikasjonen. I tillegg kan en Pumpe på denne størrelsen drives fra en 16 A 1-fase kurs, som gjør systemet enklere å plassere, da det ikke er nødvendig med en 3-fase kurs.

Tilbakeslagsventil

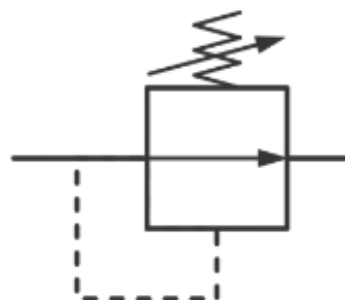
På utløpet fra pumpen er det montert en tilbakeslagsventil (kontraventil). Dette er komponenten merket 3 i figur 4.1. Tilbakeslagsventilen tillater oljeflyt én retning, i dette tilfellet fra pumpen til resten av systemet. Formålet til ventilen er å hindre oljeflyt i uønsket retning, men la oljen passere fritt i den andre retningen. I dette systemet brukes den for å sikre at systemtrykket ikke presser olje tilbake gjennom pumpen når den stanser. Det er nødvendig fordi akkumulatortanken vil opprettholde systemtrykket når pumpen stopper. Ventilen er lekkasjefri og godkjent for opp til 400 bar.

Trykkbegrensningsventil

Komponent 4 i figur 4.1 er en trykkbegrensningsventil som beskytter systemet mot overtrykk på pumpesiden. Den settes til 205 bar grunnet designet systemtrykk på 200 bar. Denne komponenten er svært sentral for å sikre de resterende komponentene mot skader som følge av overtrykk. Om trykket på inngangen blir høyere enn innstilt verdi, vil ventilen åpne og slippe olje tilbake til tank for å begrense trykket i systemet. Overtrykk kan skade alle komponenter, men ofte er det den svakeste som ryker først. I dette systemet er det trolig slanger eller tetninger i pumpen. Dersom en slik situasjon inntreffer, vil det kunne skape farlige situasjoner. Ventilen vises i figur 4.2a. Ventilen kan håndtere oljeflyt opp til 400 liter per minutt, som er betydelig mer enn pumpen kan produsere.



(a) Bilde av ventilen [86].



(b) Ventilsymbol [87].

Figur 4.2: Trykkbegrensningsventil, manuelt justerbar 7-350 bar [86].

Kuleventil

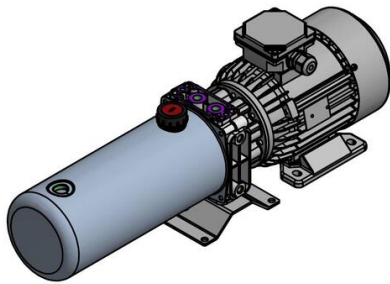
Komponent nummer 5 i figur 4.1 er en kuleventil. Den gir systemoperatøren mulighet til å manuelt slippe oljetrykket på pumpe side tilbake tank. Dette er en manuell ventil og kan dermed ikke styres via styresystemet. Ventilen har ingen intern lekkasje så lenge den er lukket, og har ingen innflytelse på systemet når det er i drift.

Akkumulator

Akkumulatoren, nummer 6 i figur 4.1, er en blæreakkumulator som forlades med nitrogengass (N_2) til et trykk på 140 bar. Denne gir systemet mulighet til å lagre energien og porsjonere den ut ettersom systemet kjører. På denne måten vil man unngå at pumpen går hele tiden. Dette gjør systemet mer energieffektivt og gir et lavere kjølebehov. I anlegg med store volumendringer, ville det vært hensiktsmessig å valgt en annen type akkumulator, grunnet fare for at det kan oppstå skader på blæren. Siden det er snakk om relativ liten volumendring under normal drift, egner blæreakkumulatoren seg godt, og har fordelen med rask responstid ved plutselig effektbehov. Blæreakkumulatoren som er valgt til dette testoppsettet, har et volum på 1L og maksimalt driftstrykk på 350 bar. Blæreakkumulatorens design vises i figur 4.3b.

Trykksensor

I figur 4.1 er komponent 7 og 10 trykksensorer som kobles til styringsenheten. Trykksensorene gir kontinuerlig tilbakemelding til styresystemet om oljetrykket. Signalet fra trykksensoren på pumpe siden brukes for å gi signal til å starte og stoppe den elektriske motoren, og dermed pumpen. Om trykket faller under 160 bar starter pumpen, og den vil stoppe igjen når trykket er 200 bar. Trykksensoren på sylindersiden forteller hvilken kraft prøven er utsatt for, samtidig som den gir styringen mulighet til å hindre for stort overtrykk. Figur 4.4 viser hvordan trykksensoren ser ut.



(a) Kraftpakke, pumpe med motor og hydraulikkertank [88].



(b) Akkumulator [89].

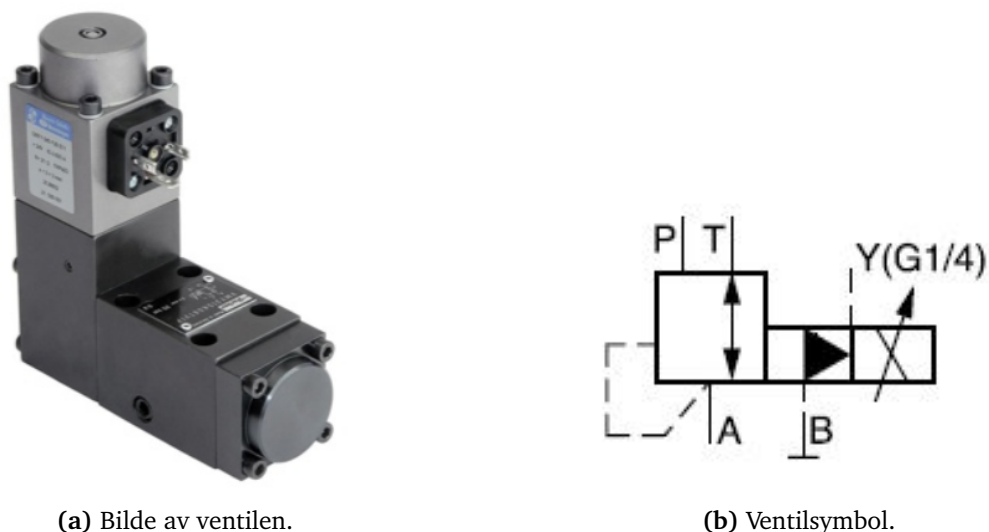
Figur 4.3: Pumpe og akkumulator.



Figur 4.4: Trykksensor [90].

Proporsjonal trykkreduksjonsventil

Den proporsjonale trykkreduksjonsventilen er i komponent 8 i figur 4.1. Ventilen har et styrekort som driver solenoiden. Styrekortet tar imot et elektrisk signal, 0-10 V eller 4-20 mA, fra styringsenheten og gir et elektrisk signal til ventilen. Ventilen gir videre et proporsjonalt hydraulisk trykk på utgangen. I dette systemet skal den gi ut et trykk mellom 0-130 bar. Ventilen er laget for bruk i testutstyr og motvektsystemer, og er derfor velegnet for testoppsettet. Denne ventilen beskytter også mot overtrykk på sylindersiden, ved at den slipper olje tilbake til tank gjennom ventilen dersom trykket på utløpet blir for stort. Dette er nyttig siden trykket på utløpet kommer til å øke når temperaturen i klimaskapet øker. Ventilen har høy nøyaktighet, repeterbarehet og lav hysteres. Styrekortet gjør det enkelt å styre ventilen da den bare trenger ønsket settpunkt, og tar seg av reguleringen internt. Den foreslåtte ventilen fra produsenten Parker har maksimal strømningshastighet på 40 L/min. Dette vil si at ventilen aldri kommer til å være i øvre sjiktet kapasitetsmessig i dette systemet, og derfor vil den opptre svært lineært. En siste grunn til at valget falt på å velge en ventil fra Parker, er at deres ventil ikke har behov for oljegenomstrømning for å opprettholde stabilt trykk på utløpet. Lignende ventiler fra Bosch Rexroth krever oljestrømning på rundt 0.65 L/min [91].



(a) Bilde av ventilen.

(b) Ventilsymbol.

Figur 4.5: Proporsjonal trykkreduksjonsventil VMY [91].

Avlastningsventil

På sylinderens side er det også lagt til en retningsventil som trykkavlastningsventil. Dette er nummer 9 i figur 4.1. Denne ventilen er normalt åpen, og trenger et elektrisk signal for å lukke. Det vil si at dersom strømtilførselen kobles ut, vil ventilen tappe sylinderens side for energi, ved å slippe oljen til tank. Det er også programmert en tilleggsfunksjon som gjør at om trykket blir over 135 bar på trykksensor nummer 10, åpner avlastningsventilen. Dette er en ekstra sikkerhetsfunksjon i tilfelle det er feil på den proporsjonale trykkreduksjonsventilen, og den ikke slipper tilbake olje. Det er spesielt viktig med den ekstra sikkerheten dette gir, når det er snakk om olje ved høy temperatur. Retningsventilen har en intern lekkasje på fem dråper i minuttet.

Enkeltvirkende sylinder

Komponent nummer 11 i figur 4.1 er aktuatoren i systemet. Det er en Enerpac verktøysylinder, oppgradert med FKM tetninger, for å tåle temperaturen på 140°C. Dette er en malt sylinder med forkrommet stempelstang, som skal være godt rustet for salt og fuktig klima inne i klimaskapet. I stedet for malt sylinder, kunne man valgt en spesialbestilt sylinder i syrefast stål. Som tidligere beskrevet er det svært kostbart. Enkeltvirkende sylindere leveres ofte med retur fjær, i denne applikasjonen er det ønskelig å fjerne retur fjæren, for å få mindre usikkerhet i systemet ved temperaturendringer. Når testen pågår vil testobjektet og tyngdekraften presse stempelet tilbake. For å få prøven ut av pressen etter test dyttes stempelet tilbake for hånd.

Stempelet har oppgitt et areal på $14,4 \text{ cm}^2$, noe som betyr en diameter på 4,28 cm. Sylinderen skal kjøres på maks 130 bar, som vil gi en maksimal kraft på 18,703 kN. Kravet for oppgaven var 15,0 kN. Dette er den kraften som vil virke på de 25 mm · 25 mm store prøvestykkene. De vil da bli utsatt for et trykk på opp til $29,92 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ som tilsvarer 29,92 MPa. Sylinderen har en vdring på 54 mm. Det vil si at fra helt komprimert sylinder til fullt utslag, vil oljevolumet skille $77,7 \text{ cm}^3$. Sylinderen er illustrert i figur 4.6b.

Hydraulikkvæske

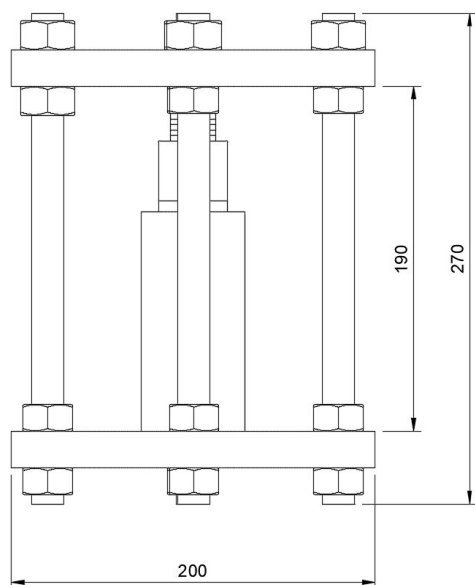
På grunn av at deler av det hydrauliske anlegget skal kunne stå plassert inne i varmeskap med temperaturer opp til 140°C, anbefales det å bruke en brannsikker hydraulisk væske. Dette er en ekstra sikkerhetsbarriere i tilfelle lekkasje inne i varmeskapet. For eksempel kan HFC-væske være et alternativ. Det er en type hydraulikkvæske som er mye anvendt, og kan brukes til de fleste vanlige formål der en brannsikker olje er ønsket [72].

Rør og koblinger

Systemets deler må kobles sammen på en trygg måte. For delene som skal kobles sammen utenfor varmeskapet, anbefales det å bruke slanger fordi de er fleksible, som gjør montasjen enklere enn rør. Det anbefales å bruke stålrør mellom den proporsjonale trykkreduksjonsventilen og sylindere. Røret må tilpasses for å kunne monteres inn via en inngang på varmeskapets side. Et annet alternativ er å bruke hydraulikkslanger som oppfyller kravet til temperatur. Fordelen med slanger framfor et stivt rør er at eventuelle vibrasjoner fra motor og pumpe ikke forplanter seg videre til enheten inne i varmeskapet.

Presse

Pressen illustrert i figur 4.6a skal plasseres inne i varmeskapet. Den består av to runde stålplater som monteres parallelt med fire gjengestenger mellom. Gjengestengene i pressen tilpasses i lengder av minimum 270 mm. Avstanden mellom platene justeres med muttere. Figur 4.6a viser sammenstilling av pressen. I pressen festes hydraulikk sylindere og avstandssensoren. For å sikre at det ikke blir for mye defleksjon i pressen er endeplater og gjengestenger overdimensjonert. De valgte gjengestengene har en bruddstyrke på 203 kN pr stk, altså langt over det de kan utsettes for her. Til endeplate er det tiltenkt å bruke en blindflens DN80 PN40. Dette er en 20 mm tykk stålplate med ferdigborede hull. Platen har utvendig diameter på 200 mm og er beregnet som blindflens på rør med 80 mm diameter og trykk på 40 bar. De er altså beregnet på en kraft på 20,1 kN uten betydelig deformasjon. Det er valgt å lage pressen av blindflenser og gjengestenger da dette er billig, enkelt å montere og det ikke er nødvendig å maskinere deler. For å feste sylindere må det bores og forsenkes to hull i endeplaten i bunnen. Gjengene i bunnen av sylindere er 5/16"UNC så hullene må være minimum 8 mm.



(a) Monteringstegning presse.



(b) Bilde av sylindren.

Figur 4.6: Monteringstegning for pressen og bilde av sylinder.

4.2 Utvikling av elektrisk styresystem

For å ha mulighet til å kontrollere testoppsettet, må det designes et elektrisk styresystem. Systemet deles opp i en hovedstrømkrets og en styrestrømkrets. Hovedstrømkretsen er delen av systemet som krever lavspent vekselstrøm (230 V). I dette systemet er det bare den elektriske motoren. Styrestrømkretsen skal styre testoppsettet. Her inngår avstandsmåler, trykksensorer, PLS, nødstoppbryter, magnetkontakter til hydrauliske komponenter, spolen til en kontaktor og en hjelpekontakt til motorvernet. Spenningsnivået på styrestrømmen er 24 V. Enkelte komponenter som man finner i hovedstrømskjemaet i figur 4.7, kan også finnes i styrestrømskjemaet i figur 4.8.

Styresystemets komponenter bør monteres og kobles sammen i et styreskap. Skapet beskytter komponentene mot ytre påvirkninger som støv, fukt og fysiske støt. Videre bidrar det til å minimere faren for utilsiktet berøring av strømførende deler. I skapet skal det monteres DIN-skiner som de elektriske komponentene fysisk monteres fast på. Det er tenkt at skapet skal kunne tilkobles en vanlig stikkontakt, for å forsyne systemet. Selv om det ikke er tegnet inn i hoved- eller styrestrømskjemaet, bør tilførselen til skapet kobles til en last- eller servicebryter. Da har man mulighet til å slå strømmen av og på uten å plugge ut støpselet fra stikkontakten. I tillegg trenger styrestrømkretsen en 24 V strømforsyning.

Alle elektriske komponenter i dette systemet er hyllevarer. Foruten PLS-en, er det ikke valgt konkrete merker og modeller for komponenter som inngår i styringen. Grunnen til dette er at oppdragsgiver har kommunisert at de kan ha enkelte komponenter på lager. Det er også ofte rask leveringstid på utstyret som skal brukes i styresystemet.

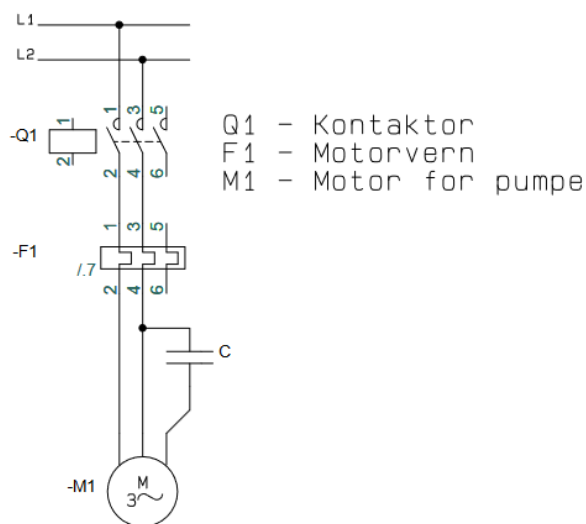
Pumpen som skal bygge trykk i testoppsettet må drives av en elektrisk motor. For å starte og stoppe motoren, er det valgt å bruke en kontaktor. Dette er komponent Q1 i hoved- og styrestrømskjemaet. I hovedstrømskjemaet vises bryteren i kontaktoren, solenoiden som styrer bryteren vises i styrestrømskjemaet. Solenoiden aktiveres ved å tilkoble en elektrisk spenning

på 24 V. PLS-programmet bestemmer når dette skjer, og blir beskrevet i kapittel 4.3.

Komponent F1 er motorvernet. Dette skal beskytte motoren mot overbelastning. Vernet stilles inn slik at det løser ut hvis strømmen overstiger motorens merkestrøm. Hvis vernet bryter strømmen, vil brytekontakten (95-96) bryte. Kontakten kan brukes til å varsle PLS om overstrøm slik at den stopper styresystemet.

For å kunne stoppe pressen hurtig ved en feil eller lignende, trengs en nødstoppbryter. Dette er komponent S1 i figur 4.8. Bryteren har tre kontaktsett. Det første settet brukes til å varsle PLS-en om å stoppe programmet. De andre to settene brukes for å stoppe pumpen og åpne sikkerhetsventilen ved å bryte kretsen til solenoidene. Dette er en ekstra sikkerhetsbarriere i tilfelle feil i systemet.

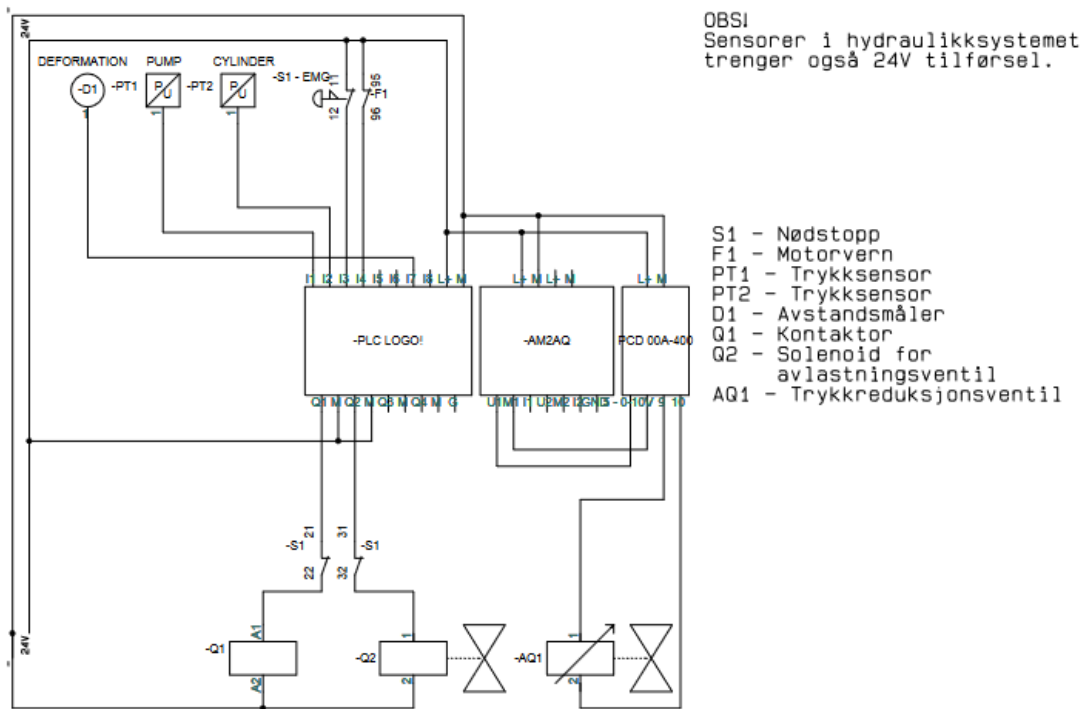
For interne koblinger i skapet kan man bruke RK 1,5 mm² for hovedstrøm og RK 0,75 mm² for styrestrøm. Inn- og utgående kabler kan termineres i rekkeklemmer i styreskapet. Det vil gjøre det oversiktlig og enklere å koble styreskapet. Kabelen som skal plugges i stikkkontakten bør være av en type som er beregnet for å være bevegelig. Dette kan være gummikabel eller PMH-kabel. Begge kablene kan brukes for flyttbare maskiner. Samme kabel kan brukes imellom styreskap og motor. Kablene som skal til sensorer fra styreskapet bør være laget for signaloverføring i styreapplikasjoner. LIYCY 0,75 mm² er et godt alternativ.



Figur 4.7: Hovedstrømskjema for løsningen. Motoren som er valgt selges ferdig koblet med motorkondensator slik at den kan brukes som enfase-motor.

4.3 Utvikling av PLS-program

Logo! Soft Comfort er PC-programmet man bruker for å programmere Logo! PLS-en. For å forstå oppbyggingen av PLS-programmet bør man bruke vedlegg A.1 sammen med følgende underkapittel.



Figur 4.8: Styrestrømskjema for løsningen. De tre komponentene midt på skjemaet er PLS-en, utvidelsesmodul til PLS-en og styrekortet til den proporsjonale trykkreduksjonsventilen til testoppsettet.

Innganger og utganger

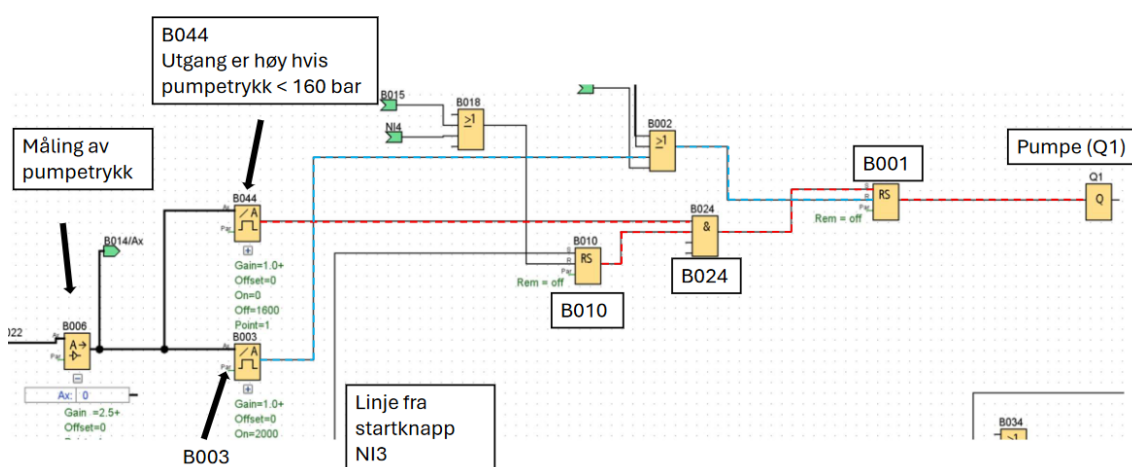
Kontrolleren har analoge og digitale innganger og utganger. De digitale inngangene gir høy verdi hvis det settes spenning på inngangen. Digitale utganger har arbeidskontakter som slutter hvis den får høyt signal i programmet.

Analoge innganger kan motta en spenning mellom 0-10 V. I dette systemet er det valgt trykksensorer som har et måleområde mellom 0-250 bar. Sensorene sender en spenning mellom 0-10 V avhengig av hvilket trykk de måler. Om de måler 250 bar, vil 10 V sendes. PLS-en vil konvertere 10 V til verdien 1000 i programmet. For å konvertere dette til verdier som stemmer med måleområdet til sensoren, benytter man funksjonsblokken Analog Amplifier. Funksjonsblokken kan skalere inngangssignaler med verdier mellom 0 og 10. For å oppnå høyest mulig oppløsning, og få verdiene til å stemme med sensorens måleområde, skaleres inngangsverdien med 2,5. Dermed er området justert til 0 og 2500.

Analoge utganger fungerer på samme måte som inngangene. Utgangssignalet som sendes til utgangen i PLS-programmet ligger i området 0-1000. Utgangsblokker justeres slik at de bruker verdier som stemmer med arbeidsområdet til komponenten som skal kobles til utgangen. Den proporsjonale trykkreduksjonsventilen valgt til dette systemet har område 0-210 bar. For å sende riktige verdier til utgangen AQ2, settes områdeverdien til Analog Ramp-blokken til 0-2100. Hvis Analog Ramp-blokken når verdien 2100, vil den sende verdien 1000 til utgangsblokken. Da kan man måle 10 V på utgangen styrekortet til trykkreduksjonsventilen er koblet til.

Pumpedrift

På pumpesiden av systemet ønsker man å holde trykket mellom 160 og 200 bar. For å løse dette, er det benyttet to funksjonsblokker som heter Analog treshold trigger. Blokkene måler en analog inngangsverdi, og setter utgangsverdien høy eller lav, basert på terskelparameterne man stiller inn blokkene på. I programmet kobles inngangene på blokk B044 og B003 til inngangssignalet fra trykksensoren, til pumpesiden av systemet. Blokken B044 er programmert slik at den setter utgangen høy i verdier over null, og lav ved verdier over 1600 (160 bar). Denne blokken setter RS-vippen B001 som styrer hydraulikkpumpen høy. Det vil si at blokken starter pumpen når trykket er under 160 bar. Videre er blokken B003 innstilt slik at den gir høyt utgangssignal ved 2000 (200 bar). Denne blokken nullstiller RS-vippe B001 som stopper pumpen. For å starte og stoppe pumpestyringen bruker man henholdsvis trykknapp NI3 og NI4. Trykknappene bestemmer utgangsverdien av RS-vippe B010.



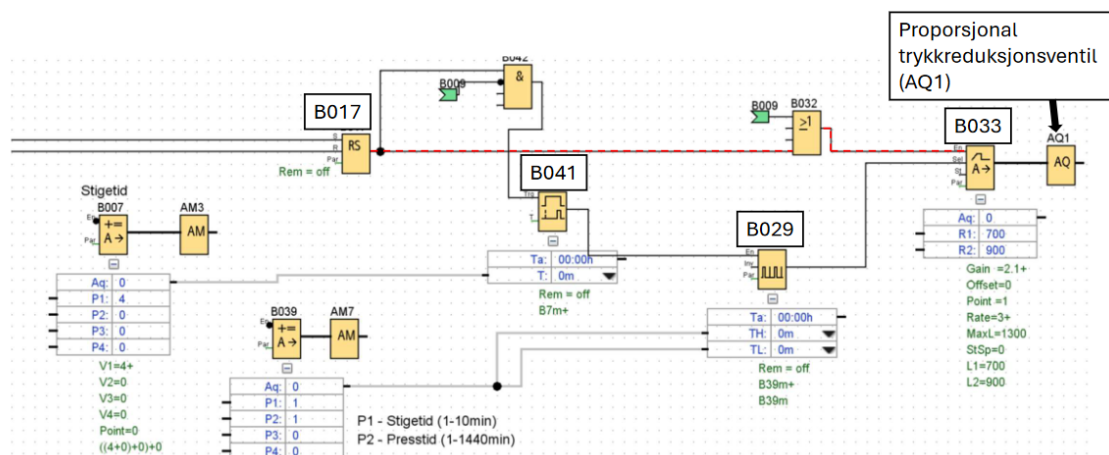
Figur 4.9: Signalflyt i PLS for pumpekrets. Rød linje illustrerer hvordan signalene går når trykket er under 160 bar på pumpen, og startknappen har blitt aktivert. Blå linje illustrerer signalflyten når 200 bar er nådd, og pumpen skal stoppe.

Kraftsyklus

Et av de ønskede driftsprogrammene til hydraulikkpressen, er å kjøre kraftsykluser. I dette programmet skal pressen kjøre sykluser der den presser testobjektet ved en gitt lav kraft, i en tid mellom 1 minutt til 24 timer. Videre skal kraften stige opp til en høy verdi, der testobjektet skal presses på nytt i samme tid som ved lav kraft. Verdien for høy og lav kraft, kan begge justeres mellom null og maks kraft. Stige- og senketiden skal være justerbar mellom 1 og 10 minutter.

For at pressen skal kjøre kraftsyklus på testobjekter, benytter man Analog Ramp-funksjonen i Logo! Soft Comfort. Dette er blokk B033 i PLS-programmet. Analog Ramp-blokken bestemmer verdien som sendes til den analoge utgangen AQ1, som den proporsjonale trykkreduksjonsventilen skal kobles til. Funksjonen har tre viktige parametre som må justeres; *level 1* (L1), *level 2* (L2) og *speed of change* (rate). L1 og L2 er henholdsvis parametrene for lav og høy kraft. L1 og L2 baserer seg på trykk målt i bar. I PLS-en vil verdien 1000 representere 100 bar. Rate er parameteren som representerer stigetiden. Denne må legges inn i steg per sekund. For

å justere stigetiden riktig fra minutter til steg per sekund, må man dividere differansen mellom L1 og L2 med ønsket stigetid i sekunder.



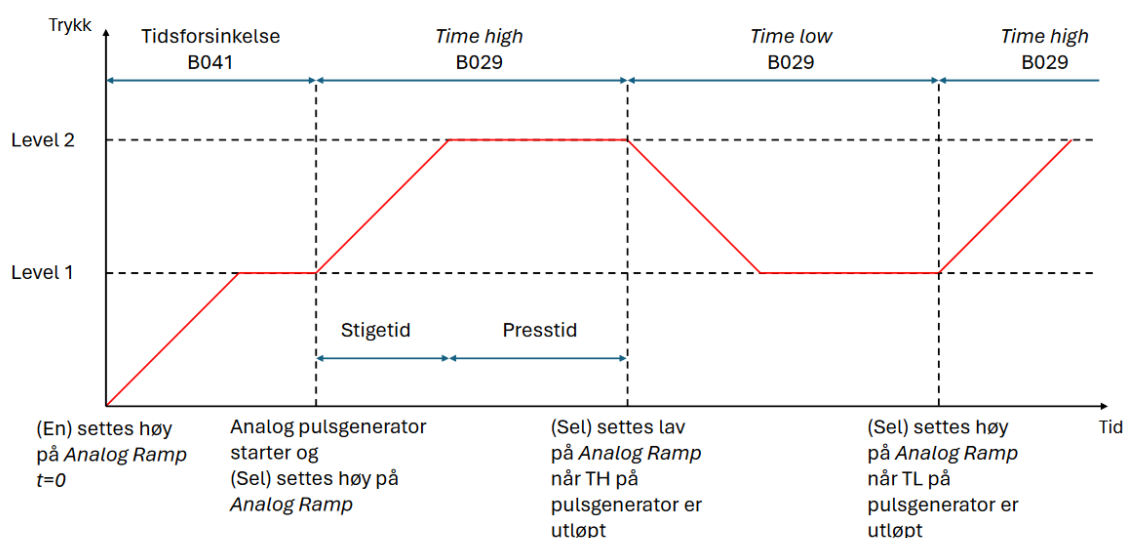
Figur 4.10: Skjermbilde av signalflyt i PLS med det samme startknapp for kraftsyklusprogram aktiveres. Signalet stopper ved tidsforsinkelseblokken B041. Etter forsinkelsen vil syklusen starte. Figur 4.11 viser hva som skjer etter startknapp NI2 blir påtrykt.

Analog Ramp-blokken har to innganger som utnyttes, disse kalles *enable* (En) og *select* (Sel). Settes *enable* til høy, vil blokken starte og utgangssignalet stiger opp til L1. Hvis *select* er lav, vil blokken holde seg ved L1. Settes *select* høy, vil verdien stige mot L2. Hvis *select* blir lav etter den har vært høy, vil verdien senkes ned til L1 igjen. For å veksle mellom høyt og lavt press, benyttes en asynkron pulsgenerator. Dette er blokk B029 i PLS-programmet. Når den settes høy, vil den gi et høyt utgangssignal i ønsket tid som velges i parameteren *time high*. Etter tiden blokken gir høyt utgangssignal er utløpt, gir den lavt utgangssignal i ønsket tid som velges i parameteren *time low*. Parameterverdiene for *time high* og *time low* må begge være summen av stige- og presstid. Da vil Analog Ramp-blokken få tid til å stige eller senke til ønsket verdi, presse i ønsket tid, og veksle om igjen.

For å starte kraftsyklusprogrammet må trykkbryter NI2 påtrykkes. Den vil aktivere RS-vippen B017, som igjen setter *enable* til høy på Analog Ramp-blokken. Samtidig skal denne aktivere den asynkron pulsgeneratoren B029, men her settes det en tidsforsinkelse imellom ved blokken B041. Grunnen til dette er at rampen må få nok tid til å nå L1 før syklusene starter. Etter forsinkelsen er utgått, vil pulsgeneratoren starte. Da vil rampeblokken gradvis gå fra L1 til L2, og sende tilsvarende signal til utgangsblokken AQ1. Når *time high* er utgått, vil den gjøre samme prosess i motsatt retning. Programmet vil veksle slik til RS-vippen B017 nullstilles. Trykkknapp NI1 brukes for å stoppe testen.

Konstant kraft

Det andre driftsprogrammet som pressen skal kunne utføre, er å holde en konstant kraft. Programmet utnytter samme Analog Ramp-blokk som kraftsyklusprogrammet. Ved å trykke på trykkbryter NI5, vil man sette RS-vippe B009 til høy. Da vil Analog Ramp-blokkens *enable*-inngang settes høy, og verdien på blokken vil gradvis øke til verdien stilt inn på L1. Pulsgene-



Figur 4.11: Utgangsverdi til Analog Ramp-blokk som funksjon av tid. Ved $t=0$ blir startknappen for kraftsyklusprogrammet påtrykt.

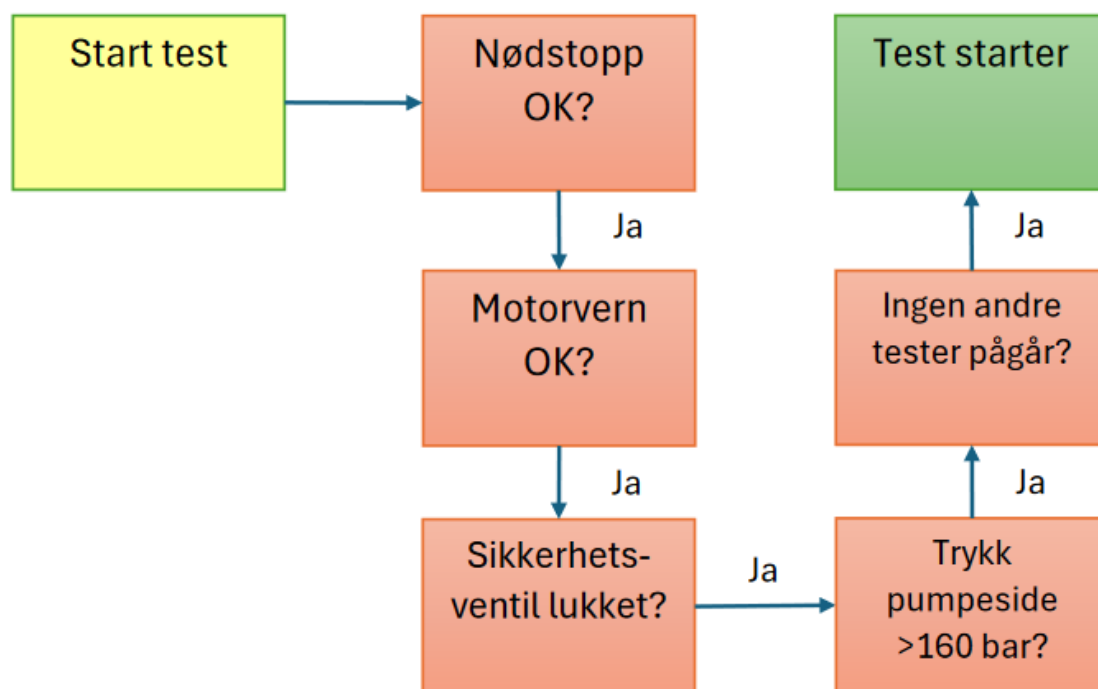
ratoren vil ikke tre i funksjon, og verdien vil altså holdes konstant ved ønsket verdi man stiller L1 til. Hvor fort man ønsker at verdien skal nås, stilles inn i rate-parameteren.

Forriglinger

For sikkerhet til operatør av pressen og driftssikkerhet, trenger programmet forriglinger. Det sikrer at systemet stopper ved en feil, ikke starter ved for lavt trykk, eller starter et nytt program samtidig som testoppsettet kjører et annet.

Systemet stopper ved påtrykk av nødstop, eller dersom motorvernrelé løser ut. Både nødstoppen og motorvernreléet, har brytekontakter som åpnes dersom de aktiveres. I deres normale posisjon vil inngangssignalene være høy. Av den grunn kobles de inverterte signalene deres sammen i eller-blokken B004. Hvis en av inngangene endrer posisjon, altså mister spenning, vil utgangen på B004 bli høy. Videre vil dette nullstille RS-vippen B001, som styrer hydraulikkpumpen, og RS-vippen B016 som styrer avlastningsventilen. Det vil si at pumpen vil stoppe og avlastningsventilen vil åpne. Da tømmes systemet for trykk på sylindersiden. I tillegg er det inverterte signalet fra RS-vippen B016, koblet til nullstill-inngangen på RS-vippe B009 og B017. Dette er vippene som starter de ulike driftsprogrammene. Det vil si at når avlastningsventilen ikke har spenning, altså er i åpen stilling, vil et driftsprogram stoppe eller ikke ha mulighet til å starte.

Det er ikke mulig å starte programmet for konstant kraft samtidig som kraftsyklus-programmet er aktivert, eller omvendt. Hvis RS-vippe B009, som starter programmet for konstant kraft har høy utgang, vil det inverterte signalet fra denne inngangen gjøre at og-blokk B042 blir lav. Da kan ikke den asynkrone pulsgeneratoren B029 starte. Hvis RS-vippe B017, som starter kraftsyklus-programmet har høy utgang, vil og-blokk B012 være lav. Da kan ikke RS-vippe B009, som starter programmet for konstant kraft, aktiveres.



Figur 4.12: Blokkskjemaet som illustrerer forriglingene grafisk. Hvis svaret på en blokk er nei, vil ikke testoppsettet starte.

For sikkerhet i systemet og for systemoperatøren, er det sikret mot overtrykk. Maksimale trykk på sylindere er satt til 130 bar. Hvis trykket overstiger dette og usikkerhetsmarginen til sylindere, skal systemet automatisk stoppe. Dette er løst i programmet med Analog threshold-blokk B015. Den får inn trykket målt på sylindere. Hvis den måler 135 bar eller høyere vil den nullstille RS-vippe B001 og B016, som er henholdsvis vippene som styrer hydraulikk-pumpen og trykkreduksjonsventilen. I tillegg vil den nullstille RS-vippe B010, som aktiverer pumpekretsen. Dermed kan man ikke starte pumpen igjen, før trykket er under 135 bar på sylindersiden.

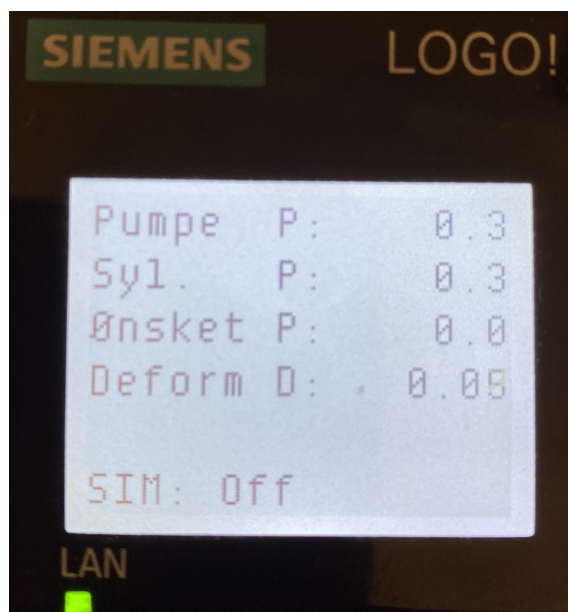
Det er ikke nødvendig med en egen Analog threshold-blokk, for å sikre mot overtrykk på pumpe-siden av systemet. Programmeringsvalgene for pumpekretsen sikrer at trykket aldri overgår 200 bar. I tillegg er det designet en mekanisk trykkbegrensningsventil i det hydrauliske systemet.

Logging av data

PLS-programmet skal brukes til laboratorieforsøk, derfor er det ønskelig å logge data. For å gjøre dette brukes en asynkron pulsgenerator og Data Log-blokk. I Data Log-blokk velger man hvilke verdier man ønsker å logge. I dette programmet er det deformasjon og trykk på sylindere som logges. Hver gang inngangssignalet på Data-Log blokk settes høy, vil den utføre en avlesning. Pulsgeneratoren brukes for å styre hvor ofte man skal logge. I dette programmet er tiden utgangen er høy satt til 0,5 s, og tiden utgangen er lav til 9,5 s. Da vil man få en logging hvert tiende sekund. Dataene som logges skrives til en CSV-fil på et SD-minnekort som settes i PLS-en.

Framvisning av data på PLS-skjerm

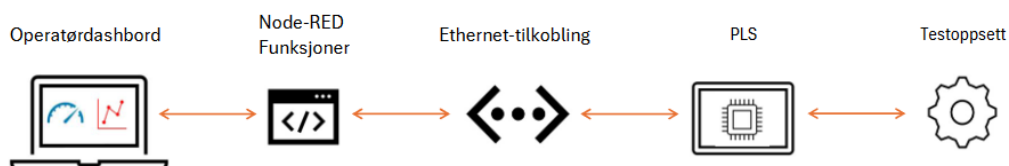
For å vise sanntidsdata på PLS-skjermen, er det benyttet Message Text-blokker. Blokkene kan konfigureres slik at man kan vise verdier fra ønskede blokker. Flere blokker muliggjør flere skjemvinduer man kan bla mellom. I det ene vinduet blir målt pumpetrykk, målt sylindetrykk, ønsket sylindetrykk og målt deformasjon framvist. Det andre vinduet viser parameterverdiene for høyt trykk, lavt trykk, stigetid, presstid, tidsforsinkelse til syklusstart og rate-parameteren. Verdiene for trykk er oppgitt som steg, rate som steg per sekund og verdiene for tid er oppgitt i minutter.



Figur 4.13: Bilde av PLS-skjerm.

4.4 Utvikling av operatørdashbord

For å lettere stille inn parameterverdier til PLS-en og starte og stoppe hydraulikkpressen, er det valgt å bruke Node-RED til å lage et operatørdashbord. Node-RED serveren kan settes opp lokalt på en lab-PC.



Figur 4.14: Oversikt over signaltrafikk for testoppsettet.

Interaksjon med PLS

Node-RED har en utvidelse slik at man kan lage noder for å samhandle med Siemens Logo!. For å gjøre dette må man åpne port 102 på PLS-en, slik at Node-RED kan sende beskjeder via denne porten ved ethernet-tilkobling.

Det er to noder nødvendig for PLS-samhandling; inngangsnoder (S7 in) og utgangsnoder (S7 out). Inngangsnodene brukes hvis du vil motta data fra PLS-en og bruke dem i Node-RED. Utgangsnodene brukes hvis man vil skrive data til PLS-en.

For å kunne sende eller motta data fra PLS-en, må nodene konfigureres slik at man velger at dataoverføringen skal foregå via ethernet, hvilken IP-adresse Node-RED skal samhandle med og hvilken port som skal benyttes. Det er IP-adressen til PLS-en og port 102 som skal velges her. I tillegg må hver node ha en variabel med en adresse som PLS-en gjenkjenner. Noen adresser er tilgjengelig for avlesning uten at man må manuelt programmere dem i PLS-en, mens andre må programmeres i det variable minnet (VM) til PLS-en. Adressene som programmeres i det variable minnet til PLS-en, kan leses fra eller skrives til. Alle adresser som er brukt i programmeringen finnes i tabell 4.1.

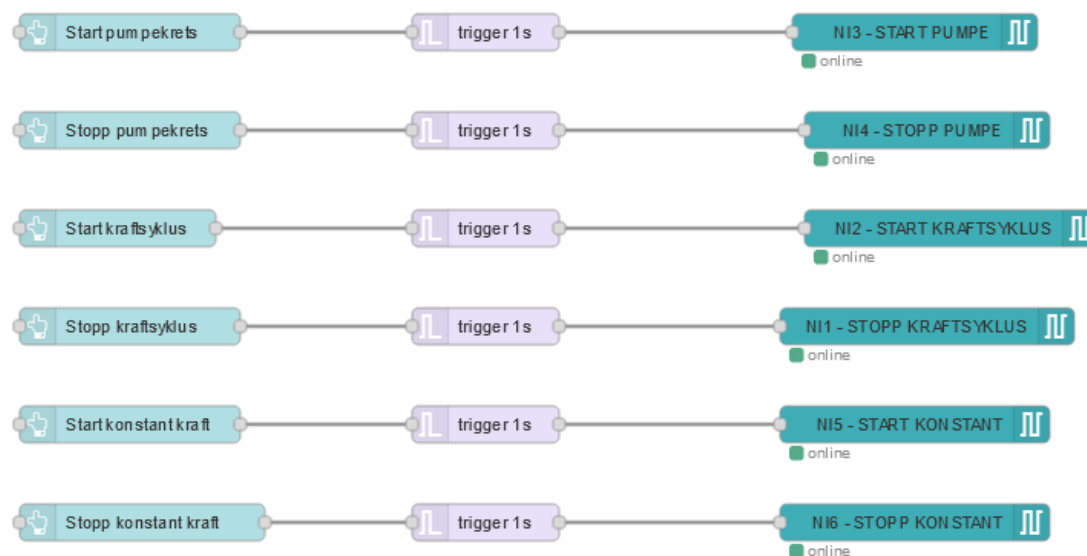
Tabell 4.1: Adressetabell for Node-RED og PLS.

VM Adresse	Blokk	Parameter	Funksjon	Node-RED-adresse
	NI1		Stopp kraftsyklus	DB1,X30.0
	NI2		Start kraftsyklus	DB1,X32.0
	NI3		Start pumpekrets	DB1,X34.0
	NI4		Stopp pumpekrets	DB1,X36.0
	NI5		Start konstant kraft	DB1,X38.0
	NI6		Stopp konstant kraft	DB1,X40.0
	Q1		Pumpe	DB1,X1064.0
	Q2		On/Off - ventil	DB1,X1064.1
0	B033	Level 1	Utgangstrykk lav	DB1,WORD0
2	B033	Level 2	Utgangstrykk høy	DB1,WORD2
4	B033	Speed of change	Stigetid (steps/s)	DB1,WORD4
6	B033	Current level	Display utgangssignal	DB1,WORD6
8	B007	V1	Forsinkelsestid	DB1,WORD8
10	B039	V1	Stigetid (min)	DB1,WORD10
12	B039	V2	Presstid	DB1,WORD12
14	B006	Ax	Trykk pumpe-side (AI3)	DB1,WORD14
16	B015	Ax	Trykk sylinder (AI4)	DB1,WORD16
18	B020	Ax	Deformasjon (AI1)	DB1,WORD18

Start- og stoppknapper

For å enkelt styre pressen er det implementert digitale trykkbrytere i Node-RED. Hver node som har et pekefingersymbol indikerer en trykknapp. I merkelappen på noden står det hvilken funksjon knappen har. Knappene sender en beskjed hver gang de trykkes i dashbordet. I dette programmet sender alle knappene den boolske variabelen *true*. Denne beskjeden går først til en triggerfunksjon, som umiddelbart videresender beskjeden til nettverksinngangen i PLS-en. Når inngangen får beskjeden *true*, settes inngangen høy. Inngangen forblir høy til den får en

annen beskjed. Ønsket er at inngangene skal være trykknapper. Av den grunn sender triggerfunksjonen den boolske variabelen *false* ett sekund etter beskjeden *true* har blitt sendt.



Figur 4.15: Skjermbilde av flytredigereren i Node-RED. Signalflyten går fra trykknappene til venstre, via triggerfunksjonene og videre til PLS-en.

Trykkgrenser

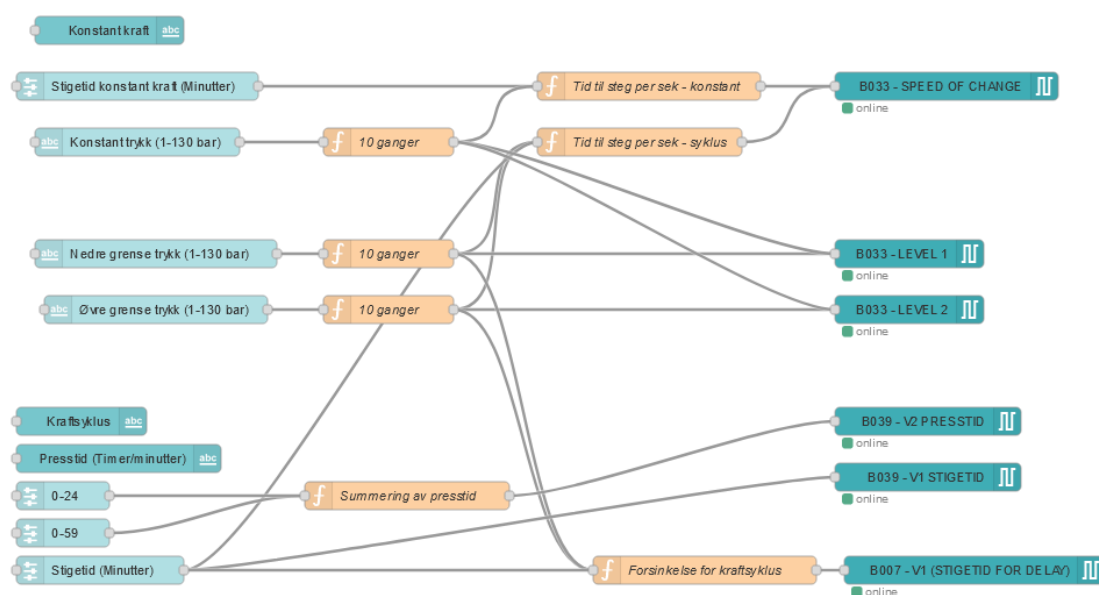
For å endre parameterverdier i blokker på PLS-programmet, kan man skrive verdier til variable minneadresser. Dette blir utnyttet ved funksjonene som bestemmer grensene for trykk. Dashboardet er delt opp i to deler. Den ene delen er for programmet som skal kjøre kraftsykluser, mens den andre er for programmet som skal kjøre konstant kraft.

For kraftsyklus-programmet, er ønsket å endre L1 og L2 på Analog Ramp-blokken i PLS-programmet. I dashboardet finner operatøren to tekstbokser, der skal ønsket verdi for nedre og øvre trykk (i bar) skrives. Begge boksene er separate noder i flytdiagrammet. Nodene er koblet via en funksjonsnode som multipliserer meldingen den mottar med 10, og videresender den til noden som er koblet på utgangen. Nedre grense for trykk sendes til en utgangsnode som er koblet til PLS-en sin variable minneadresse 0, mens øvre grense sendes til adressen 2.

Programmet for konstant kraft fungerer likt som beskrevet ovenfor. Forskjellen er at når operatøren skriver inn ønsket grense for trykk, multipliseres verdien med 10, og sendes til både L1 og L2 på den analoge rampeblokken.

Presstid

Presstiden til kraftsyklusprogrammet er spesifisert til å måtte kunne settes mellom 1 minutt og 24 timer. PLS-programmet ønsker tidsverdier i minutter. Derfor er det laget en funksjon i Node-RED, som konverterer innskrevet verdi til minutter, før det sendes til PLS-en. Først er det laget to noder som lager glidebrytere i dashboardet. Den ene noden er for timer, og har området 0 til 24, mens den andre noden er for minutter og har området 0 til 59. Utgangsverdiene fra



Figur 4.16: Skjerm bilde av flytredigereren i Node-RED. Flyten viser de ulike inntastingsnodene som sender parameterverdier til PLS-en.

glidebryterne blir sendt til funksjonsnoden “summering av presstid”. Java-koden i 4.1 viser innholdet i funksjonsblokken, som summerer tiden og konverterer den til minutter.

Kodeliste 4.1: Node - Summering av presstid.

```

context.min = context.min || 1;
context.timer = context.timer || 0;
var sum

// Sjekker om minutter eller timer blir sendt
if (msg.topic==='min') {
  context.min=msg.payload;
}

else if(msg.topic==='timer'){
  context.timer = msg.payload*60; // Timer til minutter
}

// Summerer presstiden
sum = context.timer + context.min;

if(sum===0){
  msg.payload=1;           // Minste presstid er 1 minutt
}

else{msg.payload = sum;}

return msg;

```

For å velge presstid i Node-RED, må ønsket tid skrives til den asynkrone pulsgenerator-blokken (B029) i PLS-programmet. Som nevnt tidligere, må pulsbreddene til generatoren være summen av presstid og stigetid. Av den grunn er det brukt en matematisk instruksjonsblokk (B039) i PLS-programmet. Blokken har fire mulige inngangssignaler, og er i dette programmet programmert til å summere inngangssignalene. Det er bare to innganger som blir brukt her. Ver-

diene heter V1 og V2 i Logo! Soft Comfort. Utgangsverdien fra funksjonsblokk “summering av presstid”, sendes til parameter V2 i blokk B039. Stigetid sendes til V1.

Stigetid

For å kunne bestemme stigetiden til Analog Ramp-blokken i PLS-en, må tid konverteres fra minutt til steg per sekund. Funksjonsnodene som heter “Tid til steg per sek”, inneholder selvlagde JavaScript-funksjoner som løser dette.

I kraftsyklusprogrammet mottar funksjonen øvre og nedre grense for trykk oppgitt i bar. Disse verdiene skrives i operatørdashbordet. For å gjøre verdiene om til steg som PLS-en bruker, blir verdiene multiplisert med 10, før de kommer inn i funksjonsblokken “Tid til steg per sek - syklus” som inneholder koden oppgitt i 4.2. I tillegg må stigetid velges i dashbordet. Her kan man velge en tid mellom 1 og 10 minutter. Denne verdien blir også sendt til funksjonsblokken. For å sortere hvilke verdier som kommer fra de ulike nodene, sjekker den hvilken “topic” meldingen har. Stigetid-noden sender en melding der innholdet er et tall mellom 0-10 minutter, mens nodens “topic” er “tid”. Videre så regner funksjonen differansen mellom lav og høy trykkverdi, og dividerer dette på ønsket stigetid. Resultatet sendes til den variable adressen 4 i PLS-en. Denne adressen bestemmer verdien for rate-parameteren til Analog Ramp-blokken. I tillegg sendes stigetid i minutter til matematisk instruksjonsblokk B007. Denne blir videre koblet til tidsforsinkelsesblokken B041, som er lagt inn for å la Analog Ramp-blokken nå L1 før syklusen starter.

Kodeliste 4.2: Node - Tid til steg per sekund.

```
context.upper = context.upper || 1; // Øvre grense
context.lower = context.lower || 1; // Nedre grense
context.tid = context.tid || 1;    // Rampe
var diff;

// If-setningene sjekker hvilken node som sender melding
if (msg.topic==='upper') {
    context.upper=msg.payload;
}

else if(msg.topic==='lower'){
    context.lower = msg.payload;
}

else if(msg.topic==='tid'){
    context.tid = msg.payload;
}

diff = context.upper - context.lower;
// Verdien returneres i steg per sekund
msg.payload = diff/(context.tid*60);
return msg;
```

Programmet for konstant kraft har samme mulighet til å justere stigetid. Funksjonen er laget i samme stil som til kraftsyklusprogrammet, men her har man bare én grense. Av den grunn vil funksjonen bruke resultatet av trykkverdien multiplisert med 10, og dividere det på ønsket stigetid gitt i sekunder. Koden vises i 4.3. I operatørdashbordet finner man egne inntastingsfelt for konstant kraft- og kraftsyklusprogrammet.

Kodeliste 4.3: Node - Tid til steg per sekund - konstant kraft.

```

context.press = context.press || 50;
context.tid = context.tid || 1;
var diff;

// If-setningene sjekker hvilken node som sender melding
if (msg.topic==='press') {
    context.press=msg.payload;
}

else if(msg.topic==='tid'){
    context.tid = msg.payload;
}

msg.payload = context.press/(context.tid*60);
return msg;

```

En svakhet ved Analog Ramp-blokken er at det kun er mulig å stille inn hvor mange steg den skal stige per sekund. Blokken vil stige ved denne hastigheten fra null til L1 og fra L1 til L2. Dette er problematisk hvis differansen mellom L1 og L2 er mindre enn verdien av L1. Da vil ikke Analog Ramp-blokken nå verdien av L1 før pulsgeneratoren starter. For å løse dette er det lagt inn en funksjonsnode med navn "Forsinkelse for kraftsyklus". Koden sjekker om differansen mellom L1 og L2 er større enn L1. Hvis den er mindre, vil forsinkelsen øke. Hvis differansen er større, blir forsinkelsen det samme som stigetiden.

Kodeliste 4.4: Node - Forsinkelse for kraftsyklus

```

context.up = context.up           || 1; // Øvre grense
context.low = context.low         || 1; // Nedre grense
context.stigetid = context.stigetid || 1; // Stigetid
var diff;
var rate;

// If-setningene sjekker hvilken node som sender melding
if (msg.topic==='upper') {
    context.up=msg.payload;
}

else if(msg.topic==='lower'){
    context.low = msg.payload;
}

else if(msg.topic==='tid'){
    context.stigetid = msg.payload;
}

diff = context.up - context.low; //differanse mellom L1 og L2
rate = diff/(context.stigetid*60); //rate i steg per sekund

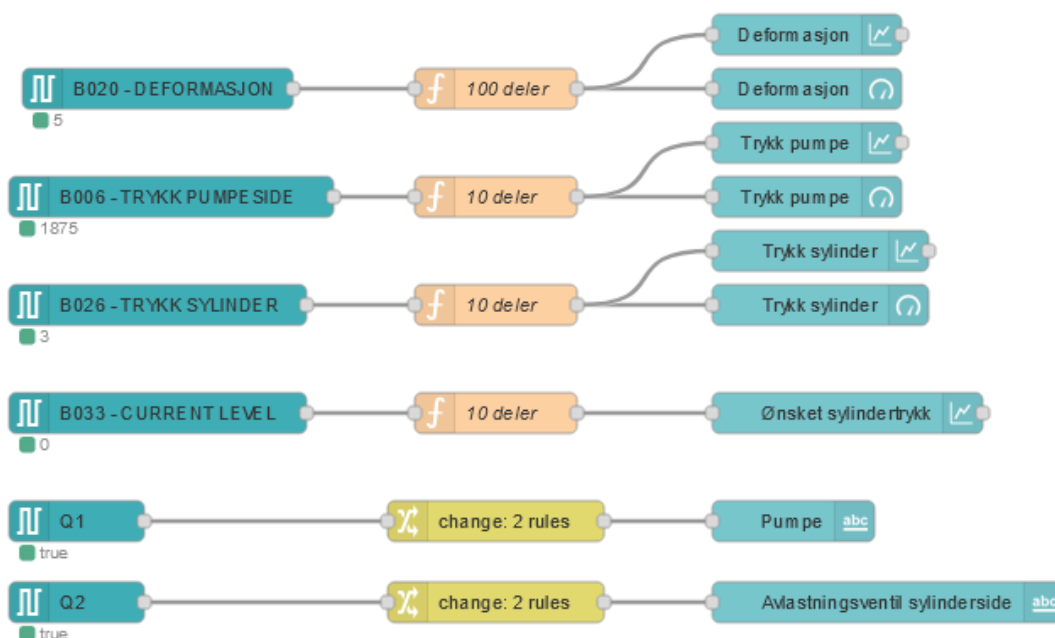
// Fra steps per sekund til minutter. Legger til to sikkerhetsminutter
if(diff<context.low){
    msg.payload=(context.low/(rate*60)) + 2;
}
// Lar payload bli det samme som stigetid om diff>L1
else{
    msg.payload = context.stigetid;
}

// Verdien returneres i minutter
return msg;

```

Datavisualisering

For å vise data som er målt på inngangene til PLS-en i operatørdashbordet, er det brukt inngangsnoder i Node-RED. Inngangssignalene i PLS-en for trykk ved pumpe, trykk ved sylinder og deformasjon, er koblet til Analog Amplifier-blokker i PLS-programmet. Disse er henholdsvis blokk B006, B026 og B020. Hver av blokkene sender verdien de leser skalert i henhold til måleområdet deres til variable minneadresser. De variable minneadressene er videre benyttet i inngangsnodene i Node-RED-flytdiagrammet. For å vise hva verdien til de ulike inngangene er i nåtid, er det brukt såkalte gauge-noder. Nodene lager måleskiver, der de viser dataen som blir skrevet til dem i dashbordet. Fra flytdiagrammet i figur 4.17 kan man se at linjene fra inngangsnodene, er koblet til en matematisk funksjon før de går videre til måleskiven. Dette er fordi dataen som sendes fra PLS-en er gitt i steg i heltall og må konverteres til riktige verdier for trykk og avstand. Verdiene blir også sendt videre til “chart”-noder, der de blir vist som en matematisk graf. Verdien som blir målt vises på y-aksen, og tid vises på x-aksen.



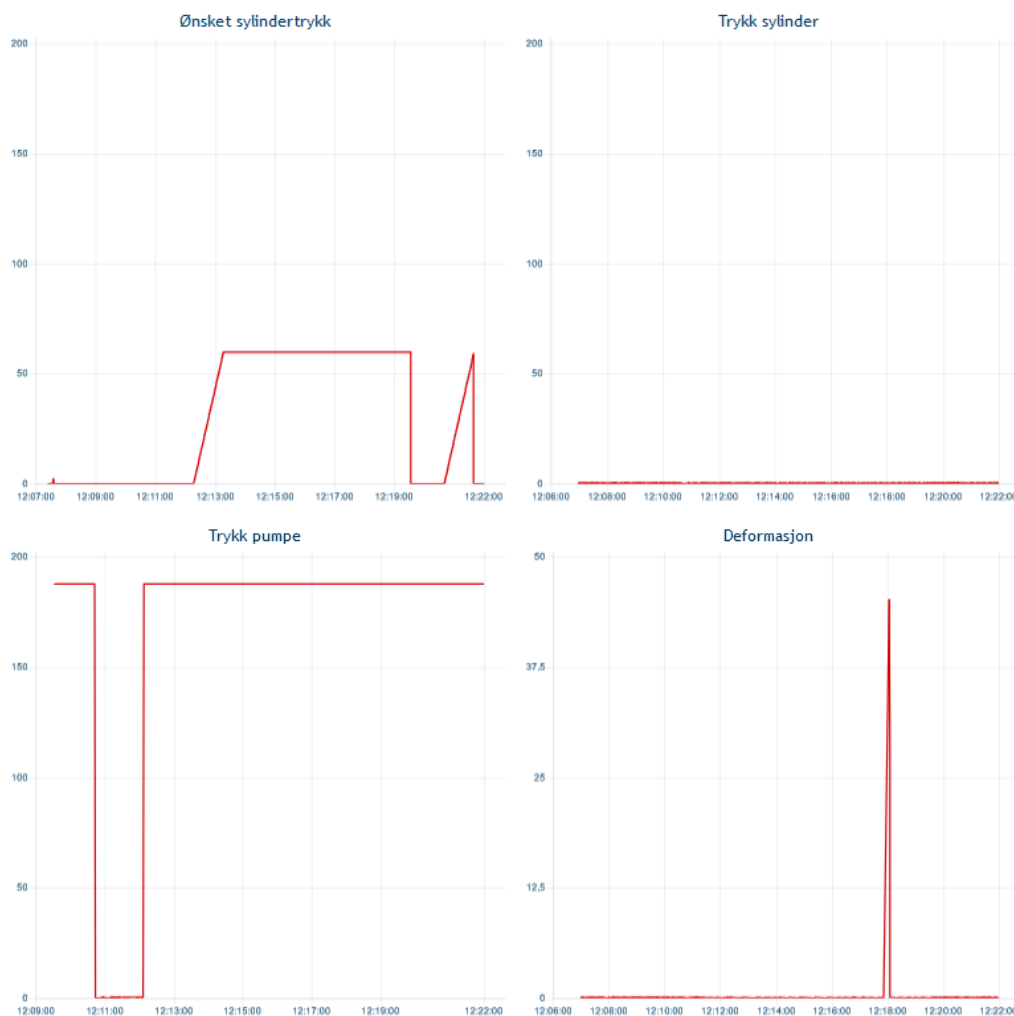
Figur 4.17: Skjermbilde av flytredigereren der utgangsverdier blir sendt til operatørdashbordet.

Digitale utganger trenger ikke å konfigureres som variable minneadresser i PLS-en. De har faste adresser som kan leses ved bruk av inngangsnoder. Nodene sender beskjeden *true* når utgangen er høy, og *false* når den er lav. Inngangsnodene er koblet til såkalte change-noder. Her kan man endre en boolsk variabel til en tekststreng. I dette programmet vil Q1, som er pumpen, vise “På” når den kjører og “Av” når den er av. I flytredigereren mottar altså change-noden *true* eller *false* og videresender “På” eller “Av”. Q2 som styrer avlastningsventilen, vil vise “Drift” når den har spenning og står i lukket stilling. Når den ikke har spenning, vil det stå “Åpen” i dashbordet.

4.5 Verifikasjon av styresystem

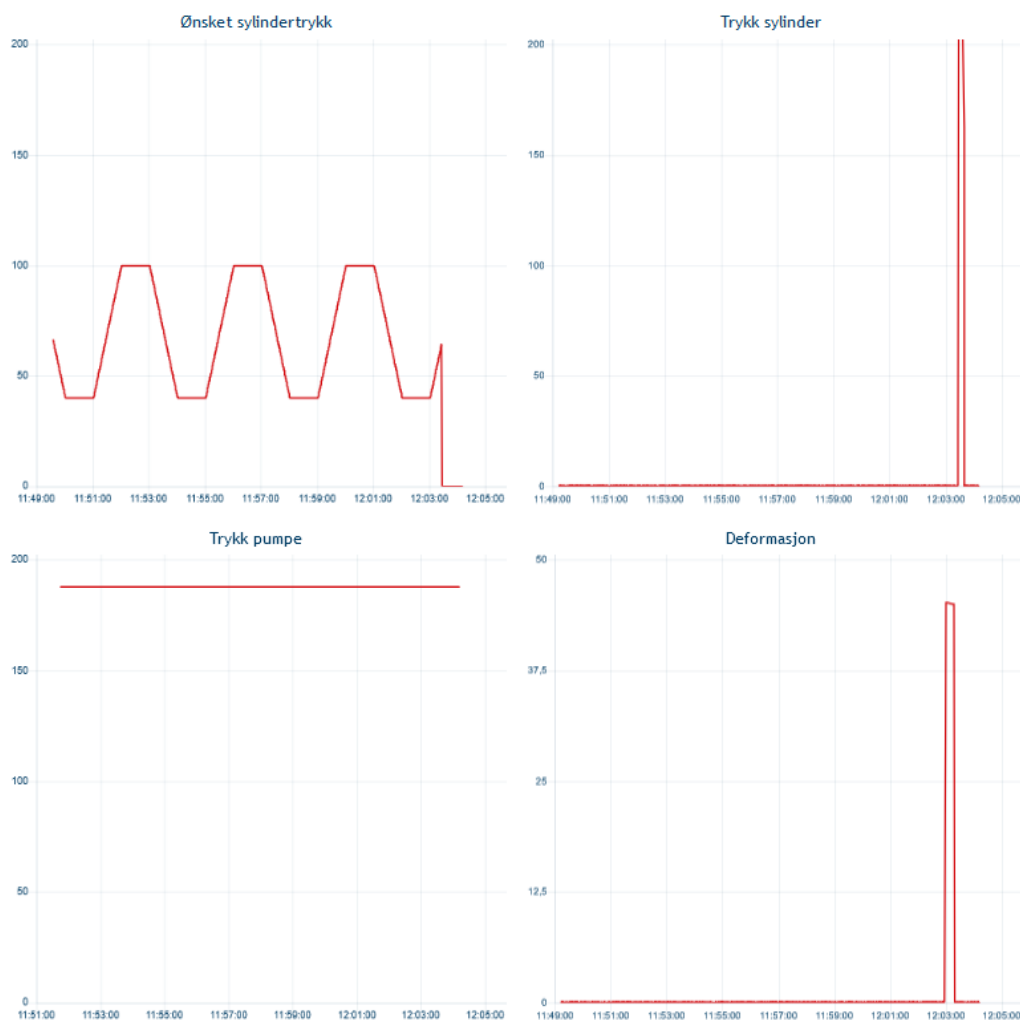
For å sjekke at styresystemet fungerer som det skal, er det laget en simuleringsmodus i PLS-en. For å starte simuleringsmodus må man aktivere en såkalt Soft Key i et skjermvindu i PLS-en. Når denne aktiveres vil programmet ignorere verdien fra trykksensoren på pumpesiden, og i stedet lese verdien 187,5 bar. Dette er gjort fordi forriglinger sørger for at man ikke kan starte en test, med mindre trykket på pumpesiden er over 160 bar. Det kan være aktuelt å fjerne denne funksjonen i programmet som skal brukes av testoppsettet, for å unngå en potensiell feilkilde.

Under simuleringer av testprogrammer har de ulike inngangene til PLS-en blitt koblet til en spenningskilde, for å simulere et inngangssignal. I figur 4.18 er konstant kraft-programmet aktivert. Programmet stiger til ønsket verdi, 60 bar, og holdes konstant helt til det plutselig faller. Fallet skyldes at inngangen til motorvernet ble trigget. Videre er en ny test startet, som stopper like før den når ønsket trykk. Det skyldes at inngangen for nødstoppen ble trigget. Signalhoppet på deformasjonsmålingen skyldes at en spenningskilde ble koblet til denne inngangen.



Figur 4.18: Skjerm bilde av grafer fra operatørdashboard under simulering. Testen stoppes når inngangene til motorvern og nødstop blir trigget.

En lignende test ble gjort for å sjekke at PLS-en stopper programmer ved overtrykk. Figur 4.19 viser en simulasjon av kraftsyklusprogrammet. Sylindetrykket veksler mellom høyt og lavt trykk, på henholdsvis 100 og 40 bar. Stige- og presstiden er begge satt til 1 minutt. Ved å simulere et overtrykk på inngangen som trykksensoren skal tilkobles med en spenningskilde, kan man se at testen stoppes umiddelbart.



Figur 4.19: Skjerm bilde av grafer fra operatørdashbord under simulering. Testen stoppes når trykket målt på sylinderen overstiger 135 bar.

En siste test ble gjort for å teste pumpekretsen. For å teste den, måtte simuleringsmodus være av. En spenningskilde styrt av et potensiometer ble koblet på inngangen til trykksensoren for pumpesiden. Etter pumpekretsen ble startet i operatørdashbordet, ble potensiometeret brukt til å øke spenningen på inngangen. Slik kunne man simulere at trykket økte gradvis. Utgangen til pumpen brøyt strømmen når inngangen kunne måle 200 bar. Pumpen startet igjen når trykket ble under 160 bar.

Kapittel 5

Sammenstilling og bruk av testoppsett

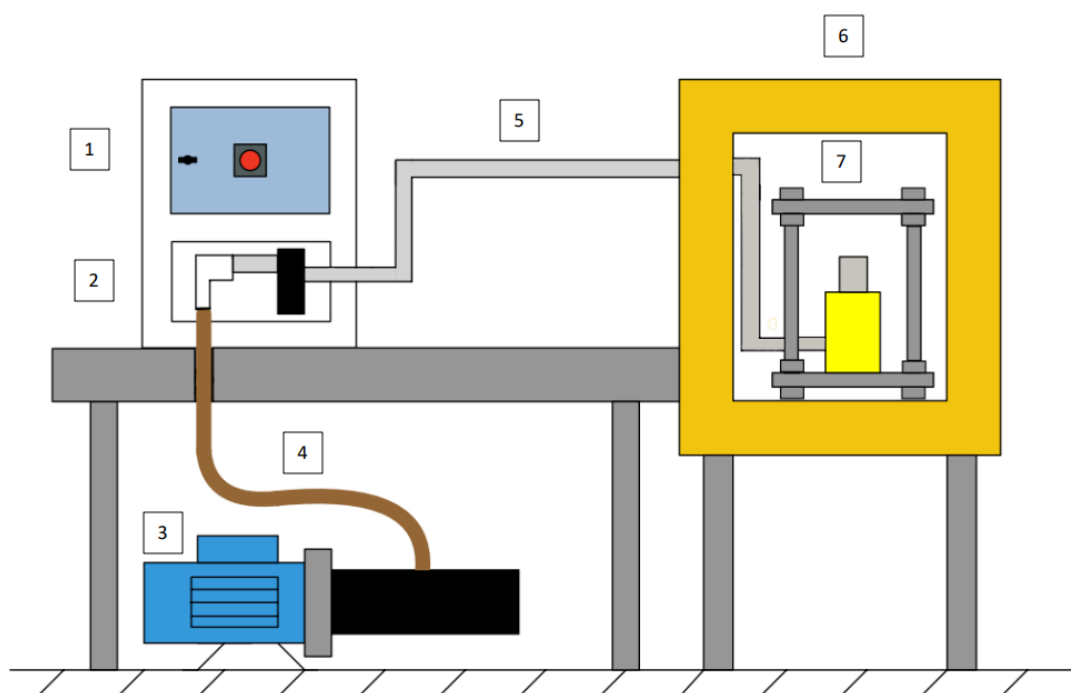
Dette kapitlet presenterer resultatet av prototypeutviklingen og designprosessen, av det hydrauliske testoppsettet beskrevet i kapittel 4. Kapitlet beskriver testoppsettets design, sammenstilling og virkemåte. Det vises til komponentlister for hydraulikk, mekanisk presse og styresystem med priser fra leverandører. Videre presenteres en brukerinstruks for testoppsettet.

5.1 Sammenstilling

Testoppsettet består av tre deler, en mekanisk presse, et hydraulisk system og et elektrisk styresystem. Figur 5.1 viser prinsipielt hvordan delene henger sammen. Sylindere og avstandssensoren monteres i den mekaniske pressen, som plasseres i klimaskapet. Resten av systemet kombineres til en hydraulikkentral, og kobles til sylindere med ett stålrør. I hydraulikkentralen kobles alle komponentene sammen etter hydraulikkskjemaet, gitt i figur 4.1. Styreskapet for styresystemet plasseres også ved hydraulikkentralen. Alle komponenter i styresystemet kobles etter hoved- og styrestrømskjemaet, gitt i 4.7 og 4.8.

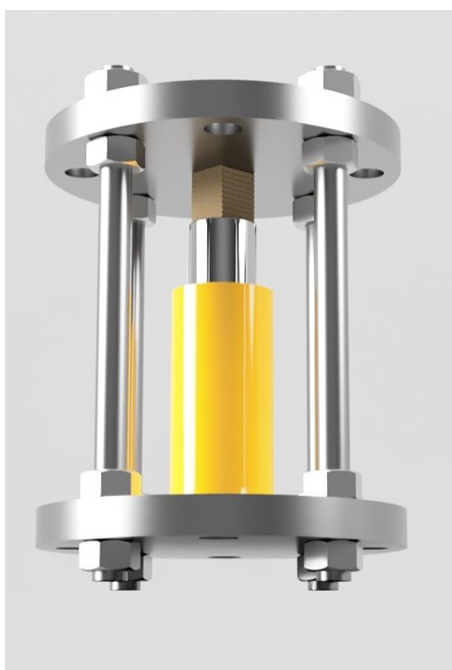
Hele systemet styres fra et operatørdashbord på en lab-PC. I operatørdashbordet er det mulig å velge hvilken test man vil utføre, enten kraftsyklus eller konstant kraft. For hver test velges ønsket stigetid fra 1 til 10 minutter, og trykk fra 0 til 130 bar. Ved kraftsyklus velges også varighet av hvert press, justerbart fra 1 minutt til 24 timer.

Når testoppsettet startes, vil pumpen bygge opp trykk. Ved et pumpetrykk på over 160 bar, er det mulig å starte en test. Etter testparametre er valgt, og testen er startet, vil den proporsjonale trykkreduksjonsventilen slippe igjennom trykk fra pumpe siden til sylindersiden. Hvor mye trykk som slippes igjennom, og med hvilken hastighet, styrer PLS-programmet i henhold til parameterverdiene operatøren har valgt. Trykket vil skyve stempelstanga til sylindere mot topplaten. Videre vil prøveobjektet som plasseres på stempelstanga treffe toppen av pressen. Testobjektet blir dermed utsatt for ønsket kraft. Kraften testobjektet blir utsatt for måles av trykksensoren på sylindersiden, som gir tilbakemelding til styresystemet.



- | | |
|-----------------------|-----------------|
| 1. Styreskap | 5. Hydraulikkør |
| 2. Hydraulikkentral | 6. Klimaskap |
| 3. Hydraulikkaggregat | 7. Presse |
| 4. Hydraulikkslange | |

Figur 5.1: Skisse av testoppsett med et utvalg av komponenter.



Figur 5.2: Modell av pressen.

5.2 Komponentlister og kostnader

Tabell 5.1, 5.2 og 5.3 viser komponentlister og totale innkjøpskostnader for testoppsettet. Prisene for de fleste komponentene i tabell 5.1 er hentet fra tilbudene fra Hydraulikkteknikk AS og ParTech AS, som ligger i vedlegg B.3, B.2 og B.1. Prisene for de andre komponentene er hentet fra RS-online eller andre nettbutikker som selger tilsvarende komponenter. Den totale investeringskostnaden for testoppsettet er beregnet til cirka 80 000 kroner.

Tabell 5.1: Komponentliste med pris for hydraulikksystem.

Komponent	Antall	Stykkpris	Pris (eks. mva)
Proporsjonal trykkreduksjonsventil	1	kr 14,655.00	kr 14,655.00
Monteringsplate for ventil	1	kr 1,114.00	kr 1,114.00
Boltsett	1	kr 204.00	kr 204.00
Digitalt styrekort for trykkred. ventil	1	kr 4,659.00	kr 4,659.00
Trykkbegrensningsventil	1	kr 900.00	kr 900.00
PTC-blokk	2	kr 1,148.00	kr 2,296.00
Seteventil	1	kr 2,753.00	kr 2,753.00
24V DC Supercoil	1	kr 805.00	kr 805.00
Blindplugg	1	kr 208.00	kr 146.00
Sylinder	1	kr 4,716.00	kr 4,716.00
Viton-kit til sylinder	1	kr 1,570.00	kr 1,570.00
Pris for skifte av pakninger og lade akkumulator	2	kr 1,226.00	kr 2,452.00
Akkumulator	1	kr 5,639.00	kr 5,639.00
Hydraulikkaggregat	1	kr 4,494.00	kr 4,494.00
Flenssett	1	kr 528.00	kr 528.00
El-motor for aggregat	1	kr 3,412.00	kr 3,412.00
Tilbakeslagsventil	1	kr 320.00	kr 320.00
Øvrige komponenter, rørdeler, slanger og fittings	1	kr 15,000.00	kr 15,000.00
Totalt			kr 65,663.00

Tabell 5.2: Forslag til elektriske komponenter med el-nummer.

Komponent	El-nummer	Pris (eks. mva)
Kontaktor	4176542	kr 481.00
Motorvern	4176609	kr 817.00
Veggskap (Styreskap)	2493341	kr 1,265.00
DIN-Skinne	1268622	kr 112.00
Jordskinne	1221621	kr 94.00
Nødstopppknapp	4303424	kr 432.00
Strømforsyning 24VDC 5A 1f	6601438	kr 2,313.00
PLS - LOGO!		kr 1,606.00
LOGO! AM2 AQ Expan. module		kr 1,463.00
Kabel, ledning, rekkeklemmer og øvrig materiell		kr 2,500.00
Totalt		kr 11,083.00

Tabell 5.3: Komponentliste med pris for mekanisk presse.

Komponent	Antall	Stykkpris	Pris (eks. mva)
Blindflens DN80 PN40	2	kr 1,288.00	kr 2,576.00
Gjengestang M20 elforsinket	2	kr 254.00	kr 508.00
Mutter og skive M20 elforsinket	16	kr 40.00	kr 640.00
Totalt			kr 3,724.00

5.3 Brukerinstruks

Det er utarbeidet en risikovurdering for montører og operatører av testoppsettet. Risikovurderingen finnes i vedlegg A.2, og dekker grunnleggende faremomenter ved bygging og drift med tilhørende sikkerhetstiltak. Utover denne risikovurderingen skal interne retningslinjer og prosedyrer for helse, miljø og sikkerhet i selskapet følges.

Sjekkliste klargjøring for test

- Sørg for at systemet er spenningsløst.
- Sørg for at systemet er uten trykk.
- Forbered presse i skap.
- Forbered testobjekt i pressen.

Sjekkliste start av test

- Lukk kuleventil.
- Start klimaskap.
- Sett spenning på systemet.
- For å starte en test må operatøren bruke operatørdashbordet. Anbefalt fremgangsmåte er:
 - Start pumpekrets.
 - Velg stigetid, presstid og trykk for ønsket test.
 - Kontroller i PLS-skjermen at ønskede parameter vises.
 - Se at systemet bygger trykk. Når trykket for pumpesiden er over 160 bar kan testen startes.
- Start test. Testparameterne skal ikke endres så lenge testen er aktiv.

Sjekkliste avslutte test

- Stans test i operatørdashbord.
- Skru av klimaskap.
- Trykk inn nødstop/koble fra strømforsyning.
- Slipp trykket fra akkumulator med kuleventil.
- Vent til utstyret er avkjølt før testobjektet håndteres.
- Inspiser utstyret for feil/lekkasjer.
- Utstyret er klart for ny test.

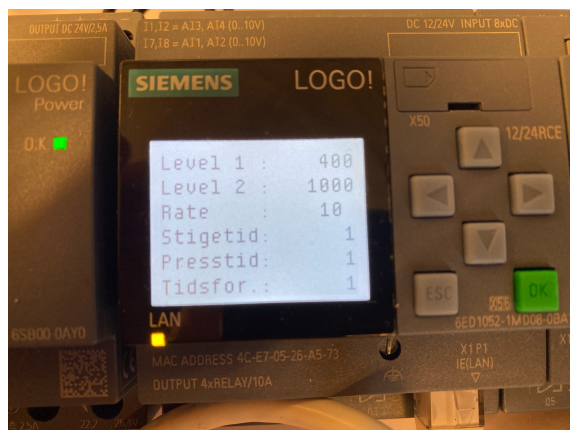
Underveis i testen kan målingene følges med på i operatørdashbordet. Etter gjennomført test kan loggfil hentes ut av PLS-en.

Operatørdashbord og skjermbilder

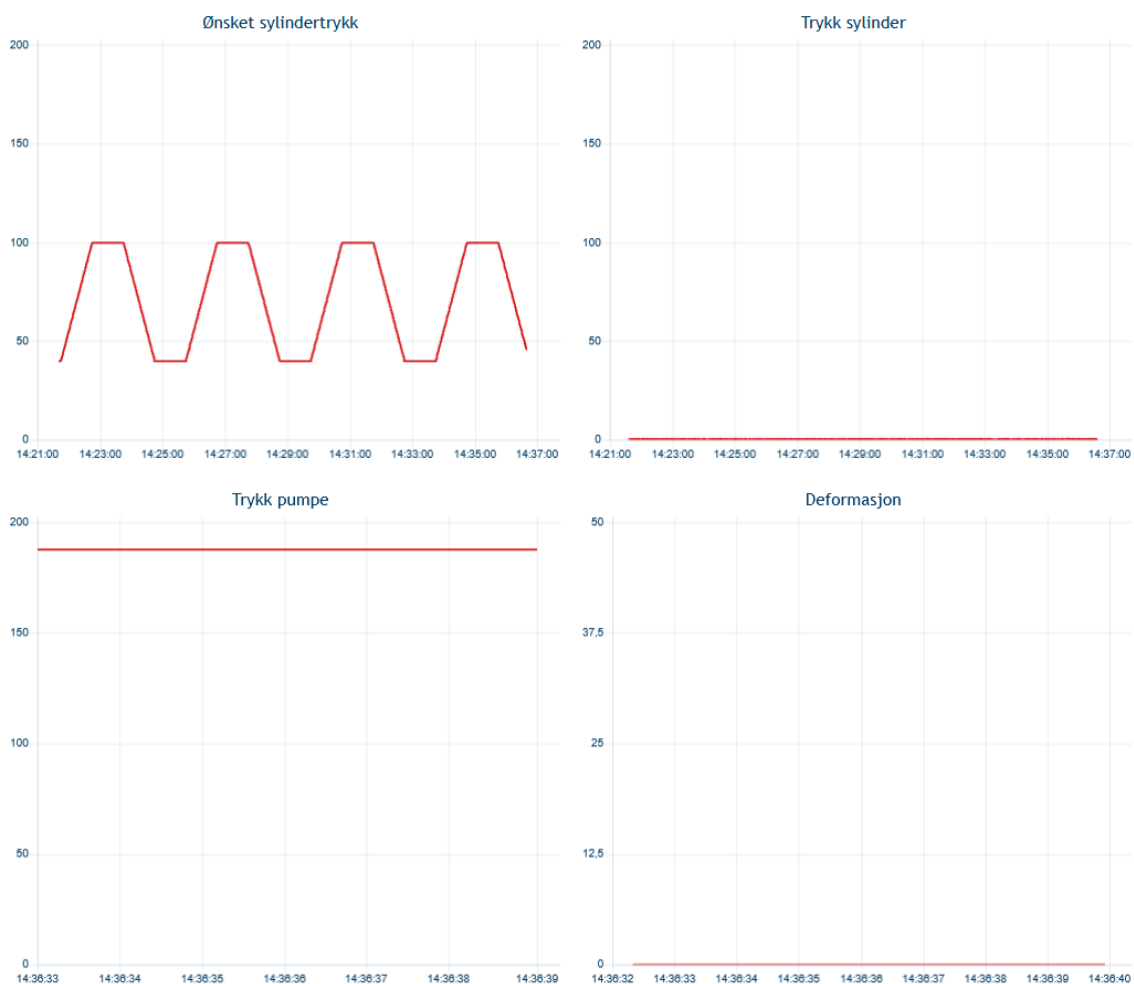
Figur 5.3 viser hvordan operatørdashbordet ser ut etter man har valgt parametre for kraftsyklusprogrammet. Etter man har verifisert at PLS-en har mottatt riktige parametre, slik som i 5.4, kan testen startes. Da kan man bla seg litt lengre ned i operatørdashbordet. Der finner man fire grafer som viser ønsket trykk sylinderen skal presse med, faktisk trykk på sylinderen, faktisk trykk på pumpesiden av systemet og hvilken deformasjon som måles på prøveobjektet. Figur 5.5 viser et skjembilde fra en simulering.



Figur 5.3: Skjermbildet viser hvordan operatørdashbordet ser ut etter pumpekrets er startet og ønskede parametre er fylt ut. I tillegg har trykket på pumpesiden kommet over 160 bar, slik at en test kan starte. I denne situasjonen er trykket simulert.



Figur 5.4: Bildet viser det ene vinduet til PLS-skjermen. Her kan man verifisere at riktige parametre har blitt mottatt fra operatørdashbordet.



Figur 5.5: Skjerm bilde fra operatørdashbord. Grafene viser endringer i sanntid. Bildet er fra en simulasjon av kraftsyklusprogrammet. Av den grunn vises ikke noen målte verdier for trykket på sylinderen eller deformasjon. Trykket til pumpen er fast på 187,5 bar under simuleringen.

Kapittel 6

Diskusjon

I dette kapitlet drøftes utfordringer knyttet til den prosjekterte løsingen. Det gjelder både for hydrauliske, mekaniske og elektriske komponenter, hvor utfordringer spesielt knyttet til utfordrende miljø, nøyaktighet og styresystem er trukket fram. Videre sammenliknes løsninger fra tidligere tester av presspan opp mot det prosjekterte testoppsettet. Avslutningsvis drøftes det hvorvidt prosjektet knyttes opp mot FNs bærekraftsmål, og på hvilken måte prosjektet bidrar til disse.

6.1 Utfordringer med testoppsettet

Det er enkelte utfordringer knyttet til testoppsettet som er prosjektert. De fleste utfordringene er håndtert i designet av systemet, men er likevel viktig å kjenne til. Utfordringene er i hovedsak knyttet til komponentene som blir utsatt for høy temperatur og fuktighet, samt nøyaktig kontroll av kraft. Grunnet de høye temperaturene, høy fuktighet og saltholdig luft vil flere komponenter potensielt få redusert levetid. Det er også enkelte begrensninger i PLS-en som er valgt til å styre systemet.

6.1.1 Temperatur

Høy temperatur påvirker tetningene som brukes i sylindere. Sylindere blir levert med standard tetninger som er godkjent opp til 65°C. For at tetningene skal tåle påkjenningene i varmeskapet, byttes de til FKM-høytemperaturtetninger. Disse tåler opp til 205°C, og har som nevnt i kapittel 3 blitt godkjent av leverandøren for denne applikasjonen. Det er ikke forventet utfordringer med dette når systemet er satt i drift, men det er viktig å poengtere at det er behov for spesielle tetninger. Ved et eventuelt komponentbytte eller utvidelse av oppsettet, må det velges komponenter med høytemperaturtetninger.

Høy temperatur fører også til oppvarming av hydraulikkoljen i delen av systemet plassert inne i skapet. Denne temperaturøkningen kommer i tillegg til temperaturøkning som følger av systemets arbeidstrykk. Oksidasjonshastigheten til olje akselererer ved temperaturer over 70 °C, det krever hyppigere ettersyn av oljekvalitet grunnet redusert levetid. Oljens viskositet øker med stigende trykk og temperatur, men siden arbeidstrykket ikke skal være over 200 bar, er det ikke behov for ytterligere tiltak utover en hydraulikkvæske som tåler temperaturen [72].

Grunnet systemets virkemåte, sirkulerer oljen lite mellom sylindere og resten av systemet.

Oljen som står inne i sylindere holder seg for det meste der. Dette er en fordel da den oksiderte oljen i mindre grad fordeler seg i resten av systemet, hvor den kan øke slitasje på pumpe og ventiler.

6.1.2 Korrosjon

I tillegg til at klimaskapet holder høy temperatur, brukes salt for å justere relativ fuktighet. Saltholdig og fuktig luft med høy temperatur virker akselererende på korrosjonsprosessen. Dette er en utfordring man ikke kommer utenom slik denne testen skal utføres. For å minimere korrosjon på pressen, er det valgt en malt sylinder med forkrommet stempelstang. Det er god balanse mellom pris og kvalitet. En syrefast sylinder hadde vært ideelt, men er forbundet med langt høyere investeringskostnad. Sylindere i løsningen er ikke veldig dyr selv med høytemperaturpakninger. Derfor kan den byttes når den ikke lengre oppfyller krav til funksjon.

Den mekaniske pressen er prosjektert med vanlige ståldeler. Viser det seg at rust blir et betydelig problem, kan alt byttes ut med tilsvarende deler i rustfritt/syrefast stål. Ståldelene er billige, og hvis det viser seg at de er gode nok er det unødvendig å velge dyrere deler.

6.1.3 Presisjon og nøyaktighet

Selve pressen vil til en viss grad deformeres når den utsettes for kraft. For å motvirke dette er delene overdimensjonert, men det kan aldri unngås helt. For å minimere avviket avstandssensoren måler, plasseres den i endeplaten og måler avstanden til stempelet. Måten sensoren plasseres på fører til at bare endring i høyden på prøveobjektet måles, på denne måten påvirker deformasjon i pressen målingen minimalt. For å kontrollere avviket på avstandssensoren, kan en stålbit med samme mål som testobjektet utsettes for full kraft, samtidig som avstandsmålet avleses. Dersom dette gjennomføres i klimaskapet kan også temperaturpåvirkningen på selve sensoren måles.

Temperaturen påvirker ikke nøyaktigheten til kraften prøvene utsettes for, i en betydelig grad. Trykket i sylindere er proporsjonalt med kraften, uavhengig i temperatur og defleksjon, og måles av trykksensoren. Kraften som utøves er derimot avhengig av arealet på sylindere, som kan utvides litt med temperaturen. Utvidelseskoeffisienten til stål er $0,000012(m/m/K)$. Med en stempeldiameter på 42,8 mm og en temperaturøkning fra 20°C til 140°C vil kraften ved 130 bar øke med 55 N, et avvik på 0,29%.

Den proporsjonale trykkreduksjonsventilen, som styrer trykket på sylindere, har garantert repeterbarhet på $< \pm 2\%$ og hysteresis på $< 3\%$. Dette er en av ventilene på markedet med høyest nøyaktighet, og den fungerer også ved lav oljeflyt, hvor repeterbarheten trolig blir bedre og hysteresisen ubetydelig. Selv om ventilen kan ha noe avvik, måles faktisk trykk på systemet av trykksensoren. Dette kan brukes for å stille inn settpunkt i styrekortet til ventilen for kalibrere den.

Det er også noe usikkerhet knyttet til avstandssensoren det er lagt opp til å bruke. Det er kommunisert fra oppdragsgiver at de har en slik liggende de ville bruke, den skal tåle temperaturen. Det er for gruppen uvisst hvilke muligheter det er for kommunikasjon mellom denne og PLS-en, og hvor stor usikkerhet den har.

6.1.4 Styresystem

PLS-en som er valgt for å styre hydraulikkpressen er relativt billig, og med det følger enkelte svakheter. Svakheteene er ikke kritisk for bruk av testoppsettet, men det er viktig for operatører å være klar over begrensningene. PLS-programmet baserer seg på steg, og derfor opererer PLS-en bare med heltall. Måleområdet til trykkverdiene i programmet kan ikke skaleres med mer enn 10. Det er problematisk når stigetiden mellom høyt og lavt trykk må velges i steg per sekund. Når det velges høyt og lavt trykk, skal differansen av disse divideres på stigetiden i sekund. Resultatet er ofte et flyttall. Siden PLS-en ikke håndterer flyttall runder den opp til nærmeste heltall. Hvis man for eksempel ønsker å kjøre sykluser der trykket skal variere mellom 90 og 75 bar, med en stige- og presstid på 1 minutt, får man et avvik. Trykkverdiene skaleres med 10 i programmet. Da er det 150 steg i differanse mellom høyt og lavt trykk. Ved en rate på 2 vil funksjonen bruke 75 sekunder fra lav til høy verdi, og ved en rate på 3 vil den bruke 50 sekunder. Videre vil denne unøyaktigheten forplante seg i presstiden på testobjektet. Bruker programmet 75 sekunder på å stige til høyt press, vil presset bare holdes 45 sekunder før den starter senkingen til lavt press igjen. En PLS med høyere oppløsning kan løse denne utfordringen, men det innebærer en høyere investeringskostnad. Er operatøren kjent med utfordringen, kan tester utformes slik at dette ikke blir et problem.



Figur 6.1: Skjerm bilde fra operatørdashboard. Figuren viser at pressen skal svinge i mellom lavt trykk på 55 bar og høyt på 105 bar. Presstiden skal være 5 minutter og stigetid 10 minutter. Da det er 500 steg imellom grensene i PLS-programmet og 600 sekunder i stigetid, får man et avvik på 100 sekunder. Rate-parameteren kan ikke være lavere enn 1.

Det er ikke sikkert disse avvikene er betydelige. Programmet er designet for å kunne presse testobjektet i mange timer, mens stigetiden er begrenset til maksimalt 10 minutter. Om man presser testobjektet i noen minutter mindre ved et langvarig press, blir det et forholdsvis lite avvik i prosent. Testingen av cellulosematerialene skal gi informasjon om de mekaniske langtidsegenskapene. Man vil få resultater til tross for at det er små avvik i stige- og presstid. I tillegg logges deformasjon og trykk. På denne måten kan man kontrollere hvilken deformasjon som korrelerer med hvilket trykk.

Siemens LOGO! PLS-en er også begrenset ved at logget data ikke kan leses i sanntid. For å hente ut data fra loggfilen må programmet stanses, og SD-kortet tas ut. Dette løses ved at måledataene vises i operatørdashbordet så lenge testen pågår, og etter testen kan alle loggverdiene hentes fra SD-kortet. Det er også mulig å hente ut CSV-data fra Node-RED-systemet hvis nødvendig.

6.1.5 Operatørdashbord

Det er mulig å gjøre brukerfeil i operatørdashbordet. Når man velger presstid, stigetid og ønsket trykk, er det ingen indikasjon i dashbordet på at PLS-en har mottatt dette. Operatørdashbordet leser altså ikke parameterverdier fra PLS-en, det skriver verdier og “glemmer” hva som er sendt. Av den grunn er PLS-en programmert slik at man kan verifisere at den har mottatt ønskede parametre i skjermen. Det ene skjermvinduet viser verdiene for L1, L2, rate, stigetid, presstid og tidsforsinkelse for start av kraftsyklus. Hvis man omstarter Node-RED-systemet, må man sette alle parameterene om igjen før man starter en ny testsekvens. Er en test allerede underveis og man omstarter Node-RED, vil ikke det ha noe å si for PLS-en. Operatøren må bare være klar over at Node-RED ikke vil gi tilbakemelding på hva de innstilte verdiene er hvis Node-RED-systemet blir slått av og på.

PLS-programmet bruker samme Analog-Ramp blokk til å styre den proporsjonale trykkreduksjonsventilen, uavhengig av hvilket driftsprogram som er aktivert. Konsekvensen er at parameterverdiene kan endres flere steder i operatørdashbordet. Hvis man har valgt nedre og øvre grense for trykk i dashbordet, og deretter skriver en verdi i tekstboksen som det står “konstant kraft”, vil det være siste verdi som er gjeldene. Da endrer L1 og L2 seg til denne verdien, selv om man ikke har startet konstant kraft programmet. Det er heller ikke noe som stopper operatøren for å endre disse parameterne samtidig som en test pågår. Likevel vil dette ikke være et problem så fremt operatøren følger brukerinstruksen gitt i kapittel 5.

6.2 Mulige forbedringer

Det er mulig å gjøre den prosjekterte løsningen mer nøyaktig og robust dersom det skulle bli nødvendig. Enkelte komponenter kan byttes til komponenter med høyere nøyaktighet eller kvalitet. Dette vil føre til at systemet blir vesentlig dyrere. Valg av komponenter er gjort med hensyn på mest mulig nøyaktighet og robusthet til en overkommelig pris.

I PLS-en er det lagt opp til logging av deformasjon, trykk og temperatur. Dersom det er ønskelig å logge disse dataene med høyere frekvens eller nøyaktighet kan det gjøres med en ekstern datalogger. Det kan monteres trykksensorer og avstandssensorer med høyere oppløsning i parallell med eksisterende sensorer. I dette tilfellet vil PLS-en styre hele testen, men logging av prosess og resultater foregår eksternt.

Videre kan det legges til en funksjon i PLS-en for å overvåke pumpens driftstid. Hvis den er uvanlig lang, er det mest sannsynlig et resultat av en lekkasje. Det kan lages et program som kan stoppe pumpen, og igjen åpne trykkavlastningsventilen automatisk hvis pumpen går for lenge. I utgangspunktet var det tenkt å utvikle dette, men på grunn av systemet ikke ble bygget er normal driftstid på pumpen ukjent. Dersom det implementeres flere parallelle tester må det tas hensyn til lengre driftstid på pumpen.

Det er også mulig å legge til en varslingsfunksjon i PLS-programmet. Ved å koble en GSM-modul til PLS-en, kan man sende en melding til den ansvarlige for testen for å varsle om eventuelle feil. Dette var ikke en del av bestillingen, men det kan være greit å vite om muligheten.

6.3 Alternativer

Det hydrauliske systemet kunne i stor grad vært utformet likt, men med enkelte andre komponenter. For eksempel kunne en dobbeltvirkende sylinter brukes. Fordelen med dette er at man kan kjøre stempelet tilbake etter en kraftperiode. Med en enkeltvirkende sylinter er den avhengig av at prøven presser stempelet tilbake, i tillegg må operatøren manuelt dytte stempelet tilbake for å få ut prøven. Ulempen med en dobbeltvirkende sylinter er at det vil kreve andre eller flere ventiler, og komplisere løsningen. Derfor ble det besluttet at det var unødvendig. Det er også flere andre ventiler som kunne vært brukt for å kontrollere trykket i sylindren. For eksempel proporsjonal retnings- eller trykkbegrensningsventil. Den proporsjonale trykkreduksjonsventilen ble vurdert som best egnet da den ikke har utfordringene til retningsventilen med hysteres, og ikke krever kontinuerlig pumpedrift som trykkbegrensningsventilen gjør.

Et pneumatisk system ville også vært et alternativ. Hovedfordelen med dette er at deler til et pneumatisk system er billigere enn tilsvarende for hydraulikk. En slik løsning unngår også faren med olje i høy temperatur. Hovedproblemet med pneumatikk har vært å finne sylindere med stor nok flate til å utøve kraften, og samtidig er kort nok til å passe i varmeskapet. En pneumatisk sylinter kunne også løst varmeutfordringen på samme måte som den hydrauliske sylindren ved å bytte til FKM tetninger. Dersom utviklingsprosessen skal gjennomføres på nytt kan det være hensiktsmessig å bruke mer tid på å vurdere pneumatiske alternativer.

6.4 Diskusjon av andre løsninger

I dette underkapittelet skal testene beskrevet i kapittel 2.3 sammenlignes med denne oppgavens prosjekterte testoppsett. Den tiltenkte testen ved bruk av det designede testoppsettet har lignende formål som testene utført av Weidmann, Madshaven og Oria et. al. Alle ønsker å teste materialegenskapene til presspan, men testene er likevel svært forskjellige.

Testen gjort ved universitetet i Cantabria [43] er den mest omfattende testen av de tre det blir sett på her. Her har man mulighet til å teste deformasjonen av flere prøver med ulik aldring og dermed kunne si noe om hvilke egenskaper isolasjonsmatterialene har underveis i livsløpet til en transformator. På grunn av den omfattende tørkingen og impregneringen, sier ikke testen noe om hvordan fuktigheten til prøvene påvirker resultatene. Det er også uvisst hvilken frekvens og varighet på trykk man kan utsette prøven for med dette testoppsettet.

I testen gjennomført av Inge Madshaven [44] i SINTEF Energi blir det testet prøver med ulik fuktighet, for se på hvordan dette påvirker deformasjonen. Dette testoppsettet kan ikke settes inn i klimaskap, siden den elektromekaniske sylindren ikke tåler den høye temperaturen. Denne testen kan også gjennomføres med prøven i et oljebad, da er det mulig og regulere temperaturen til prøven med en varme/kjølekolbe i oljen. Testen er rask og lite komplisert å gjennomføre samt at den gir gode måleresultater. Maskinen som er brukt er fra Bosch Rexroth, og mulighet til å teste prøven i høy frekvens, rundt 100 Hz i korte perioder. Dette kan simulere vibrasjon i transformatoren. En ulempe med denne testen er at Bosch Rexroth maskinen ikke har mulighet til å jobbe over lang tid sammenhengende.

Testen gjennomført av Weidmann undersøker i hovedsak hvordan forspenningstrykk avhenger av fukt og temperatur [37]. Testoppsettet deres kan brukes for langtidstesting av pressspan, men det vil bli svært tidkrevende. Ved å gjøre temperatursykluser i et klimaskap, får man ikke muligheten til å gjøre hyppige trykkvariasjoner. En temperatursyklus vil ta flere timer. Det vil si at man ikke klarer å gjennomføre akselererte tester ved dette oppsettet.

Bachelorgruppens prosjekterte løsning utfører i utgangspunktet ikke tester på allerede aldret pressspan, slik som testen gjort av universitetet Cantabria. Prøvene aldres derimot underveis i testen ved at hele testen gjennomføres i et klimaskap. På denne måten er det også mulig å se hvordan egenskapene og deformasjonen endres underveis i aldringsprosessen, uten å ha mange prøver med forskjellig aldringsgrad. Den prosjekterte løsningen gir også valgfrihet til operatøren om man ønsker å teste pressspan i olje eller tørkede prøver. Siden prøveobjektet er inne i et klimaskap kan man også justere fuktigheten til prøvene med vann og salt samtidig som temperatur. Denne testen gir altså mulighet til å teste isolasjonsmaterialet under flere samtidige påkjenninger. Testoppsettet har derimot ikke mulighet til å simulere vibrasjoner slik som SINTEFs løsning har. Ventilen som er valgt gjør det mulig å kjøre med en frekvens på rundt 1 Hz, men siden dette ikke var en del av spesifikasjonene er det ikke laget et program for dette. Denne løsningen har også mulighet for å kunne utsette prøven for både høyt trykk og høy temperatur sammenhengende over lang tid. Det at systemet er styrt fra en PLS gjør det også svært driftsikkert.

6.5 FNs bærekraftsmål



Figur 6.2: FNs bærekraftsmål [92].

Formålet med denne bacheloroppgaven er å kunne teste cellulosebaserte isolasjonsmaterialer i transformatorer. Flere av bærekraftsmålene henger tett sammen med hverandre, men de mest relevante bærekraftsmålene for dette prosjektet er:

- Mål 7. Ren energi til alle.
 - Delmål 7.2: Innen 2030 øke andelen fornybar energi i verdens samlede energiforbruk betydelig [93].
 - Delmål 7.a: Innen 2030 styrke det internasjonale samarbeidet for å lette tilgangen til forskning og teknologi på området ren energi, inkludert fornybar energi, energieffektivisering og avansert og renere teknologi for fossilt brensel, og fremme investeringer i energiinfrastruktur og teknologi for ren energi [93].
- Mål 9. Industri, innovasjon og infrastruktur.
 - Delmål 9.4: Innen 2030 oppgradere infrastruktur og omstille næringslivet til å bli mer bærekraftig, med mer effektiv bruk av ressurser og mer utstrakt bruk av rene og miljøvennlige teknologiformer og industriprosesser, der alle land gjør en innsats etter egen evne og kapasitet [94].
- Mål 12. Ansvarlig forbruk og produksjon.
 - 12.2: Innen 2030 oppnå bærekraftig forvaltning og effektiv bruk av naturressurser [95].

Ett konkret valg som er gjort med hensyn til bærekraft i prototypeutviklingen er å utvikle en relativt energieffektiv løsning. Hydrauliske anlegg har en langt høyere virkningsgrad enn pneumatiske anlegg. Videre er det valgt en relativt liten, men tilstrekkelig kraftig motor til å drifte anlegget. I samhandling med systemets akkumulator medfører det lavere driftstid på pumpen og dermed lavere energiforbruk. Et alternativ som ble vurdert var å ha et hydraulisk anlegg uten akkumulator, med konstant pumpedrift. Det ville medført et høyt effekttap i form

av varmeutvikling i anleggets tiltenkte proporsjonale trykkbegrensningsventil.

En sikker og stabil strømforsyning er en sentral del av et moderne samfunns kritiske infrastruktur. Transformatorene spiller en svært viktig rolle i dagens energisystem. Med videre elektrifisering av verdenssamfunnet med høy andel fornybar energi kan prosjektet bidra til delmål 7.2. Oppgaven er en bestilling av forskningsprosjektet DynaLoad, et prosjekt der det samarbeides på tvers av landegrensene, dermed er også delmål 7.a sentralt for denne oppgaven.

Hvorvidt resultatet av oppgaven har en positiv effekt på bærekraftsmålene, er avhengig om SINTEF Energi velger å bygge testoppsettet. Bachelorgruppen har presentert testoppsettet for DynaLoad-prosjektet i håp om å få til et fortsettelsesprosjekt, slik at det kan realiseres. Testoppsettet vil hjelpe prosjektet å forstå cellulosebaserte isolasjonsmaterialer sine langtidsegenskaper. Ved å forstå materialets egenskaper bedre kan det bidra til økt levetid på transformatorer. Det vil blant annet bidra til reduksjon i vannforbruk, tømmerhogst og utvinning av metaller. Sammenlagt vil dette bidra i en bærekraftig retning både med tanke på utnyttelse av naturressurser, råvarer og økonomisk effektivitet. Dermed er delmål 9.4 og 12.1 òg relevante for oppgaven.

Kapittel 7

Konklusjon

Cellulosebaserte isolasjonsmaterialer er en viktig del av viklings- og forspenningssystemet til krafttransformatorer. Plastisk deformasjon av isolasjonsmaterialene vil svekke kortslutnings-sikkerheten til krafttransformatorer, og øker sjansen for havari. Det finnes i dag ingen standardiserte testmetoder for å undersøke mekaniske langtidsutfordringer til cellulosebaserte isolasjonsmaterialer. Målet for denne oppgaven har vært å designe et testoppsett som kan gjennomføre akselerert aldringstesting av disse materialene.

Underveis i utviklingsprosessen har det vært høyt fokus på at testoppsettet skal kunne opereres på en sikkerhetsmessig forsvarlig måte. Utfordringene når det gjelder komponentvalg har i hovedsak vært knyttet til temperaturkravet på 140°C, og valg av ventil for å kontrollere kraften på prøveobjektet. Temperaturkravet er løst med å velge en overdimensjonert sylinder, oppgradert med FKM-tetninger. Dermed opereres sylindere langt under maksimal trykkbegrensning, og med tetninger som tåler opptil 205°C. Ved valg av ventil har utfordringene vært knyttet til hysteresis og høy nøyaktighet ved lav oljeflyt. Dette er løst ved å bruke en Parker VMY proporsjonal trykkreduksjonsventil, som kan styre sylindetrykket nøyaktig også uten oljeflyt.

Følgende konklusjoner trekkes om løsningen:

- Testoppsettet kan plasseres i et klimaskap og tåler temperaturer opptil 140°C.
- Testoppsettet oppfylder krav til stigetid, fra null til maksimalt trykk på under 1 minutt.
- Testoppsettet er designet for å utsette et testobjekt for en kraft på over 15 kN.
- Testoppsettet er designet for å utføre sykluser der et prøveobjekt utsettes for vekselvis høyt og lavt press, der presstiden kan velges mellom 1 minutt og 24 timer.
- Testoppsettet er designet for å kunne holde konstant kraft på et prøveobjekt i ubegrenset tid.
- Testoppsettet kan logge deformasjon av prøveobjekter og trykk.
- Testoppsettet styres av en PLS sammen med et operatørdashbord.
- Testoppsettets PLS-program fungerer ved funksjonstester med simulert tilbakemelding.

Den tekniske løsningen som er levert oppfylder kravene i bestilling fra oppdragsgiver, og det er stor grunn til å anta at det prosjekterte testoppsettet vil fungere tilfredsstillende ved realisering. På denne måten vil prosjektet kunne bidra til akselerert testing av cellulosebaserte isolasjonsmaterialer. Det er også gode muligheter for å skalere opp testoppsettet med parallelle tester, til relativt lave ekstra kostnader per enhet, dersom det er ønskelig i framtiden.

Bibliografi

- [1] I. Madshaven, «Clamping survey,» SINTEF Energi, 2023.
- [2] SINTEF Energi. «DynaLoad - Dynamic loading of transformer insulation.» (2022), adresse: <https://www.sintef.no/prosjekter/2021/dynaload-dynamic-loading-of-transformer-insulation/> (sjekket 25.01.2024).
- [3] L. Lundgaard, *Håndbok i vedlikehold av krafttransformatorer - 2a Viklinger*, 0. utg. Brukergruppen for kraft- og industritransformatorer, 2011, s. 17.
- [4] T. Prevost og T. Oommen, «Cellulose insulation in oil-filled power transformers: Part I - history and development,» *IEEE Electrical Insulation Magazine*, årg. 22, nr. 1, s. 28–35, 2006. DOI: 10.1109/MEI.2006.1618969.
- [5] L. Naranpanawe, C. Ekanayake og T. K. Saha, «Measurements on pressboard to understand the effect of solid insulation condition on monitoring of power transformer winding clamping pressure,» *IET Science, Measurement & Technology*, årg. 13, nr. 2, s. 186–192, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5096>. eprint: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1049/iet-smt.2018.5096>. adresse: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/iet-smt.2018.5096>.
- [6] FN-sambandet. «FNs bærekraftsmål.» (1. feb. 2024), adresse: <https://fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal> (sjekket 07.05.2024).
- [7] E. Site. «Transformer Main Parts.» (2016), adresse: <https://electrical-site.blogspot.com/2016/05/transformer-main-parts.html> (sjekket 26.04.2024).
- [8] H. Enoksen. «Hvordan påvirker nytt strømforbruk transformatorer?» (16. jun. 2023), adresse: <https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/elkraftkomponenter/hvordan-pavirker-nytt-stromforbruk-transformatorer/> (sjekket 22.04.2024).
- [9] M. J. Heathcote, *J & P Transformer Book*, 13. utg. Elsevier Science & Technology, 2007, s. 14.
- [10] L. Lundgaard, *Håndbok i vedlikehold av krafttransformatorer - 2a Viklinger*, 0. utg. Brukergruppen for kraft- og industritransformatorer, 2011, s. 5.
- [11] D. P. Kothari og I. J. Nagrath, *Electric machines*, 5. utg. McGraw Hill Education (India) Private Limited, 2018, s. 83.
- [12] Jakob Sandstad. «Hysterese.» (2021), adresse: <https://snl.no/hysterese> (sjekket 04.04.2024).
- [13] D. P. Kothari og I. J. Nagrath, *Electric machines*, 5. utg. McGraw Hill Education (India) Private Limited, 2018, s. 39.

- [14] T. L. Toftevaag, *Transformers - part 2 (spring 2023)*, Forelesningspresentasjon i [TET4110 Elektriske maskiner og elektromagnetisk energiomforming], Tilgjengelig på [Blackboard], Besøkt dato: 05.04.2024, 2023.
- [15] M. J. Heathcote, *J & P Transformer Book*, 13. utg. Elsevier Science & Technology, 2007, s. 126.
- [16] ABB, *Transformer Handbook*, 2. utg. ABB Business Unit Transformers, 2004, s. 80.
- [17] L. Lundgaard, *Håndbok i vedlikehold av krafttransformatorer - 2a Viklinger*, 0. utg. Brukergruppen for kraft- og industritransformatorer, 2011, s. 8–11.
- [18] L. Lu, S. Ichimura og T. Rokunohe, «Partial discharge observation of a complex insulation structure model and residual space charge characteristics investigation under repeated lightning impulses,» *IET Science, Measurement & Technology*, årg. 15, mar. 2021. DOI: 10.1049/smt2.12054.
- [19] ABB, *Transformer Handbook*, 2. utg. ABB Business Unit Transformers, 2004, s. 82.
- [20] D. M. Mehta, P. Kundu og A. Chowdhury, «Development of energy efficient, cost-optimized transformer with low partial discharges,» *Modelling, Measurement and Control A*, 2018. adresse: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55353221>.
- [21] M. Anker, «Isolasjonsmaterialer og isolasjonssystemer,» 1984.
- [22] Weidmann, *Transformerboard III*. 2022, s. 225.
- [23] M. J. Heathcote, *J & P Transformer Book*, 13. utg. Elsevier Science & Technology, 2007, s. 158.
- [24] L. Lundgaard, *Håndbok i vedlikehold av krafttransformatorer - 2a Viklinger*, 0. utg. Brukergruppen for kraft- og industritransformatorer, 2011, s. 20–24.
- [25] L. Sivertsen, *Høyspenningssystemer*. Fagbokforlaget, 2020, s. 44–48.
- [26] NEK IEC 60076-5:2006, *Power transformers - Part 5: Ability to withstand short circuit*. NEK/NK14, 2006, s. 13.
- [27] ABB, *Transformer Handbook*, 2. utg. ABB Business Unit Transformers, 2004, s. 89.
- [28] M. J. Heathcote, *J & P Transformer Book*, 13. utg. Elsevier Science & Technology, 2007, s. 232–240.
- [29] S. Mitchell og J. Welsh, «Methodology to locate and quantify radial winding deformation in power transformers,» *High Voltage*, årg. 2, feb. 2017. DOI: 10.1049/hve.2016.0085.
- [30] D. H. Geißler, *Short-Circuit Withstand Capability of Power Transformers*, 1. utg. Cuvillier Verlag, 2016, s. 19.
- [31] M. J. Heathcote, *J & P Transformer Book*, 13. utg. Elsevier Science & Technology, 2007, s. 159.
- [32] *Tekniske data for transformatoroljer*, Møre trafo, 1. sep. 2014. adresse: <https://moretrafo.no/download/?id=1321>.
- [33] B. T. Furnes, «Sviktmmodell for krafttransformatorer,» Hovedveileder var Eivind Solvang, oppgaven var skrevet for SINTEF Energi, Masteroppgave, Norges tekniske og naturvitenskapelige universitet, Trondheim, 2016.
- [34] L. Lundgaard, *Håndbok i vedlikehold av krafttransformatorer - 2a Viklinger*, 0. utg. Brukergruppen for kraft- og industritransformatorer, 2011, s. 7.
- [35] Weidmann, *Transformerboard III*. 2022, s. 67–69.

- [36] Weidmann, *Transformerboard III*. 2022, s. 21.
- [37] Weidmann, *Transformerboard III*. 2022, s. 225–234.
- [38] L. Solanki, *Transformer Short Circuit Design*, (sjekket 17.04.2024), Virginia - Georgia Transformer, 2020. adresse: <https://www.vatransformer.com/wp-content/uploads/2022/11/transformer-short-circuit-design-6-12-20.pdf>.
- [39] *NEK IEC 60641-2:2004*. Norsk Elektroteknisk Komité, 2004, s. 23.
- [40] L. Naranpanawe, C. Ekanayake, T. K. Saha og P. K. Annamalai, «Influence of moisture dependency of pressboard on transformer winding clamping pressure,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, årg. 24, nr. 5, s. 3191–3200, 2017. DOI: 10.1109/TDEI.2017.006206.
- [41] Weidmann, *Transformerboard III*. 2022, s. 206.
- [42] Weidmann, *Transformerboard III*. 2022, s. 207.
- [43] C. Oria, C. Méndez, I. Carrascal mfl., «Degradation of the compression strength of spacers made of high-density pressboard used in power transformers under the influence of thermal ageing,» *Cellulose*, årg. 30, s. 6539–6558, 2023. DOI: 10.1007/s10570-023-05268-8.
- [44] I. Madshaven, «Commissioning of EMC,» 2023.
- [45] Industriskolen. «Hydraulikkanleggets oppbygning.» (2019), adresse: <https://ndla.no/subject:1:5a5cac3f-46ff-4f4d-ba95-b256a706ec48/topic:a09a0615-a2b5-4729-8c5c-9aae5c66fbcf/resource:1:58065> (sjekket 04.04.2024).
- [46] Enerpac. «Pascal's Law and Hydraulic Tools.» (2022), adresse: <https://blog.enerpac.com/pascals-law-and-hydraulic-tools/> (sjekket 22.04.2024).
- [47] *Hydraulikk*, 1. utg. NKI Forlaget, 2000, s. 5–11, ISBN: 8256233680.
- [48] *Hydraulikk*, 1. utg. NKI Forlaget, 2000, s. 48–62, ISBN: 8256233680.
- [49] M. S. engineers ltd. «Useful information on External Gear Pumps.» (2024), adresse: <https://www.michael-smith-engineers.co.uk/resources/useful-info/external-gear-pumps> (sjekket 14.03.2024).
- [50] M. Winstone, *Essential Hydraulics*, 2. utg. Createspace independent publishing platform, 2014, s. 31–33.
- [51] Michael Smith Engineers. «Gear Pump Designs.» (u.d.), adresse: <https://www.michael-smith-engineers.co.uk/resources/useful-info/gear-pumps> (sjekket 12.04.2024).
- [52] North Ridge Pumps, *Vane Pump Animation*, https://www.youtube.com/watch?v=9km7lh80_To, (sjekket 12.04.2024).
- [53] M. Koester og A. Fidlin, «Variable displacement vane pump, part II: nonlinear volume flow control,» *Nonlinear Dynamics*, okt. 2017. DOI: 10.1007/s11071-017-3717-5.
- [54] Y. Fang, J. Zhang, X. Bing, C.-s. Huang, F. Lyv og Z. Guo, «A Study On Increasing The Speed Limit of Axial Piston Pumps By Optimizing The Suction Duct,» apr. 2021. DOI: 10.21203/rs.3.rs-397287/v1.
- [55] Ahmad Al-Mahasneh. «Pneumatics and hydraulics Hydraulic valves.» (), adresse: https://www.philadelphia.edu.jo/academics/amahasneh/uploads/lecture_24_hydr_valves_1.pdf (sjekket 11.04.2024).

- [56] Ed Edwards. «All About Hydraulic Valves.» (2020), adresse: <https://www.thomasnet.com/articles/pumps-valves-accessories/about-hydraulic-valves/> (sjekket 11.04.2024).
- [57] *Hydraulikk*, 1. utg. NKI Forlaget, 2000, s. 75–118, ISBN: 8256233680.
- [58] M. Gannon. «Understanding Proportional Valve Designs and Uses.» (7. mai 2022), adresse: <https://www.fluidpowerworld.com/understanding-proportional-valve-designs-and-uses/> (sjekket 15.04.2024).
- [59] *Prop. Pressure Reducing/Relieving Valves Series VMY*K*, Parker, 1. apr. 2019. adresse: https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Hydraulic-Valve-Division/hydraulicvalve/Catalog-sections-for-websphere/Proportional-Pressure-Control/VMY_K.pdf.
- [60] *Hydraulikk*, 1. utg. NKI Forlaget, 2000, s. 69–73, ISBN: 8256233680.
- [61] T. Huttunen. «What Is a Hydraulic Cylinder?» Hydroline. (u.d.), adresse: <https://hydroline.fi/blogs/what-is-a-hydraulic-cylinder/> (sjekket 15.04.2024).
- [62] Store norske leksikon. «Nitrilgummi.» (28. aug. 2021), adresse: <https://snl.no/nitrilgummi> (sjekket 15.04.2024).
- [63] Eastern Seals UK Ltd. «Viton (FKM) vs. Nitrile.» (27. okt. 2016), adresse: <https://www.easternseals.co.uk/2016/10/27/viton-fkm-vs-nitrile/> (sjekket 15.04.2024).
- [64] Store Norske Leksikon. «polyvinylidenfluorid.» (24. jan. 2023), adresse: <https://snl.no/polyvinylidenfluorid> (sjekket 16.04.2024).
- [65] *Hydraulikk*, 1. utg. NKI Forlaget, 2000, s. 119–124, ISBN: 8256233680.
- [66] B. Automasjon, *Hydraulikk i teori og praksis*, overs. av J. Nestum. Yrkesopplæring ans, Oslo, 1999, s. 126–133.
- [67] M. Winstone, *Essential Hydraulics*, 2. utg. Createspace independent publishing platform, 2014, s. 141–145.
- [68] «How does a hydraulic accumulator work.» Time stamp: 01:05. (2019), adresse: <https://www.youtube.com/watch?v=uMFVUukXfQA> (sjekket 15.05.2023).
- [69] M. Winstone, *Essential Hydraulics*, 2. utg. Createspace independent publishing platform, 2014, s. 156–161.
- [70] *Hydraulikk*, 1. utg. NKI Forlaget, 2000, s. 37–41, ISBN: 8256233680.
- [71] Omega. «How Does a Pressure Transducer Work?» (u.d.), adresse: <https://www.omega.com/en-us/resources/pressure-transducers-how-it-works> (sjekket 15.04.2024).
- [72] B. Automasjon, *Hydraulikk i teori og praksis*, overs. av J. Nestum. Yrkesopplæring ans, Oslo, 1999, s. 142–151.
- [73] *Hydraulikk*, 1. utg. NKI Forlaget, 2000, s. 11–15, ISBN: 8256233680.
- [74] B. Automasjon, *Hydraulikk i teori og praksis*, overs. av J. Nestum. Yrkesopplæring ans, Oslo, 1999, s. 8.
- [75] Rosvold, Knut A. «Aktuator.» (27. mar. 2022), adresse: <https://snl.no/aktuator> (sjekket 17.04.2024).
- [76] Industriskolen. «Hydraulikkskolen VG3.» (u.d.), adresse: https://www.fagskolenrogaland.no/_f/p40/i4d029d4c-4c0c-46f0-9a8e-2ee140e91f4f/hydraulikkskolen-vg3-industriskolen.pdf (sjekket 07.05.2024).

- [77] F. Conrad. «pneumatik.» (2016), adresse: <https://denstoredanske.lex.dk/pneumatik> (sjekket 17.04.2024).
- [78] H. Hove. «Hva er hydraulikk?» (3. apr. 2019), adresse: <https://ndla.no/nb/subject:1:5a5cac3f-46ff-4f4d-ba95-b256a706ec48/topic:a09a0615-a2b5-4729-8c5c-9aae5c66fbcf/resource:51449b99-36b5-41f0-8cdd-19a5651aedb1> (sjekket 11.04.2024).
- [79] Hofstad, Knut. «pneumatikk.» (2023), adresse: <https://snl.no/pneumatikk> (sjekket 11.04.2024).
- [80] Y. Shi, M. Cai, W. Xu mfl., «Methods to Evaluate and Measure Power of Pneumatic System and Their Applications,» *Chin. J. Mech. Eng.*, årg. 32, s. 42, 2019. DOI: 10.1186/s10033-019-0354-6. adresse: <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0354-6>.
- [81] Store Norske Leksikon. «Kontaktor (elektrisitetstlære).» (2007), adresse: https://snl.no/kontaktor_-_elektrisitetstl%C3%A6re (sjekket 02.05.2024).
- [82] T. H. Nätt og K. A. Rosvold, *PLS - prosessdatamaskin*, 14. okt. 2022. adresse: https://snl.no/PLS_-_prosessdatamaskin (sjekket 01.04.2024).
- [83] *IEC 61131-3:2013*, International Electrotechnical Commission, 2013. adresse: <https://webstore.iec.ch/publication/4552> (sjekket 14.05.2024).
- [84] Liam Aljundi. «Node-RED,» *Arduiono Docs.* (2024), adresse: <https://docs.arduino.cc/arduino-cloud/guides/node-red/> (sjekket 16.04.2024).
- [85] Node-RED. «Message design.» (u.d.), adresse: <https://nodered.org/docs/developing-flows/message-design> (sjekket 16.04.2024).
- [86] ParTech. «RAH101S50 TRYKKBEGR.VENTIL 7-350 BAR.» (u.d.), adresse: <https://www.partech.no/nb-no/hydraulikk/patronventiler/trykkbegrensningsventiler/rah101s50-trykkbegr-ventil-7-350-bar-100427> (sjekket 29.04.2024).
- [87] D. Parikh. «A guide to common hydraulic symbols.» (2018), adresse: <https://www.engineeringclicks.com/hydraulic-symbols/> (sjekket 30.04.2024).
- [88] Egil Eng & Co. AS. «Miniagg. 1,20 ccm 230V, 0,55 kW 3L.» (2024), adresse: <https://webshop.egileng.no/hydraulikk/aggregater/mini-aggregater/miniagg-230v-1-fas/miniagg-1-20-ccm-230v-0-55-kw-3l-ac-motor-1-fas-1400-omdr-ho0120230vf0603-p0000056772> (sjekket 08.05.2024).
- [89] «Akkumulator HB1.» (2024), adresse: <https://hydraulikkteknikk.no/produkter/akkumulatorer/blaereakkumulator/akkumulator-hb1/> (sjekket 08.05.2024).
- [90] RS. «RS PRO Pressure Sensor, 0bar Min, 400bar Max, Voltage Output, Relative Reading.» (2024), adresse: no.rs-online.com/web/p/pressure-sensors/7974973?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAAR2Q3Ls_CIM9Dm1mJYjYk1tQ1Yk3BugjNX3A9N1LYMSdFMhFzi0WCjnfA-Q_aem_Ae_2zibeXP_Hz2tM_6YcE5FdLdKnqIF1K90Z2KPE1M1YLU9ercCIgYs9Cz81nUff0BpSvMHMArhF_Ab8Vv50jUJB (sjekket 29.04.2024).
- [91] ParTech. «VMY210K06NV1P10.» (2024), adresse: <https://www.partech.no/nb-no/hydraulikk/vmy210k06nv1p10-243171> (sjekket 29.04.2024).
- [92] FN-sambandet. «Last ned grafikk.» (u.d.), adresse: <https://fn.no/download/last-ned-grafikk> (sjekket 02.05.2024).
- [93] FN-sambandet. «Ren energi til alle.» (18. sep. 2023), adresse: <https://fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/ren-energi-til-alle> (sjekket 02.05.2024).

- [94] FN-sambandet. «Industri, innovasjon og infrastruktur.» (6. jun. 2023), adresse: <https://fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/industri-innovasjon-og-infrastruktur> (sjekket 02.05.2024).
- [95] FN-sambandet. «Ansvarlig forbruk og produksjon.» (2. mai 2023), adresse: <https://fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/ansvarlig-forbruk-og-produksjon> (sjekket 02.05.2024).

Vedlegg A

Dokumentasjon

A.1 PLS-dokumentasjon

Module Address

IP Address 192.168.0.3
Subnet Mask: 255.255.255.0
Default gateway 192.168.0.1

Creator:
Checked:
Date:

htoft

4/11/24 12:12 PM/5/15/24 1:23 PM

Project:
Installation:
File:

LOG018.3_1 Diagram.lsc

Customer:
Diagram No.:
Page:

119

Parameter VM Mapping

ID	Block	Parameter	Type	Address
1	B033 [Analog Ramp]	Level 1 (L1)	Word	0
2	B033 [Analog Ramp]	Level 2 (L2)	Word	2
3	B033 [Analog Ramp]	Speed of change	Word	4
4	B033 [Analog Ramp]	Current level	Word	6
5	B007 [Mathematic instruction]	V1	Word	8
6	B039 [Mathematic instruction]	V1	Word	10
7	B039 [Mathematic instruction]	V2	Word	12
8	B006 [Analog Amplifier]	Ax, amplified	Word	14
9	B015 [Analog threshold trigger]	Ax, amplified	Word	16
10	B020 [Analog Amplifier]	Ax, amplified	Word	18

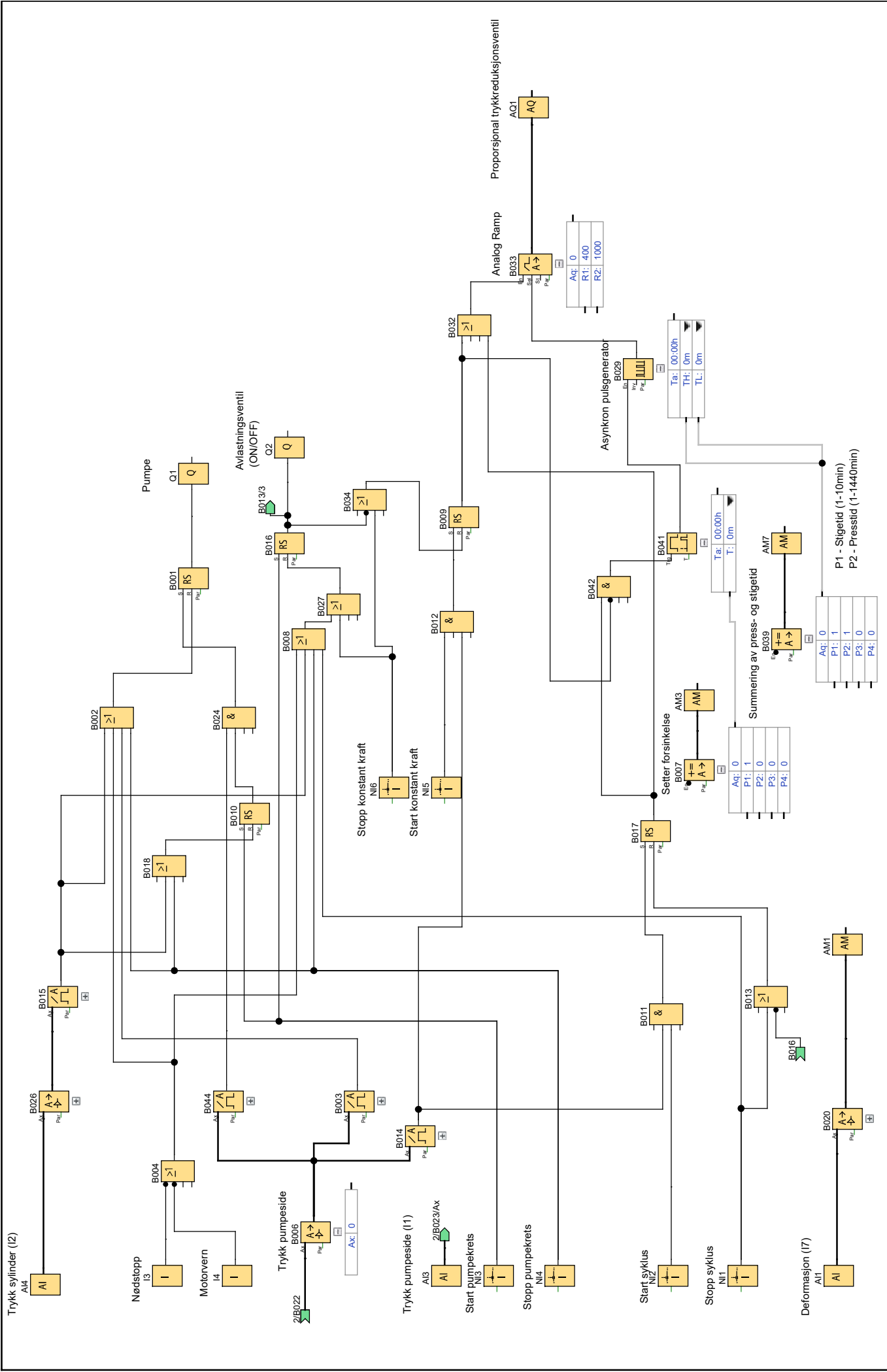
Creator:
Checked:
Date:

hfof
4/11/24 12:12 PM/5/15/24 1:23 PM

Project:
Installation:
File:

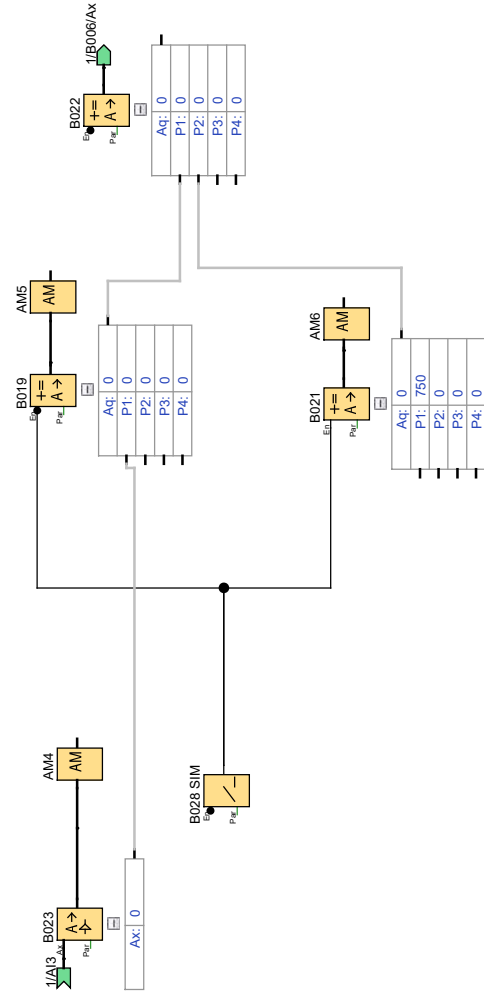
LOG01.8.3_1 Diagram.lsc

Customer:
Diagram No.:
Page:



Creator:	htoft	Project:	LOG018.3_1 Diagram.lsc
Checked:	4/11/24 12:12 PM/5/15/24 1:23 PM	Installation:	
Date:		File:	
		Customer:	
		Diagram No.:	
		Page:	3 / 9

Simuleringsøyfe



Creator:

Checked:

Date:

htoft

4/11/24 12:12 PM/5/15/24 1:23 PM

Project:

Installation:

File:

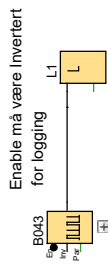
Customer:

Diagram No.:

Page:

LOGO18.3_1 Diagram.lsc

4 / 9



Creator:
Checked:
Date:

htoft

4/11/24 12:12 PM/5/15/24 1:23 PM

Project:
Installation:
File:



















LOG01.8.3_1 Diagram.lsc

Customer:
Diagram No.:

Page:

Block Number (Type)	Parameter
B014(Analog threshold trigger) :	Gain=1.0+ Offset=0 On=1600 Off=2500 Point=0
B015(Analog threshold trigger) :	Gain=2.5+ Offset=0 On=1350 Off=2500 Point=1
B016(Latching Relay) :	Rem = off
B017(Latching Relay) :	Rem = off
B019(Mathematic instruction) :	V1=B23+ V2=0 V3=0 V4=0 Point=0 ((B23+0)+0)+0
B020(Analog Amplifier) :	Gain =5.0+ Offset=0 Point =2
B021(Mathematic instruction) :	V1=750+ V2=0 V3=0 V4=0 Point=0 ((750+0)+0)+0
B022(Mathematic instruction) :	V1=B19+ V2=B21 V3=0 V4=0 Point=0 ((B19+B21)+0)+0
B023(Analog Amplifier) :	Gain =1.0+ Offset=0 Point =1

Creator:	htoft	Project:		Customer:	
Checked:		Installation:		Diagram No.:	
Date:	4/11/24 12:12 PM/5/15/24 1:23 PM	File:	LOGO! 8.3_1 Diagram.lsc	Page:	7 / 9

Block Number (Type)	Parameter																								
<p>B025(Message texts) :</p> <table border="1" data-bbox="127 300 951 707"> <tr> <td>Level 1 :</td> <td> B033 - Level 1 (L1)</td> <td>400</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Level 2 :</td> <td> B033 - Level 2 (L2)</td> <td>1000</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rate :</td> <td> B033 - Speed of ...</td> <td>10</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Stigetid :</td> <td> B039 - V1</td> <td>1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Presstid :</td> <td> B039 - V2</td> <td>1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Tidsfor. :</td> <td> B007 - V1</td> <td>1</td> <td></td> </tr> </table> <p>Line1.10 B033-R1 Line2.10 B033-R2 Line3.10 B033-Rate Line4.10 B039-P1 Line5.10 B039-P2 Line6.10 B007-P1</p>	Level 1 :	 B033 - Level 1 (L1)	400		Level 2 :	 B033 - Level 2 (L2)	1000		Rate :	 B033 - Speed of ...	10		Stigetid :	 B039 - V1	1		Presstid :	 B039 - V2	1		Tidsfor. :	 B007 - V1	1		<p>Prio = 1 Quit = off Text1: enabled Text2: disabled</p> <p>--> Ticker setting - CBC - Line1: N - Line2: N - Line3: N - Line4: N - Line5: N - Line6: N Message Destination - Both</p>
Level 1 :	 B033 - Level 1 (L1)	400																							
Level 2 :	 B033 - Level 2 (L2)	1000																							
Rate :	 B033 - Speed of ...	10																							
Stigetid :	 B039 - V1	1																							
Presstid :	 B039 - V2	1																							
Tidsfor. :	 B007 - V1	1																							
<p>B026(Analog Amplifier) :</p>	<p>Gain =1.0+ Offset=0 Point =0</p>																								
<p>B028 SIM(Softkey) :</p>	<p>Rem = off Switch=off+</p>																								
<p>B029(Asynchronous Pulse Generator) : Asynkron pulsgenerator</p>	<p>Rem = off B39m+ B39m</p>																								
<p>B033(Analog Ramp) : Analog Ramp</p>	<p>Gain =2.1+ Offset=0 Point =0 Rate=10+ MaxL=1300 StSp=0 L1=400 L2=1000</p>																								
<p>B039(Mathematic instruction) : Summering av press- og stigetid</p>	<p>V1=1+ V2=1 V3=0 V4=0 Point=0 ((1+1)+0)+0</p>																								
<p>B041(On-Delay) :</p>	<p>Rem = off B7m+</p>																								
<p>B043(Asynchronous Pulse Generator) :</p>	<p>Rem = off 00:50s+ 09:50s</p>																								

Block Number (Type)	Parameter
B044(Analog threshold trigger) :	Gain=1.0+ Offset=0 On=0 Off=1600 Point=1
I3(Input) : Nødstop	
I4(Input) : Motorvern	
NI1(Network input) : Stopp syklus	V30.0
NI2(Network input) : Start syklus	V32.0
NI3(Network input) : Start pumpekrets	V34.0
NI4(Network input) : Stopp pumpekrets	V36.0
NI5(Network input) : Start konstant kraft	V38.0
NI6(Network input) : Stopp konstant kraft	V40.0
Q1(Output) : Pumpe	
Q2(Output) : Avlastningsventil (ON/OFF)	



Creator:	htoft	Project:		Customer:	
Checked:		Installation:		Diagram No.:	
Date:	4/11/24 12:12 PM/5/15/24 1:23 PM	File:	LOGO! 8.3_1 Diagram.lsc	Page:	9 / 9

A.2 Risikovurdering

RISIKOANALYSE

Enhet/institutt:	Sintef Energi/ NTNU - Institutt for elektrisk energi	Dato opprettet:	01.04.2024
Ansvarlig linjeleder (navn):		Sist revidert:	03.05.2024
Ansvarlig for aktiviteten som risikovurderes (navn):			
Deltakere (navn):	Kristoffer Andreas Paulsen, Per Einar Storjord, Oliver Garden Sveen og Håkon Toften		

Beskrivelse av den aktuelle aktiviteten, området mv.:

Risikoanalysen omfatter sammenstilling, igangsettelse og drift av hydraulisk testoppsett for testing av cellulosebase isolasjonsmaterialer. Prosjektet er en bacheloroppgave gitt fra SINTEF Energi, studentene som har utarbeidet løsningen studerer Elkraft og bærekraftig energi. Risikovurderingen inkluderer sammenstilling, oppstart og bruk av systemet. Risikovurderingen skal gjennomgås av deltagerne før oppstart.

Aktivitet/arbeidsoppgave	Mulig uønsket hendelse	Eksisterende risikoreducerende tiltak	Vurdering av sannsynlighet (S) (1-5)	Vurdering av konsekvens (K)			Risikovurdering (S x K)	Forslag til forebyggende og/eller korrigerende tiltak	Restrisiko etter tiltak (S x K)
				Menneske (1-5)	Materielle (1-5)	Ytre miljø (1-5)			
Bruk av vinkelsliper, boremaskin, baufil	Øyeskade p.g.a. sprut av slipestøv/partikler	Vernebriller er alltid tilgjengelig i verkstedet	3	3			9	Før oppstart: Gjennomføre dokumentert HMS-opplæring med studentene (bruk av håndverktøy og pålagt verneutstyr)	3 (S = 1)
Bruk av vinkelsliper og boremaskin	Hørselskade på grunn av støvende verktøy med høyt støynivå.	Hørselsvern ved behov	3	3			9	Før oppstart: Gjennomføre dokumentert HMS-opplæring med studentene (bruk av håndverktøy og pålagt verneutstyr)	3 (S = 1)
Mekanisk arbeid. Montering av hydraulikkomponenter og mekaniske deler.	Kuttskader	Ingen	3	3			9	Bruk hansker ved håndtering av skarpe deler.	3 (S = 1)
Tilkobling og oppstart av hydraulisk testoppsett	Elektrisk støt	FSE	2	4			8	Alle skal gjennomføre FSE før oppstart. Det skal aldri arbeides på spenningsatt utstyr.	4 (S = 1)
Tilkobling og oppstart av hydraulisk testoppsett	Hydraulikkolje på hud	Ingen	3	2			6	Det brukes alltid hansker ved til og frakobling av hydraulisk utstyr.	2 (S = 1)
Tilkobling og oppstart og generell bruk av hydraulisk testoppsett	Hydraulisk injeksjonsskade	Sørg for at utstyret er i god stand	2	5			10	Aldri arbeid på trykksatt utstyr. Automatisk trykkavlastning av systemet. Instruks på trykkavlastning og bruk for personell.	5 (S = 1)
Søk etter hydraulikklekkasje	Hydraulisk injeksjonsskade	Ingen	3	5			15	Bruk aldri kroppsdeiler for å lete etter lekkasjer. Bruk papp eller kontroller visuelt.	5 (S = 1)
Generell bruk av testoppsett	Hørselskade	Hørselsvern ved behov	2	2			4	Ha tilgjengelig hørselsvern i lab	2 (S = 1)
Generell bruk av testoppsett	Brannskade	Ingen	3	2			6	Varselskilt på varme deler når testen foregår. Instruks om å vente på at deler kjøler seg ned før arbeid på utstyret.	2 (S = 1)
Montere/bytte testobjekt	Klemskade	Nødstop	2	3			6	Bruk nødstop som elektrisk vil stanse utstyret, og avlaste trykk på sylindersiden. Følg instruks for bruk	3 (S = 1)

Vedlegg B

Tilbud

B.1 Tilbud ventiler fra Partech

B.2 Tilbud akkumulator, sylinder og ombygging fra Hydraulikkteknikk

B.3 Tilbud hydraulisk pumpe fra Hydraulikkteknikk

**Kunde:****NTNU**

Felles Fakturamottak, Postboks 50
0508 OSLO
Norge

Lever til-adresse**NTNU**

Felles Fakturamottak, Postboks 50
0508 OSLO
Oslo
Norge

Kundens kontakt:

Kristoffer Paulsen

Kundens referanse:

Kundens referanse 2:

Mail 11/3**Fakturaadresse:****NTNU**

Felles Fakturamottak, Postboks 50
0508 OSLO
Norge

Partech AS

Storebotn 43
5309 Kleppestø, Norge

Foretaksregisteret:
NO917515743MVA

Telefon: +47 55 98 19 00
E-post: post@partech.no
Web: www.partech.no

TILBUD

Side 1

Tilbudsnr.: **T22608**
Tilbudsdato: 11.03.24
Selger: Ivar Spjeld
Kundenr.: 10683

TILBUDSINFORMASJON

Leveringsbet.: Ex works
Fraktmåte:
Betalingbet.: 30 dager netto

Nr.	Beskrivelse	Tariff	CoO	Antall	Enhet	Fri tekst	Salgspris	Rab.%	Beløp
243171	VMY210K06NV1P10	84812010	DE	1	Stk	Ca 3 uker	20 935,20	30%	14 654,64
264096	SPD23BA910 MONT.PLATE NG 6 X1. 3/8 SIDEM	84812010	NL	1	Stk	På lager	1 591,20	30%	1 113,84
324008	BK375 BOLTSETT 4 stk M5X30	73181595	DE	1	Stk	På lager	291,20	30%	203,84
226715	PCD00A-400 dig. styrekort	90328900	DE	1	Stk	På lager	6 656,00	30%	4 659,20
100427	RAH101S50 Trykkbegr.ventil 7-350 bar	84812010	US	1	Stk	På lager	1 285,23	30%	899,66
100235	B10-2-6B PTC-blokk 3/8" BSP, Stål	84819000	GB	1	Stk	På lager	1 640,08	30%	1 148,06
261360	DSH101NR 2/2 seteventil, normalt åpen	84812010	US	1	Stk	På lager	3 933,49	30%	2 753,44
100235	B10-2-6B PTC-blokk 3/8" BSP, Stål	84819000	GB	1	Stk	På lager	1 640,08	30%	1 148,06
100210	CAP024D 24VDC Supercoil 28w Ø16x50	85059029	US	1	Stk	På lager	1 149,93	30%	804,95

Varepris(er) er netto priser, ekskl. MVA og emballasje. Oppgitte leveringstider er ledende, ikke bindende, med mindre annet er avtalt skriftlig. Hvis fraktmåte ikke oppgis av kunde ved bestilling, vil ParTech velge en hensiktsmessig transportør. Transportkostnader belastes kunde, om ikke annet er skriftlig avtalt. Standard NL09 salgs- og leveringsbetingelser gjelder. Signerte spesialavtaler vil overstyre NL09. Retur av varer må avtales på forhånd. En returavgift kan påløpe, med mindre varen er utsatt for feilekspedering eller er ødelagt. Krav til dokumentasjon må oppgis ved forespørsel og bestilling. Tilleggskostnader for dokumentasjon kan påløpe.

Banknavn Sparebank 1 SR-Ba
Konto NO 3208.26.27811
SWIFT-kode SPRONO22
IBAN NO: NO4932082627811

**Kunde:****NTNU**

Felles Fakturamottak, Postboks 50
0508 OSLO
Norge

Fakturaadresse:**NTNU**

Felles Fakturamottak, Postboks 50
0508 OSLO
Norge

Lever til-adresse**NTNU**

Felles Fakturamottak, Postboks 50
0508 OSLO
Oslo
Norge

Kundens kontakt: **Kristoffer Paulsen**

Kundens referanse:

Kundens referanse 2: **Mail 11/3**

Partech AS

Storebotn 43
5309 Kleppestø, Norge

Foretaksregisteret:
NO917515743MVA

Telefon: +47 55 98 19 00
E-post: post@partech.no
Web: www.partech.no

TILBUD

Side 2

Tilbudsnr.: **T22608**
Tilbudsdato: 11.03.24
Selger: Ivar Spjeld
Kundenr.: 10683

TILBUDSINFORMASJON

Leveringsbet.: Ex works
Fraktmåte:
Betalingbet.: 30 dager netto

Nr.	Beskrivelse	Tariff	CoO	Antall	Enhet	Fri tekst	Salgspris	Rab.%	Beløp
100120	Hirschmann plugg PG9 std	85369010	HU	1	Stk	På lager	208,00	30%	145,60

Totalt NOK eks. mva. 27 531,29

Vi takker for forespørselen, og håper følgende tilbud er av interesse. Tilbudet er gyldig i 30 dager fra tilbudsdato, med mindre annen informasjon er gitt. På grunn av den ekstraordinære situasjonen med Covid-19 må vi ta forbehold om at oppgitte priser og leveringstider kan endres. Eventuelle endringer vil varsles skriftlig. Alle dokumentasjonskrav må oppgis før bestilling.

Tilbudsnummer	Kundenummer	Side
15157	34081	1/1
Tilbudsdato	Utskriftsdato	
11-03-2024	12-03-2024	
Vår referanse	Deres referanse	
Bjørnar Olsen		

Deres mva-reg.nr
NO919303808MVA

Deres forespørselsnummer

Postadresse
SINTEF AS
Strindvegen 4
7034 TRONDHEIM

Leveringsadresse
SINTEF AS
Strindvegen 4
7034 TRONDHEIM

Leveringsvilkår
EXW

Betalingsvilkår
Netto 14 dager

Leveringsmåte
Postpakke inntil 35kg - bring

Leveringstid

Gyldighetsdato
18-03-2024

Pos.	Artikkelnr	Benevnelse	Antall	Å-pris	%	Beløp
10	EPRC102	Sylinder RC-102 10ton 54mm	1,00 stk	5 894,78	20,00	4 715,82
20	DIVERSE	RC-102 Viton Kit	1,00 stk	1 963,00	20,00	1 570,40
40	EPSERVICE	Skifte av pakninger på sylinder og lade accumulator til 100 bar	2,00 stk	1 226,40		2 452,80
50	880019361	Akkumulator blære 1 liter 350 bar - HB1	1,00 stk	9 397,60	40,00	5 638,56

Med vennlig hilsen
Bjørnar Olsen
+4747603069
Bjornar@hydraulikkteknikk.no

Sum ekskl. mva (NOK) 14 377,58

*Prisen(e) er netto ekskl. m.v.a. og emballasje.
*Standard leveringsbetingelser i henhold til NL17
*Forbehold om mellomsalg
*Reel frakt blir beregnet ved vareavgang
*Skaffevarer eller varer spesielt bestilt for kunden tas ikke i retur
*Kunden er forpliktet til å sjekke at ordrebekreftelse og pakkseddel er i henhold til det som er bestilt før varen pakkes opp eller monteres
*Retur av varer må gjøres innen 4 uker etter forsendelsesdato fra Hydraulikkteknikk AS
*Varer som ønskes returnert skal ikke være benyttet, brukt eller montert
*Retur av varer må være godkjent av selger før varen returneres
*Godkjente returer krediteres med 70% av varens verdi
*Ved reklamasjon skal reklamasjonsskjema følge varen
*Det tas forbehold om prisjustering ved valutaendring
*Krav til dokumentasjon må fremgå av forespørsel og bestilling.
Tilleggskostnader for dokumentasjon kan påløpe
*Alle ordrer under kr. 500,- vil bli belastet med minsteordregebyr på kr. 250,-

Postadresse Hydraulikkteknikk AS Hvamsvingen 7 2013 Skjetten NORGE	Besøksadresse Hydraulikkteknikk AS Hvamsvingen 7 2013 Skjetten NORGE	Org.nr: 986261915 Mva-reg.nr: NO986261915MVA Hjemsted: Skjetten Telefon: 67062150	BIC: DNBANOKKXXX BBAN: 16441909415 DNB
post@hydraulikkteknikk.no	http://hydraulikkteknikk.no	Foretaksregisteret	

Postadresse

SINTEF AS

Strindvegen 4

7034 TRONDHEIM

Leveringsadresse

SINTEF AS

Strindvegen 4

7034 TRONDHEIM

Leveringsvilkår

EXW

Betalingsvilkår

Netto 14 dager

Leveringsmåte

Postpakke inntil 35kg - bring

Leveringstid**Gyldighetsdato**

19-03-2024

Pos.	Artikkelnr	Benevnelse	Antall	Å-pris	%	Beløp
10	880013978	Mini Aggregat 2,1 ccm Tank S343 for 90 moto*	1,00 stk	7 489,70	40,00	4 493,82
20	OSK3970TR056	Flens sett GP 1 st.71	1,00 stk	879,20	40,00	527,52
30	880001168	EL. motor 0,55 kw 1500 o/min 220 V B14 1 fase.	1,00 stk	5 688,00	40,00	3 412,80

Med vennlig hilsen

Morten Østlund

+4791397702

Morten@hydraulikkteknikk.no

Sum ekskl. mva (NOK)

8 434,14

*Prisen(e) er netto ekskl. m.v.a. og emballasje.

*Standard leveringsbetingelser i henhold til NL17

*Forbehold om mellom salg

*Reel frakt blir beregnet ved vareavgang

*Skaffevarer eller varer spesielt bestilt for kunden tas ikke i retur

*Kunden er forpliktet til å sjekke at ordrebekreftelse og pakkseddel er i henhold til det som er bestilt før varen pakkes opp eller monteres

*Retur av varer må gjøres innen 4 uker etter forsendelsesdato fra Hydraulikkteknikk AS

*Varer som ønskes returnert skal ikke være benyttet, brukt eller montert

*Retur av varer må være godkjent av selger før varen returneres

*Godkjente returer krediteres med 70% av varens verdi

*Ved reklamasjon skal reklamasjonsskjema følge varen

*Det tas forbehold om prisjustering ved valutaendring

*Krav til dokumentasjon må fremgå av forespørsel og bestilling.

Tilleggs kostnader for dokumentasjon kan påløpe

*Alle ordrer under kr. 500,- vil bli belastet med minsteordregebyr på kr. 250,-

Postadresse

Hydraulikkteknikk AS

Hvamsvingen 7

2013 Skjetten

NORGE

Besøksadresse

Hydraulikkteknikk AS

Hvamsvingen 7

2013 Skjetten

NORGE

Org.nr: 986261915

Mva-reg.nr: NO986261915MVA

Hjemsted: Skjetten

Telefon: 67062150

BIC: DNBANOKKXXX

BBAN: 16441909415

post@hydraulikkteknikk.no

http://hydraulikkteknikk.no

Foretaksregisteret

DNB

Vedlegg C

Artikkel

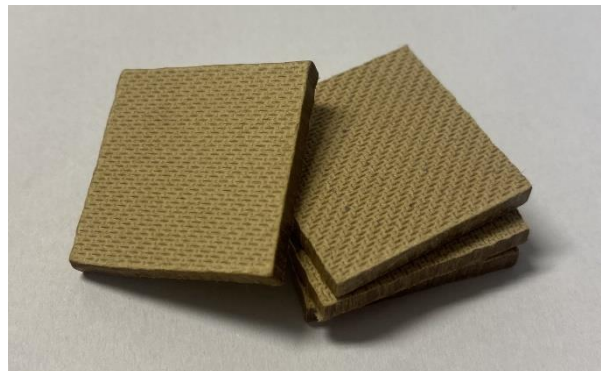
C.1 Populærvitenskapelig publisasjon

Testoppsett for hydraulisk testing av cellulosebasert transformatorisolasjon

Introduksjon

Forskningsinstituttet SINTEF Energi jobber med et forskningsprosjekt med navn DynaLoad - Dynamic loading of transformer insulation. I dette prosjektet ønsker de å studere hvordan de mekaniske langtidsegenskapene til cellulosebaserte isolasjonsmaterialer i transformatorer, blir påvirket av raske dynamiske lastpåkjenninger i strømmettet. Når krafttransformatorer utsettes for last, vil temperaturen øke. Det fører til at metalledene i transformatoren utvides og skaper et forhøyet press på de cellulosebaserte isolasjonsmaterialene. Videre er det kjent at transformatorolje kan inneholde forurensning, i form av fuktighet, som kan trekke inn i isolasjonen. Over tid kan slike gjentatte påkjenninger skape plastisk deformasjon i materialet. Dermed kan det føre til nedsatt kortslutningsytelse i transformatoren, som følge av varig nedsatt viklingsforspenning. I den forbindelse ble fire studenter ved NTNU bedt om å prosjektere et testoppsett, som skulle brukes i denne forskningen. Testoppsettet må:

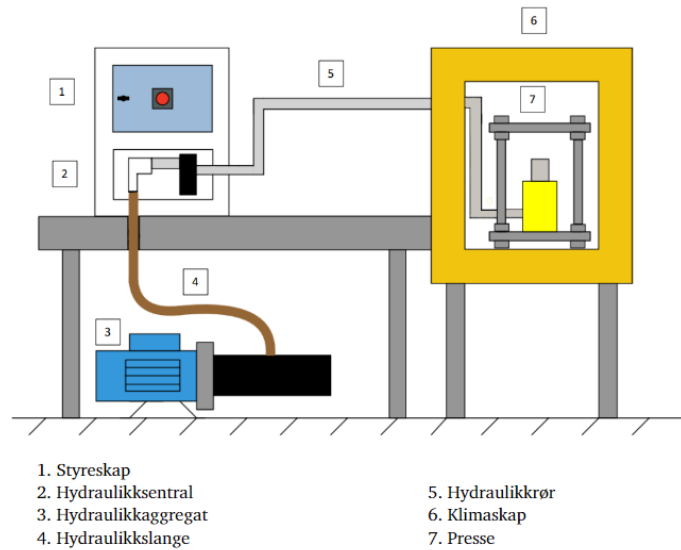
- Kunne stå i et klimaskap.
- Tåle 140°C.
- Måle deformasjon.
- Utøve varierende kraft fra 0-15 kN på et testobjekt.
- Kunne presse i sykluser mellom 1 min og 24 timer.
- Kunne stå med konstant kraft i lang tid.
- Være hydraulisk eller pneumatisk.
- Kunne endre kraft fra null til maksimalt på minimum ett minutt.
- Leveres med fungerende styresystem.



Figur 1 Bilde av prøvebiter av presspan med høy tetthet.

Etter å ha vurdert flere alternative løsninger for å oppfylle spesifikasjonene, falt valget på å designe et hydraulisk testoppsett. Skissen i figur 1, viser prinsippet for det utviklede testoppsettet.

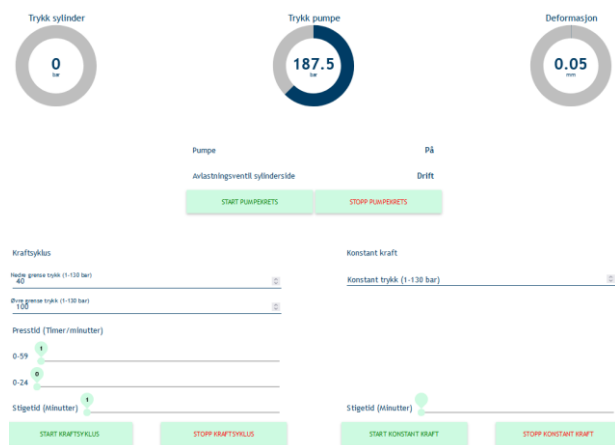
Testoppsettet består av et hydraulikkaggregat, som leverer oljetrykk til systemet. En hydraulikkentral, bestående av flere ventiler og sensorer, som sammen med et PLS basert styresystem kontrollerer den mekaniske pressen i klimaskapet.



Figur 2 Skisse av testoppsett. Her vises hydraulisk del, elektrisk del og pressen.

Styresystem

For å kontrollere testoppsettet har det blitt utviklet et styringssystem. Det var i utgangspunktet ønsket et pythonbasert program, men på grunn av driftssikkerhet ble Siemens LOGO! PLS vurdert som et bedre alternativ. Det er laget et fullstendig styreprogram i LOGO Soft!, som brukes til å utføre tester etter ønskede parametere for trykk og stigetid. For visualisering av målingene i sanntid, og bedre brukervennlighet, er det som vist i figur 2 laget et operatørdashbord i Node-RED. Dette dashbordet tar inn målingene av trykk og deformasjon fra PLS-en, og visualiserer dem i grafer.



Figur 3 Skjerm bilde av operatørdashbordet i Node-RED.



Koden gjør det mulig å kjøre to ulike testprogram, konstant kraft og kraftsykluser. I Node-RED bestemmer testoperatøren testparametere for; høyt og lavt press (0-130 bar), stigetid (1-10 min) og presstid (1 min-24 timer). For å starte konstant-kraft-programmet trengs kun å bestemme kraft (i bar) og stigetid. I operatørdashbordet startes og stoppes testene.

Figur 4 Skjerm bilde av graf for ønsket trykk på sylinderen. Dette visualiserer hvordan kraftsyklusprogrammet styrer sylindertrykket.

Utfordringer

Underveis i utviklingen kom det fram at det var noen utfordringer med et hydraulisk testoppsett. Hovedutfordringen var å finne komponenter som tåler å stå i den høye temperaturen, som er påkrevd. Løsningen var å designe et system der kun pressen med aktuatoren står inne i klimaskapet. Dermed er det kun den hydrauliske sylindren og oljen som vil bli utsatt for høy temperatur. Etter kontakt med fagpersoner innen hydraulikk, ble det klart at sylindren kunne modifiseres ved å bytte ut de originale NBR tetningene med FKM tetninger. Ved å gjøre en slik modifikasjon kunne sylindren stå med en omgivelsestemperatur over 140°C. Et annet tiltak som ble gjort, for å minske påkjenningene på tetningene, var å velge en større sylindren enn nødvendig. Dermed kunne sylindren driftes med lavere trykk enn den var beregnet for.

For å sikre høy nøyaktighet i kontrollen av systemet, ble flere typer ventiler vurdert. Utfordringen var å finne en ventil som tilfredsstiller kravet til nøyaktighet, uten konstant oljgjennomstrømning. Etter flere vurderinger, i samråd med fagpersoner, falt valget på en proporsjonal trykkreduksjonsventil fra produsenten Parker.

For å minske faren som følger av olje i høy temperatur, er det valgt å bruke HFC-væske som hydraulikkvæske. Dette er en type hydraulikkvæske, som er mye anvendt og kan brukes til de fleste formål der en brannsikker olje er ønsket.

Konklusjon

Ved realisering av testoppsettet kan det bidra til å utføre akselererte tester av cellulosebaserte isolasjonsmaterialer, i tråd med de ønskede spesifikasjonene fra SINTEF Energi.

Testoppsettets driftssikkerhet gjør at testene kan utføres over et lengre tidsrom i kombinasjon med endringer i temperatur og fuktighet i testomgivelsene.

Bærekraft

Krafttransformatorer er i dag en sentral del av kraftnettet. Flere energikrevende sektorer, blant annet industri og transport, elektrifiseres i dag i høyt tempo i tråd med FNs bærekraftsmål. Kraftnettet vil, som kritisk infrastruktur, spille en enda viktigere rolle i framtiden enn i dag. Å forstå de cellulosebaserte isolasjonsmaterialenes egenskaper vil kunne bidra til flere av FNs målsetninger. Hvis prosjektet realiseres vil det kunne bidra til bærekraftsmål nummer 7, 9 og 12. For å øke andelen fornybar energi er krafttransformatoren en nøkkelkomponent. Ved å forske på hvordan man kan sikre et mer robust kraftnett, på tvers av landegrensene, kan prosjektet bidra til bærekraftsmål nummer 7. Videre vil økt forståelse for isolasjonsmaterialene kunne medføre bedre utnyttelse av naturressurser som tre og vann, og videre en mer bærekraftig produksjon. Dermed kan prosjektet bidra til mål 9 og 12.

