



Sami Uhre

# Lennonohjausjärjestelmän servoventtiilin virtausmittaus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

16.5.2022

## Tiivistelmä

Tekijä: Sami Uhre  
Otsikko: Lennonohjausjärjestelmän servoventtiilin virtausmittaus  
Sivumäärä: 27 sivua + 1 liitettä  
Aika: 16.5.2022

Tutkinto: Insinööri (AMK)  
Tutkinto-ohjelma: Sähkö- ja automaatiotekniikka  
Suuntautumisvaihtoehto: Automaatiotekniikka  
Ohjaajat: Insinööri Juha Silvola  
Lehtori Janne Mäntykoski

---

Opinnäytetyön aiheena oli lennonohjausjärjestelmän servoventtiilien virtausmittaus. Erään servoventtiilimallin virtausmittauksessa oli toimiva, mutta iäkäs virtausmittausmenetelmä. Työn tavoitteena oli korvata vanhentunut virtausmittausmenetelmä uudella, tehden mittausprosessista varmemman ja tarkemman, ja parantaen siten venttiilien huoltovarmuutta jatkossa. Myös uudemman virtausmittarin varaosien saanti ja huolto on taattu valmistajan antaman takuun ja kalibroinnin ansiosta. Työ tehtiin Finnairille, joka testaa lennonohjausjärjestelmien servoventtiileitä hydraulikorjaamolla Helsinki-Vantaan lentokentällä.

Työ aloitettiin kartoittamalla uuden virtausmittarin tarvittavat ominaisuudet, joiden perusteella sopiva virtausmittari valittiin. Virtausmittausmenetelmäksi valikoitui Trigas-DML1.0 Pelton Wheel Extended Range -virtausmittarit, joita hankittiin kaksi kappaletta mittaamaan virtausta molempiin suuntiin.

Virtausmittareiden hankinnan jälkeen ne asennettiin servoventtiilien testausasemaan mittausmenetelmän soveltuvuuden varmistamiseksi. Testausaseman tietokoneelle tehtiin testiohjelma, ja virtausmittareiden soveltuvuus kokeiltiin käytännössä.

Kokeiltu virtausmittausmenetelmä ei soveltunut servoventtiilien virtauksien mittaamiseen. Se osoittautui kyvyttömäksi mitata pienimpiä virtauksia virtauksen nollakohdan lähellä. Lisäksi haasteeksi muodostui virtauksen suunnanmuutos ja sen toteaminen ohjelmallisesti.

Työ ei anna valmista ratkaisua virtausmittausmenetelmän päivittämiseen, mutta voi olla hyödyllinen seuraaville projektin jatkajille.

Avainsanat: servoventtiili, lennonohjausjärjestelmä, virtausmittaus

## Abstract

Author:	Sami Uhre
Title:	Flow Measurement of an Electrohydraulic Servo Valve of a Flight Control System
Number of Pages:	27 pages + 1 appendix
Date:	16 May 2022
Degree:	Bachelor of engineering
Degree Programme:	Electrical and Automation Engineering
Specialisation option:	Automation Technology
Instructors:	Juha Silvola, Engineer Janne Mäntykoski, Senior Lecturer

---

The topic of this work was Flow measurement of an electrohydraulic servo valve of a Flight Control System. Certain servo valve's flow measuring technology is effective, but old. The aim of this work was to replace old flow measurement technology with modern technology, making the measuring process more secure and precise, and improving servo valves security of supply. Also, newer flow meter's supply of spare parts and maintenance is guaranteed due to manufacturer's warranty and calibration. The work was carried out for Finnair Technical Services Oy, which tests flight control system's servo valves at its hydraulics workshop located at Helsinki-Vantaa airport.

The work was started by mapping the necessary properties of the new flow measuring method and based on that, a suitable measuring method was selected. The selected flow measuring method was two pieces of TrigasDML1.0 Pelton Wheel Extended Range flow meters to measure flow in both directions.

After acquiring the flow meters, they were installed at the servo valve test station to ensure the suitability of the measurement method. A test program was made for the computer of the test station, and the suitability of the flow meters was tested in practice.

This flow measuring method was not suitable for measuring servo valves flow. Trigas DML1.0 flow meters turned out to be unable to measure the smallest flows near zero-flow. In addition, another challenge was to detect flow's direction.

As a result, this work does not provide a ready-made solution for updating flow measurement technology but may be useful for future project successors.

Keywords: servo valve, flight control system, flow measurement

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Lennonohjausjärjestelmä	1
2.1	Hydraulinen lennonohjausjärjestelmä	1
2.2	Ohjainpinnat	4
2.3	Sähköhydrauliset servoventtiilit	7
3	Virtausmittaus	8
3.1	Virtausmittarit	8
3.2	Nesteen viskositeetti	9
4	Virtausmittauksen suunnittelu ja toteutus	10
4.1	Suunnittelu	10
4.2	Virtausmittarin kokeilu	15
5	Yhteenveto	25
	Lähteet	26
	Testiohjelman käyttöliittymä	28
	Liitteet	
	Liite1: Testiohjelman käyttöliittymä	

# 1 Johdanto

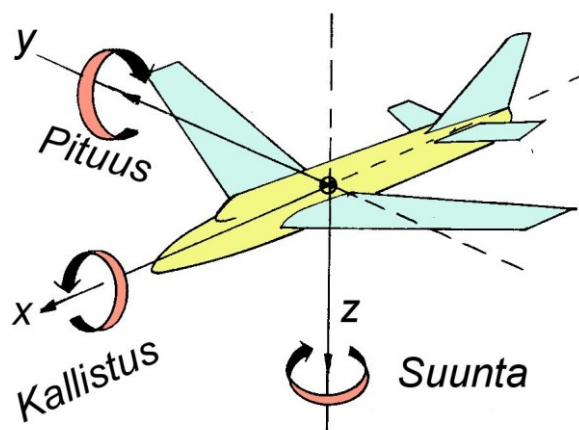
Opinnäytetyö tehdään Finnair Technical Services Oy:lle. Finnair Technical Services Oy korjaa Airbus A320, A330 ja A350, Embraer 170 ja 190, sekä ATR 42 ja 72-matkustajalentokoneiden komponentteja. Korjaustoiminta ja -tilat sijoittuvat Helsinki-Vantaan lentoasemalle. Finnair Technical Services Oy korjaa ja huoltaa komponentteja pyörä- ja jarru-, akku-, hätälaite-, komposiitti- ja levy-, uuni- ja kahvinkeitin-, sekä hydraulikkakorjaamoilla. [1.]

Opinnäytetyön tavoitteena on parantaa lentokoneen lennonohjausjärjestelmän servoventtiilien virtausmittausta. Parannusta toivottiin virtausmittarin toimintavarmuuden, mittauskapasiteetin sekä tarkkuuden kasvattamiseksi. Tavoitteena on löytää ja ottaa käyttöön vaihtoehtoinen virtausmittausmenetelmä, jolla voitaisiin korvata vanha systeemi.

## 2 Lennonohjausjärjestelmä

### 2.1 Hydraulinen lennonohjausjärjestelmä

Lennonohjausjärjestelmä tarkoittaa niiden laitteiden muodostamaa kokonaisuutta, joilla lentäjä ohjaa lentokoneen suuntaa ja korkeutta. Lennonohjausjärjestelmä on jaettu kahteen ryhmään: ensi- ja toissijaiseen järjestelmään. Ensijaista järjestelmää lentäjä tarvitsee lentokoneen turvalliseen operointiin ilmassa. Toissijainen eli sekundäärinen järjestelmä parantaa lentokoneen suorituskykyä ilmassa ja keventää sen liikkeitä. [2.]

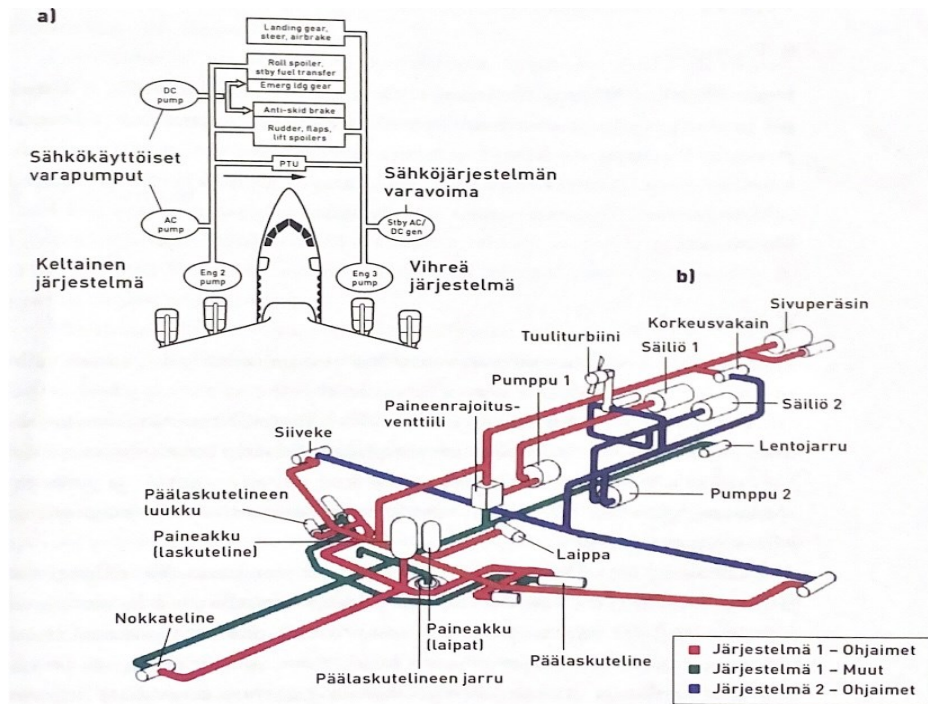


Kuva 1. Lentokoneen vakavuusakselit [13].

Lentokone liikkuu kolmen akselin ympäri kääntymällä. Nämä akselit ovat kallistus-, pituus- ja suunta-akselit, kuten kuvassa 1. Näiden akseleiden liikkeitä hallitaan ensisijaisella ohjausjärjestelmällä, jossa kallistussiivekkeet ohjaavat pyörimisliikettä kallistusakselin ympäri, korkeusperäsin pituusakselin ja sivuperäsin ohjaa suunta-akselin ympäri tapahtuvaa pyörimisliikettä. [2.]

Yksinkertaiset ja vanhimmat lennonohjausjärjestelmät, joita käytettiin varhaisissa konetyypeissä, olivat mekaanisia järjestelmiä, joissa ohjainpintoja käännettiin vaijerien ja ketjujen välityksellä. Moderneissa nopeammissa ja suuremmissa lentokoneissa aerodynaamiset voimat käyvät niin suuriksi, että perinteinen mekaaninen järjestelmä ei riitä. Näissä käytetään hydraulisia lennonohjausjärjestelmiä. [2.]

Lentokoneen hydraulijärjestelmä koostuu hydraulisäiliöstä, hydraulipumpusta, erilaisista venttiileistä, paineakuista, sylintereistä ja hydrauliputkistosta. Lisäksi järjestelmään kuuluu myös suodattimia, liittimiä, tiivisteitä, sekä paine- ja määrämittareita. Hydraulijärjestelmän paine liikennelentokoneissa on tyypillisesti 3000 psi eli noin 207 baaria. [3, s.148–152.]



Kuva 2. Lentokoneen hydraulijärjestelmä [14].

Hydraulijärjestelmä on lentokoneen toiminnan kannalta kriittinen. Siksi hydraulijärjestelmät on usein kaksinkertaistettu, eli jaettu kahteen linjaan, joilla molemmilla on omat hydraulipumppunsa. Mikäli toiseen linjaan tulee vika, voidaan lentokonetta vielä operoida toisella järjestelmällä. Kaksi erillistä hydraulilinjaa lisää putkien ja muiden komponenttien määrää, joka havainnollistuu kuvassa 2. [3, s.148–152.]

## 2.2 Ohjainpinnat

### Korkeusvakaaja



Kuva 3. Lentokoneen korkeusvakaaja [15].

Lentokoneen kohtauskulmaa muutetaan kääntämällä korkeusperäsintä. Korkeusperäsimet sijaitsevat tavanomaisella pyrstöllä varustetuissa lentokoneissa pyrstön korkeusvakaimien takaosassa (kuva 3). Mikäli korkeusvakaimessa ei ole erillistä korkeusperäsintä, ohjaus toteutetaan kääntämällä koko korkeusvakainta. Tätä kutsutaan pendel-peräsimeksi. Korkeusperäsimen kulman kasvattaminen lisää korkeusvakaimen käyritystä ja siten sen nostovoimaa. Kun peräsintä on käännetty alaspäin, peräsinkulma määritellään positiiviseksi. [4, s.152.]

Korkeusvakaimen nostovoima on suoraan verrannollinen peräsimen kulman muutokseen aina 20 asteeseen asti. Tämän kulman jälkeen nostovoiman muutos ei enää ole niin suuri. Maksimi nostovoima saavutetaan peräsimen 30–40 asteen kulmalla. Usein lentokoneissa suurin käytettävä peräsinkulma on noin 25 astetta. [4, s.152.]

## Sivuperäsin



Kuva 4. Matkustajalentokoneen sivuperäsin [16].

Sivuperäsin sijaitsee lentokoneen sivuvakaimen takaosassa, joka on merkitty kuvassa 4 punaisella nuolella. Aivan kuten korkeusperäsin, myös sivuperäsin on saranoitu ja sitä kääntämällä muutetaan lentokoneen kulmaa lennon aikana. Sivuperäsimen kääntäminen aiheuttaa vakaimen kohdistuvan poikittaisvoiman, joka vaikuttaa lentokoneen nokkaa oikealle, tai vasemmalle kiertävään momenttiin. Tätä momenttia kutsutaan suuntamomentiksi. Sivuvakain sijaitsee tyypillisesti lentokoneen painopisteen yläpuolella, jolloin sivuperäsimen kulman muuttaminen vaikuttaa myös ei-toivotusti koneen kallistusmomenttiin. [4, s.155.]

Korkeus- ja sivuvakaimen muodostamaa kokonaisuutta kutsutaan lentokoneen pyrstöksi. Tavanomaisessa pyrstössä korkeus- ja sivuvakaimet ovat erikseen, mutta on olemassa myös esimerkiksi T-pyrstö, jossa korkeusvakain on sivuvakaimen yläpuolella muodostaen pyrstöstä T-kirjaimen muotoisen. [4, s.155.]

## Kallistussiivekkeet ja spoilerit



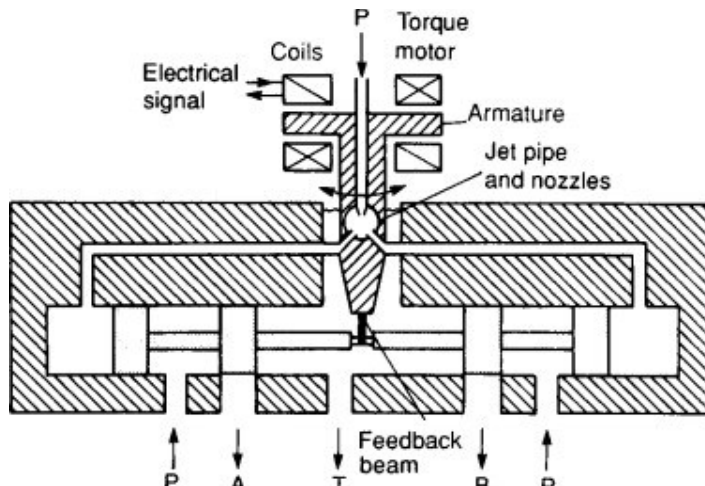
Kuva 5. Matkustajalentokoneen vakaajat ja spoilerit [17].

Lentokoneen siipien jättöreunoilla, eli siipien takaosissa sijaitsevat kallistussiivekkeet (kuva 5). Siivekkeitä epäsymmetrisesti kääntämällä saadaan muutettua lentokoneen siipien nostovoimaa. Siipien puolikkaiden nostovoiman muuttuessa epäsymmetrisesti, lentokone saadaan kääntymään kallistusakselinsa ympäri. Tehokkain muutos nostovoimaan saadaan, kun siiven kärjessä olevaa siivekettä käännetään. Tällöin voiman vaikutuspiste on kauimpana pituusakselista. Ylöspäin nostettavassa siivessä siivekettä käännetään alaspäin ja alaspäin käännettävässä siivessä ylöspäin. [4, s. 156–157.]

Siivekkeiden käyttö aiheuttaa siivelle voimakasta vääntöä. Jos siipien rakenne mitoitettaisiin näille voimille, olisivat ne liian lujat ja painavat muita lentotiloja ajatellen. Tästä syystä erityisesti matkustajalentokoneissa käytetään kovissa nopeuksissa lähempänä koneen runkoa olevia siivekkeitä tai spoileriteita. Kun oikean siiven yläpinnalla olevaa spoileria avataan, se irrottaa virtausta siiven pinnalta vähentäen sen nostovoimaa. Tämän seurauksena lentokone alkaa kallistumaan oikealle, eli oikea siipi laskee. Kallistumisen lisäksi spoileri aiheuttaa ilmanvastusta, joka saa koneen kääntymään suuntaa oikealle. [4, s. 156–157.]

## 2.3 Sähköhydrauliset servoventtiilit

Sähköhydraulisten servoventtiilien, toisin sanoen servoventtiilien toiminta perustuu sähkömagneetilla toimivaan vääntömoottoriin, joka on verrannollinen sen kelan läpi kulkevaan sähkövirtaan. Servoventtiilit käyttävät usein mekaanista takaisinkytkentää tarkan ohjauksen takaamiseksi. [5.]



Kuva 6. Sähköhydraulinen servoventtiili mekaanisella takaisinkytkennällä [18].

Tässä opinnäytetyössä keskitytään suihkuputkella toimiviin servoventtiileihin (Jet pipe servo). Tämän tyyppisessä servoventtiilissä venttiilille tuleva virtaus ohjataan vääntömoottorilla kääntyvän suihkuputken kautta venttiilin pääluistille. Suihkuputken liike aiheuttaa paine-eron pääluistin päätyjen välillä, jolloin luisti liikkuu korkeasta paineesta matalan paineen suuntaan. Kun suihkuputki palautetaan niin kutsuttuun nolla-asentoon, ohjautuu luistin päätyihin sama määrä painetta, jolloin luisti palaa keskelle. [5.]

Suihkuputkella toimivia servoventtiileitä käytetään paljon niin matkustajalentokoneiden, kuin hävittäjienkin toimilaitteiden ohjauksessa niiden vikasietoisuuden vuoksi. Esimerkiksi F-18 -hävittäjän vakaajan toimilaitteessa käytetään kahta yksivaiheista servoventtiiliä. Servoventtiilien rinnakkainkytkentä muodostaa luotettavan ohjauksen toimilaitteelle. Vaikka yksi suihkuputkista vikaantuisi, voi järjestelmä silti toimia luotettavasti. Lisäksi toimilaitteelle on asennettu vielä vikaanturi. [5.]

## 3 Virtausmittaus

### 3.1 Virtausmittarit

Virtausmittauksella tarkoitetaan nesteen, ilman tai kaasun määrän mittaamista putkessa tai kanavassa. Virtausta voidaan mitata joko massa- tai tilavuusvirtauksena. Massavirtauksella tarkoitetaan sitä, miten monta molekyyliä kulkee mittarin läpi. Massavirtausta voidaan ilmaista esimerkiksi yksiköllä kilogrammaa sekunnissa. Tilavuusvirtaus on standardoidumpi mittaustapa. Tilavuusvirtauksen mittaus perustuu sen tilan mittaamiseen, jonka mitattava aine vie kulkiesaan virtausmittarin läpi. Tilavuusvirtausta kutsutaan myös todelliseksi virtausnopeudeksi. [6.]

Erilaisia virtauksen mittaustapoja on lukuisia, mutta tässä opinnäytetyössä keskitytään pieniin virtauksiin. Nesteen pieniin virtauksiin sopivia virtausmittareita ovat muun muassa PDQ-, turbiini- ja ratasvirtausmittarit.

#### PDQ

PDQ-virtausmittari, eli Positive displacement flowmeter koostuu kahdesta osasta; nesteen virtauksen mittaussyksiköstä (FMU, Flow Measuring Unit), sekä elektronisesta luku / hallintayksiköstä (RCU, Read/Control Unit). PDQ- mittarit on suunniteltu korkealle paineelle, kuten hydraulijärjestelmiin. Ne kestävät helposti jopa 5000 psiin paineet. PDQ- virtausmittarin toiminta perustuu sylinterin liikkeeseen virtauksen mittaussyksikössä. Lukuyksikkö lukee sylinterin liikkeen pituuden ja muuntaa sen tilavuusvirtauksen yksiköksi, esimerkiksi litraa per minuutti. [7.]

#### Turbiini

Turbiinivirtausmittarilla mitataan nesteen tilavuusvirtausta. Mittarin läpi virtaava neste pyörittää massallaan roottoria, jonka pyörimisnopeus täten on verrannollinen nesteen virtausnopeuteen. Roottori on tuettuna laakereilla turbiinivirtausmit-

tarin runkoon, kuten kuvassa 7 näkyy. Mittarin ulkopuolelle sijoitettu magneettinen käämi tuottaa roottorin lapojen nopeutta vastaavan jännitteen. Jokainen roottorin lavan aiheuttama pulssi vastaa erikseen määriteltyä nestetilavuutta. Turbiinimittarin etuja ovat sen kohtuulliset hankinta- ja asennuskustannukset ja luotettavuus. Huonoja puolia ovat laakereiden kuluminen, ja se, että turbiinivirtausmittari koostuu todella pienistä osista, jolloin nesteen puhtaus on tärkeässä roolissa. Pienetkin epäpuhtaudet voivat vaikuttaa mittarin toimintaa. [8.]



Kuva 7. Trigas DML -virtausmittari [19].

### 3.2 Nesteen viskositeetti

Viskositeetti on suure, joka mittaa nesteen tai kaasun liikkeen vastustuskykyä. Viskositeetti on täten nesteen juoksevuuden vastakohta. Nesteen viskositeettia voidaan kuvailla nesteen paksuudeksi: esimerkiksi siirappi on paksumpaa kuin vesi, ja täten siirapilla on korkeampi viskositeetti kuin vedellä. Virtaamaan pakotetun nesteen molekyylien välillä on kitkaa, joka vastustaa molekyylien liikettä toisiinsa nähden. Mitä enemmän näiden molekyylien välillä on kitkaa, sitä suurempi on aineen viskositeetti. Nesteen viskositeetti on yksi tärkeimmistä tekijöistä mikä pitää ottaa huomioon virtausmittauksessa. Viskositeetti määrittää, että kuinka paljon voimaa tarvitaan, jotta neste saadaan liikkumaan. Nesteen viskositeettiin vaikuttaa sen lämpötila. Nesteen lämmitessä sen viskositeetti laskee, ja viiletessä viskositeetti kasvaa. Kaasuilla tämä menee päinvastoin;

lämpötilan noustessa myös viskositeetti kasvaa. [9.] Esimerkiksi veden viskositeetti 10-asteisena on 1,308 mPa\*s, kun taas 100-asteisena 0,2822 mPa\*s.

#### Lämpötilakompensointi

Lämpötilakompensoinnilla pyritään torjumaan ei-toivotun lämpötilan muutoksen aiheuttamaa muutosta. Parhaimmillaan lämpötilakompensointi eliminoi kaikki lämpötilan vaikutukset mittaustekniikassa. [10.]

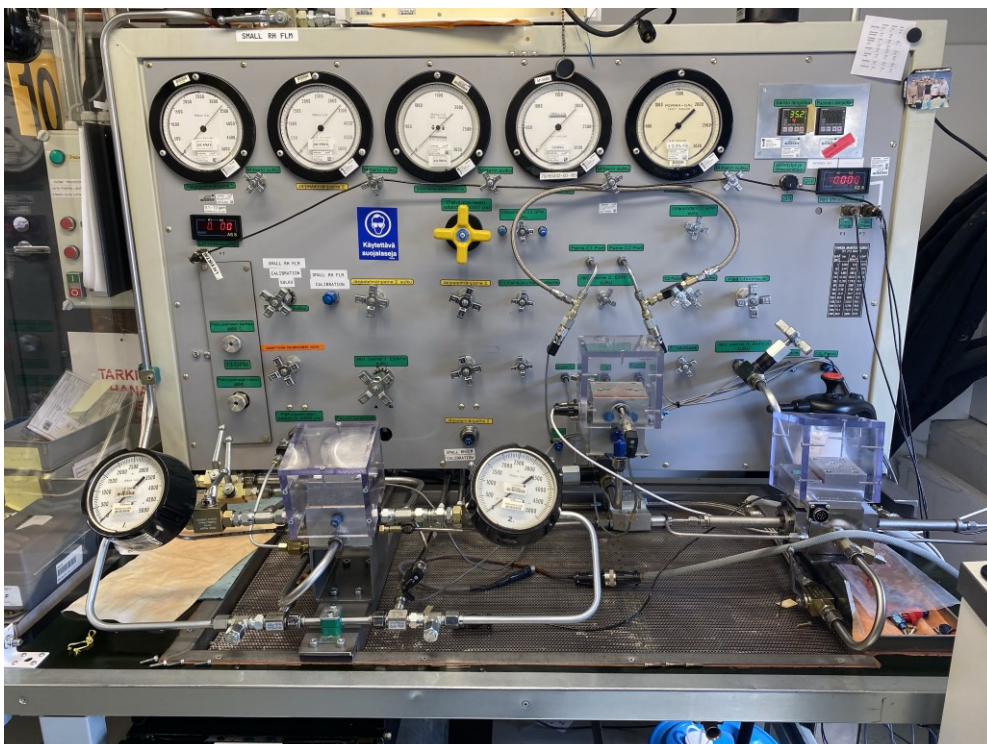
Nesteiden lämpötilojen muuttuessa niiden viskositeetti muuttuu. Tästä syystä virtausmittauksessa tarvitaan joskus lämpötilakompensaatiota.

## **4 Virtausmittauksen suunnittelu ja toteutus**

### 4.1 Suunnittelu

Virtausmittauksen päivityksen tarkoituksena oli saada tarkempaa mittaustietoa ja varmistaa virtausmittarin huolto- ja toimintavarmuus. Kuvassa 8 näkyvässä servoventtiilien testiasemassa oleva vanha PDQ-tyyppinen virtausmittari tuli korvata uudella tekniikalla, joka on tarkempaa ja johon on tarvittaessa saatavissa teknistä tukea.

Suunnitteluprosessi aloitettiin tarpeiden kartoittamisella. Projektin tavoitteena oli parantaa virtausmittauksen toimintavarmuutta ja tarkkuutta. Tarkemmalla virtausmittauksella parannetaan testattavien servoventtiilien laatua ja toimintavarmuutta. Mitoittamalla uuden virtausmittarin toiminta-alue mitattavan virtauksen mukaan parannetaan mittauksen tarkkuutta.



Kuva 8. Servoventtiilien testausasema.

### Virtausmittarin valinta ja hankinta

Virtausmittaria valittaessa tulee ottaa huomioon seikkoja mitattavasta aineesta, mittaussympäristöstä, mittarin ominaisuuksista, asennuksesta ja kustannuksista.

Mitattavasta aineesta tulee selvittää seuraavat asiat:

- aineen tyyppi, eli onko kyseessä esimerkiksi neste tai kaasu
- maksimivirtaus
- käyttöpaine
- tiheys
- viskositeetti
- suhteellinen kosteus.

Mittausympäristöstä selvitetään seuraavat asiat:

- lämpötila
- ilmanpaine
- kosteus
- mekaaniset ja sähköiset häiriöt
- turvallisuusmääräykset.

Virtausmittarin valintakriteerit ovat:

- tarkkuus
- toistettavuus
- mittausalue
- paineenalenema
- vasteaika
- lähtöjen yhteensopivuus muun testilaitteiston kanssa.


Asennuksessa huomioon otettavat seikat:

- virtausmittarin koko ja liittimien tyyppi
- mittarin asento (esimerkiksi pysty- tai vaaka-asennus)
- putkisto mittarille ja pois mittarilta
- matka mekaanisille häiriöille, kuten venttiileille ja putken käännöksille
- sähköliittimet
- esteetön pääsy asennusta ja huoltamista varten

- suodatin [11.].

Virtausalue, jota servoventtiileistä mitataan, on 0–0,150 gallonaa minuutissa (GPM), joka on noin 0,57 litraa minuutissa (l/min). Servoventtiilit ohjaavat hydraulisia toimilaitteita kahteen suuntaan, eli virtaustakin tulee siis mitata molempiin suuntiin. Yhdessä pieni virtaus ja mittaaminen nesteen liikkeessä eri suuntiin tuotti haasteita virtausmittarin valinnassa ja rajasi useita vaihtoehtoja pois.

Virtausmittareiden vaihtoehtojen rajauduttua virtausmittariksi valikoitui Trigas DML1.0 Pelton Wheel Extended Range. Kyseessä on Pelton-turbiinitekniikalla varustettu virtausmittari, jonka mitta-alue vakiona on 30,3–303 millilitraa minuutissa. Extended Range -optiolla virtausmittarin minimivirtaus saatiin pienennettyä 30,3 millilitrasta 11 millilitraan minuutissa, ja maksimivirtaus kasvoi tällä optiolla 303 millilitrasta 605 millilitraan minuutissa. TrigasDML-virtausmittarin optiot näkyvät kuvassa 9. 11 ml/min on noin 0,003 gallonaa minuutissa, ja 605 ml/min on noin 0,16 gallonaa minuutissa.

 <b>Model</b>	<b>Standard Range</b>		<b>Extended Range</b>		<b>K-Factor<sup>1)</sup></b>	<b>max. Frequency<sup>1)</sup></b>
	<b>ml/min</b>		<b>ml/min</b>			
	<b>min.</b>	<b>max.</b>	<b>min.</b>	<b>max.</b>	<b>Pulse/ml</b>	<b>Hz</b>
<b>DML0.6</b>	7,57	75,7	3,8	303	211	270
<b>DML1.0</b>	30,3	303	11	605	119	600
<b>DML2.0</b>	94,6	946	38	1514	48	750
<b>DML4.0</b>	302,8	3028	76	4920	15	650
<b>DML5.0</b>	567,7	5677	189	7570	9	825

Kuva 9. TrigasDML -virtausmittarin tiedot [20].

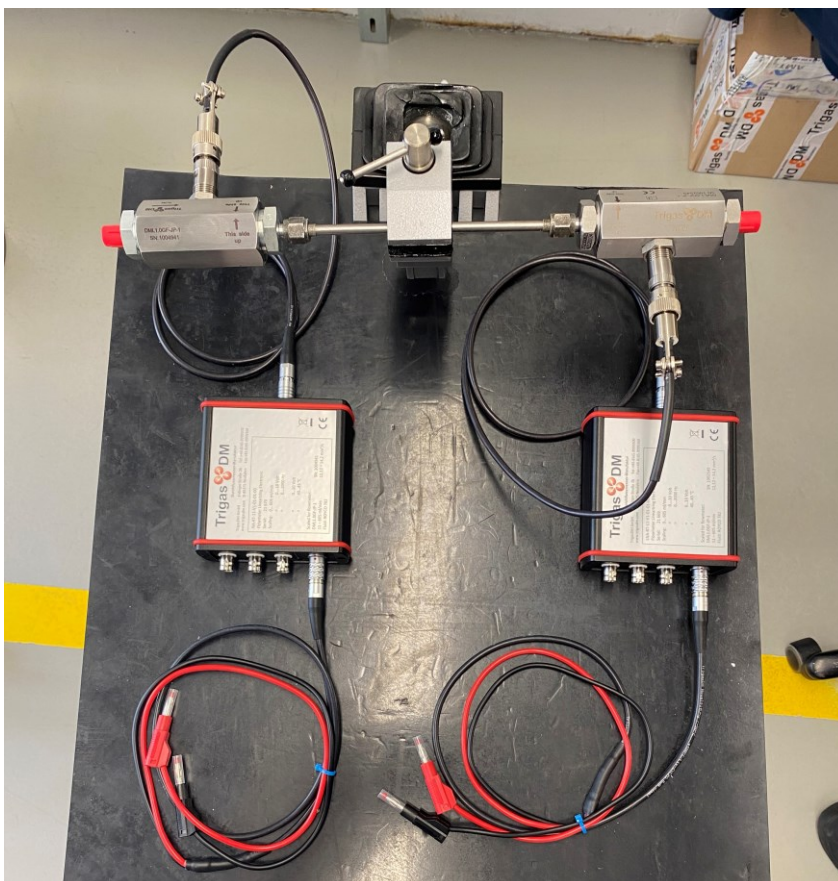
Servoventtiilien virtausmittauksessa virtausta mitataan molempiin suuntiin, mutta turbiinivirtausmittarit on suunniteltu yksisuuntaiseen virtauksen mittaamiseen. Vaikka virtausmittarilta saadaankin lukemaa molempiin suuntiin, on se kalibroitu vain toiseen suuntaan, ja valmistaja ei voi taata lukemien oikeellisuutta virtauksen ollessa väärään suuntaan. Tämä ongelma ratkaistiin tilaamalla kaksi virtausmittaria, jotka asennetaan vastakkain samaan linjaan, jolloin virtausmittareilta luetaan aina positiivista lukemaa.



Kuva 10. Trigas -virtausmittarin signaalimuunnin.

Virtausmittareiden mukana tulleilla signaalimuuntimilla (kuva 10) muunnetaan virtausmittareilta tulevaa pulssisignaalia jännitesignaaliksi. Jännitealue, jolla muunnin lähettää signaalin, on 0–10 V. Signaalimuuntimet vaativat erillisen virtalähteen, joka lopullista asennusta varten löytyy jo testausaseman tietokoneesta.

Trigas DML1.0 -virtausmittari soveltuu erinomaisesti korvaamaan vanhaa mitaustekniikkaa myös pienen kokonsa ansiosta. Vanha PDQ -mittari vei paljon tilaa testiasemasta, ja sen poistuttua ei tulisi olemaan vaikeuksia mahduttaa uutta turbiinivirtausmittaria sen tilalle. Kuvassa 11 havainnollistuu Trigas DML1.0 -virtausmittarin kompakti koko.



Kuva 11. Trigas DML1.0 -virtausmittarit asennettuna vastakkain.

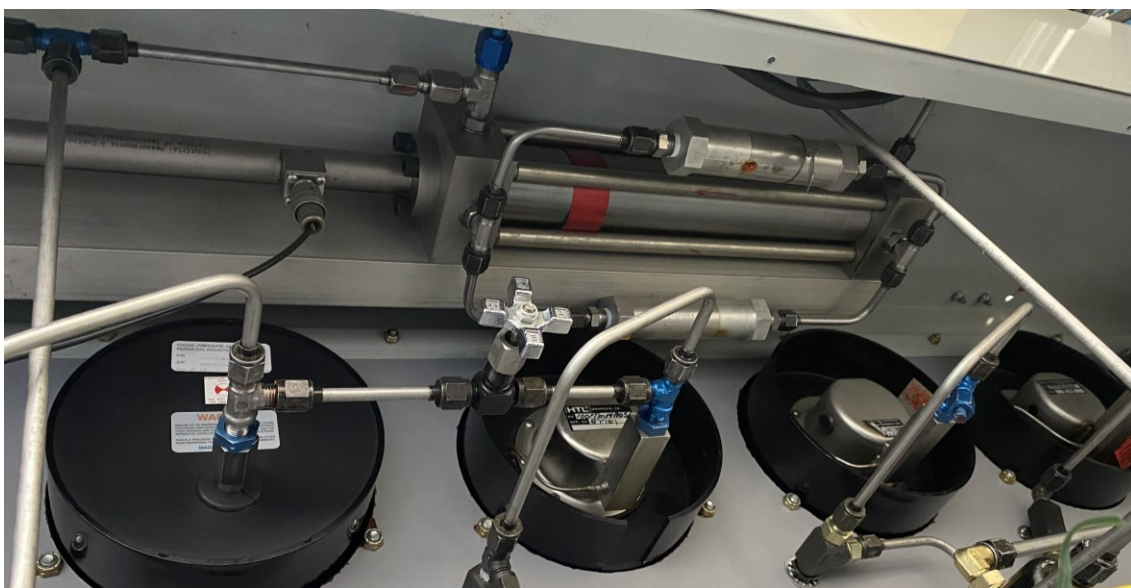
## 4.2 Virtausmittarin kokeilu

Ennen vanhan virtausmittarin purkaa ja uusien turbiinivirtausmittareiden lopullista asennusta tulee uuden virtausmittauksen onnistuminen todeta käytännössä. Tällä vältetään turha asennus, jos uusi virtausmittaus ei jostain syystä toimikkaan. Mikäli uusi virtausmittaus todetaan toimivaksi, voidaan vanha virtausmittari purkaa ja asentaa uudet tilalle lopullisesti.

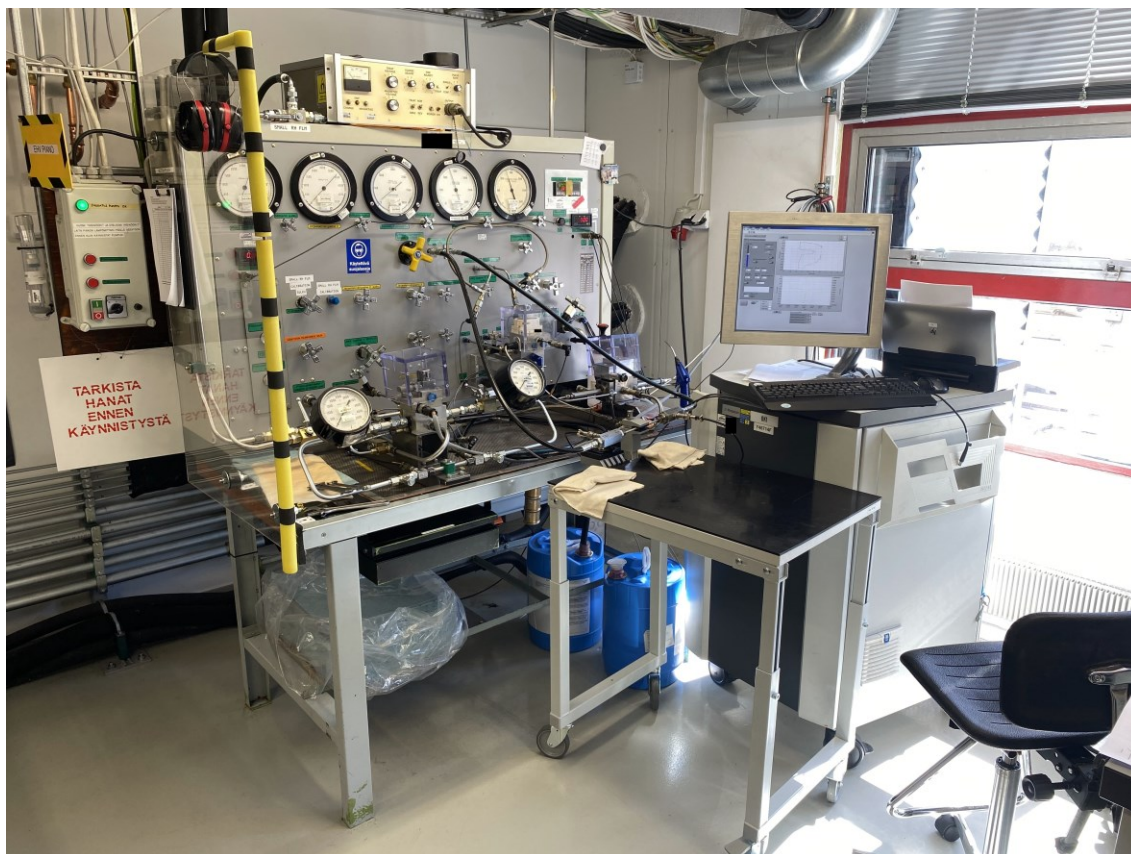
### Virtausmittarin asennus

Kuvassa 11 virtausmittarit ovat asennettuna liikuteltavaan pöytään siten, että ne on helppo kytkeä servoventtiilien testiasemaan hydrauliletkuilla. Kokeiluvaiheessa virtausmittarit asennetaan testiasemaan niin, ettei vanhaa PDQ-virtausmittaria tarvitse purkaa pois, vaan se voidaan jättää paikoilleen myös kokeilun

ajaksi. PDQ-virtausmittari sijaitsee kuvassa 12 näkyvän servoventtiilien testi-  
aseman sisäpuolella oikeassa yläkulmassa. Servoventtiililtä PDQ-virtausmitta-  
rille tulevasta putkista tehtiin läpiviennit testerin etupuolelle, josta saatiin otettua  
virtaus kiertämään uusien Trigas -virtausmittarien kautta vanhalle PDQ-virtaus-  
mittarille. Näin saatiin luotua testausympäristö uusille virtausmittareille siten,  
että vanha virtausmittari voitiin jättää paikalleen, ja sitä pystyttiin myös lukea sa-  
maan aikaan kun uusia testattiin. Koko testausasennus näkyy kuvassa 13.

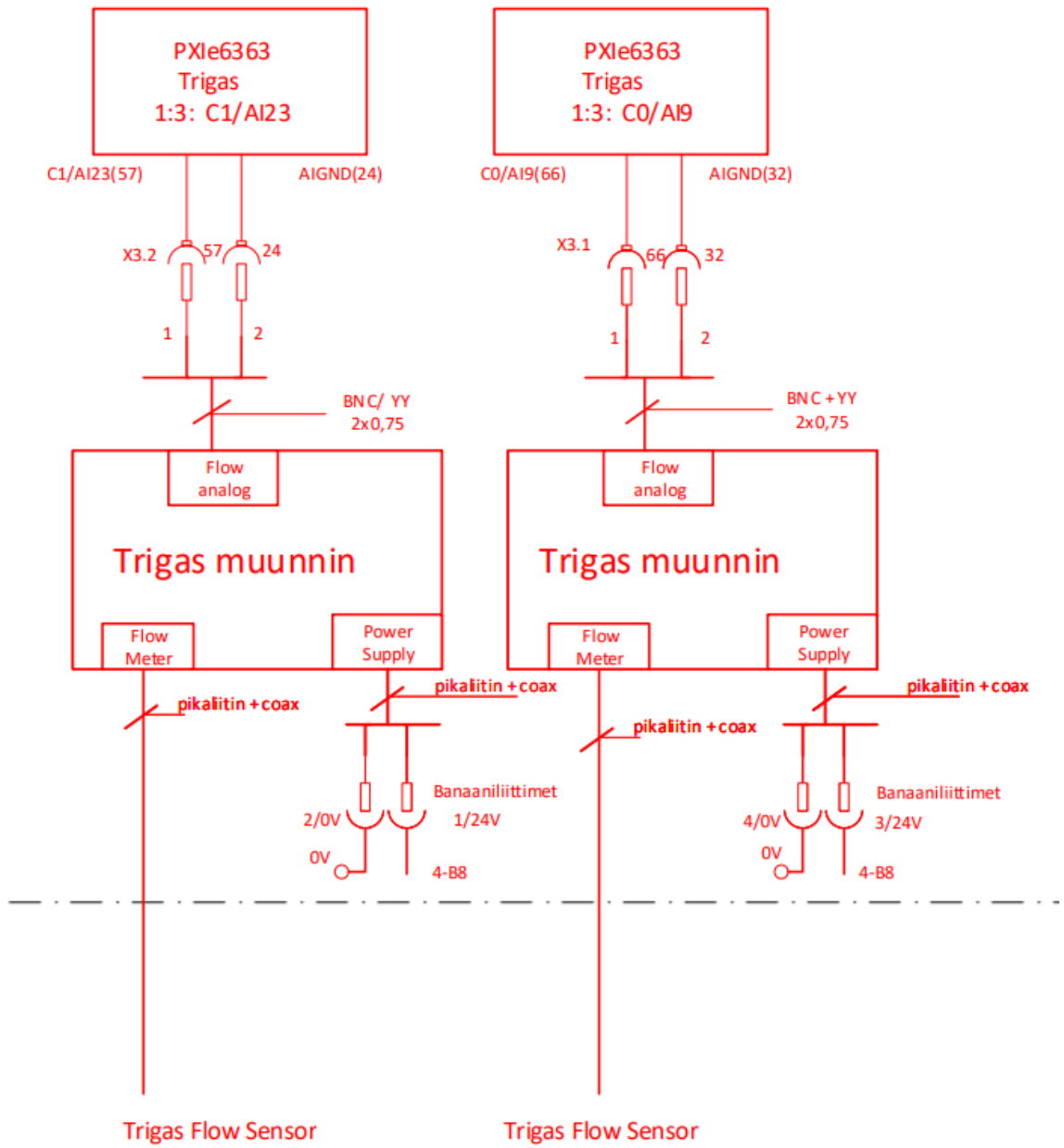


Kuva 12. PDQ-virtausmittari servoventtiilien testiaseman sisällä.



Kuva 13. Virtausmittareiden kokeilu.

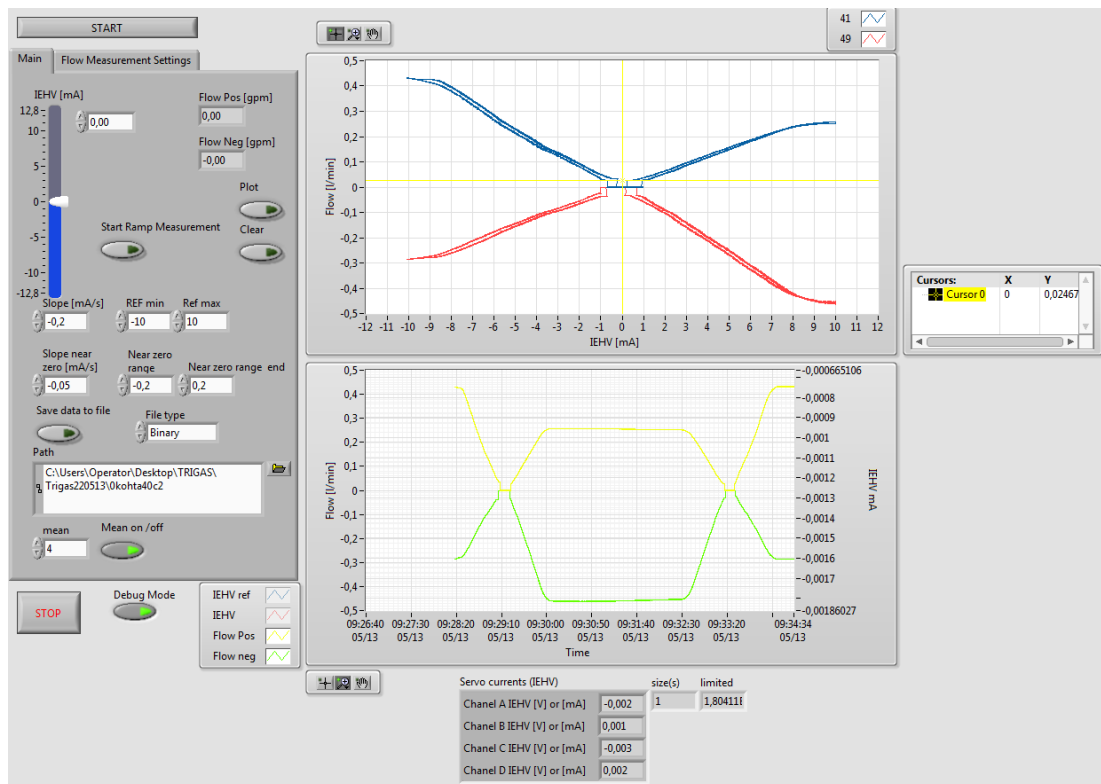
Trigas-virtausmittareilta lähtevät johdot yhdistettiin signaalivahvistimien kautta testiaseman tietokoneen vapaana oleviin riviliittimiin. Signaalimuuntimet vaativat ulkoisen 6–36 V:n tasajännitteen, joka otettiin erillisellä virtalähteellä kokeiluvaiheessa. Virtalähde löytyi valmiiksi asennettuna tietokoneesta. Signaalimuuntimet sisälsivät valmiiksi myös lämpötilakompensoinnin, joka oli tehtaalla kalibroitu mittauksissa käytettävän hydraulinesteen tiedoilla. Asennuksen kytkentäkaavio on kuvassa 14.



Kuva 14. Trigas-virtausmittarien kytkentäkaavio.

## Testerin ohjelmointi

Kokeiluvaiheessa testausaseman ohjaustietokoneelle tarvittiin testausohjelma, jolla voitaisiin todeta virtausmittareiden soveltuvuus käytännössä. Valmis testiohjelma löytyi jo ennestään, joten se tuli muokata uusille virtausmittareille sopivaksi. Kuvassa 15 näkyy testiohjelman Front Panel. Testerissä käytetään Labview -ohjelmointiympäristöä.

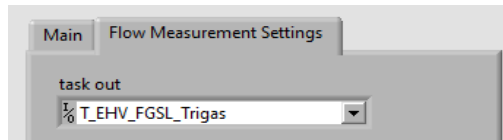


Kuva 15. Testausohjelman Front Panel.

Virtausmittareille luotiin ensin task NI MAXissa kopiaimalla vanhojen virtausmittareiden kanavat. Virtausmittauksissa on aiemmin käytetty gallonaa minuutissa -mittayksikköä, mutta virtausmittareiden valmistaja ilmoitti skaalat litraa minuutissa -yksikkönä, joten tässä tapauksessa päädyttiin selkeyden vuoksi käyttämään myös l/min -yksikköä. Uusien virtausmittareiden skaalaukset syötettiin NI MAXiin luomalla niille kokonaan uudet skaalat. Virtausmittareiden virtausalue oli 0-605 ml/min ja signaalin jännite 0-10V, eli 0 ml/min = 0 V, ja 605 ml/min = 10V. Skaalaus oli Table Scale -tyyppinen eli ei-lineaarinen, joka tarkoittaa sitä, että

0–10 V:n väliltä oli virtausmittareiden valmistajan toimesta kalibroitu 13 pistettä, joiden jännite ja virtaus syötettiin NI MAX:in skaalaukseen.

Taskin valinta tuotiin testiohjelman front paneliin, jotta sitä olisi jatkossa helpompi vaihtaa kesken kokeilun, mikäli haluttaisiin vaihtaa johonkin toiseen virtausmittariin (kuva 16).



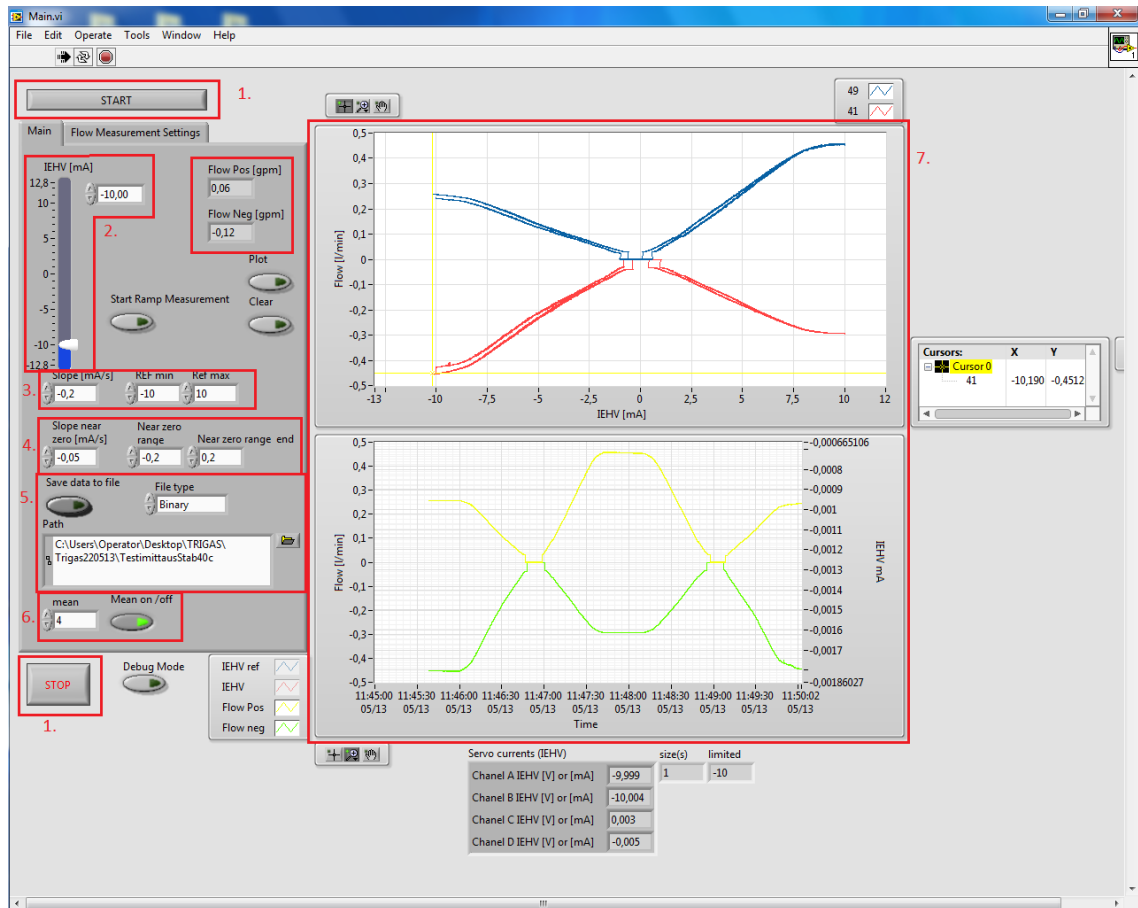
Kuva 16. Task out -alasvetovalikko.

Lopullisesta testiohjelmasta löytyivät seuraavat perustoiminnot:

1. ohjelman käynnistys- ja pysäytysnappi
2. servoventtiin ohjausvirran säätö joko syöttämällä haluttu arvo tai liu'uttamalla valitsinta
3. Ramp-ajo eli venttiin ohjaaminen automaattisesti annetusta arvosta toiseen annettuun arvoon
4. Ramp-ajon hidastus nollakohdan lähellä
5. datan tallennustoiminto
6. mittaustuloksen keskiarvotus, joka ottaa 1000 Hz:n näytteenottotaajuudella neljän näytteen keskiarvon.
7. virtauksen käyrät suhteessa syötettyyn virtaan ja kuluneeseen aikaan.

Listan numerointien sijainnit näkyvät kuvassa 17.

Lisäksi ohjelmasta löytyivät taskin valinta -alasvetovalikko, debug mode sekä mitatut servovirrat. Mittaukset saatiin suoritettua käyttäen ainoastaan perustoimintoja, joten näille toiminnoille ei testimittausten aikana ollut käyttöä.



Kuva 17. Front panel numeroiduilla toiminnoilla.

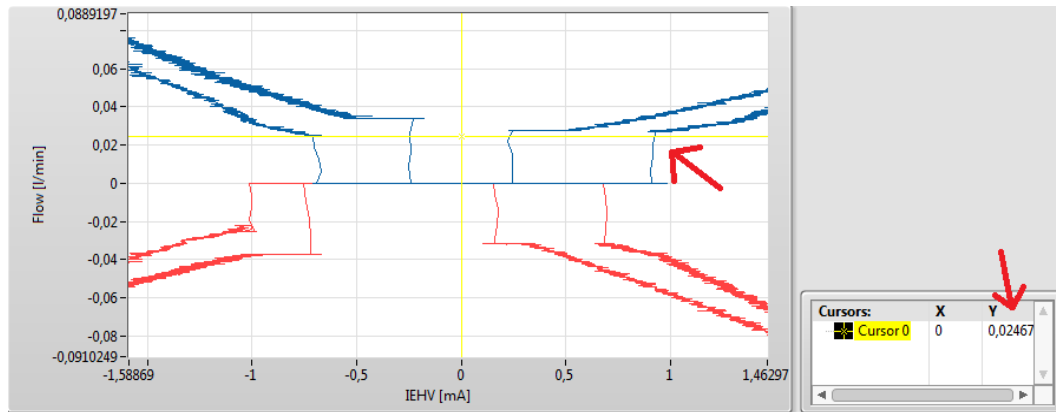
## Kokeilu

Testerin testiohjelman muokkaamisen ja virtausmittareiden asentamisen jälkeen käytännön kokeilu voitiin aloittaa. Kokeilun tavoitteena oli varmistaa Trigas vir-  
tausmittareiden tarkkuus vertaamalla niistä saatavaa lukemaa reaaliaikaisesti  
vanhasta PDQ-virtausmittarista saatavaan lukemaan. Molemmista virtausmitta-  
reista otettiin viisi lukemaa positiiviseen- ja negatiiviseen virtaussuuntaan (tau-  
lukko 1). Tässä testissä saatu tulos oli toivottu. Pientä eroa vanhan ja uusien  
virtausmittareiden välillä oli, mutta nämäkin pienet erot tasoittuisivat Trigas-vir-  
tasumittareiden lopullisen asennuksen ja kalibroinnin jälkeen.

Taulukko 1. PDQ- ja Trigas-virtausmittareiden vertailutulokset.

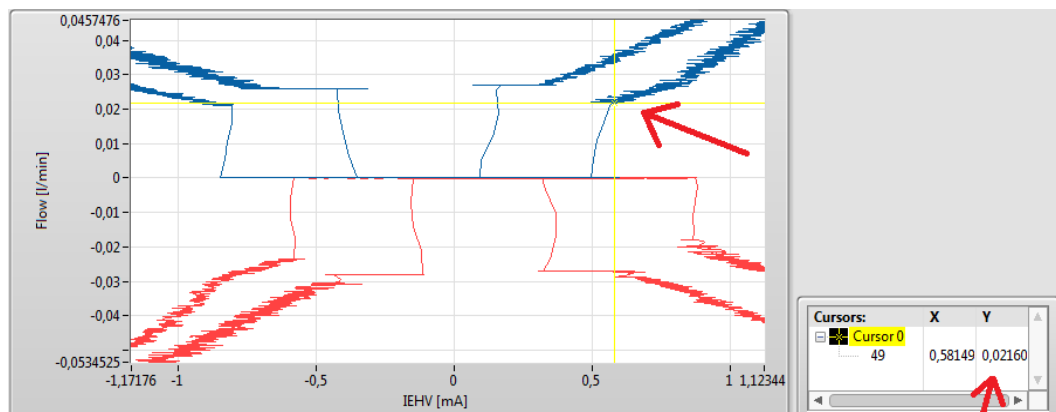
Servovirta	PDQ ml/min	Trigas ml/min
10	454,25	461,82
8	435,32	416,4
5	276,34	253,62
3	158,99	147,63
1	56,78	42,78
0	0	0
-1	41,64	45,42
-3	136,27	132,49
-5	237,7	230,49
-8	412,61	393,91
-10	458,03	442,89

Servoventtiilien virtausmittauksen kanssa haastavimmaksi osoittautui virtauksen mittaaminen nollan lähellä, sekä virtauksen suunnanmuutos. Trigas ilmoittama minimivirtaus, eli alin virtausmäärä, jota mittarilla voidaan mitata, on 11 ml/min. Kuvissa 18 ja 19 näkyy sininen ja punainen kuvaaja, jotka kuvaavat vastakkain asennettujen virtausmittareiden mittaustuloksia. Kuten kuvista voi päätellä, sinisellä kuvaajalla varustetulla mittarilla päästiin hiukan matalammille virtauksille, kuin punaisella, ja siksi testin tulokset otettiin siltä. Mittaukset aloitettiin 30°C lämpöisellä hydraulioöljyllä, jonka mittaustulos näkyy kuvassa 18. Trigas virtausmittarin alin mittaama arvo 30 celsiusasteen lämpöisillä nesteillä oli 24,67 ml/min.



Kuva 18. Matalin virtaus nesteen ollessa 30°C.

Seuraavaksi kokeilussa nostettiin nesteen lämpötilaa 40 asteeseen celsiusista. Lämpötilan nostamisella saatiin hieman parannettua tulosta, mutta ei kuitenkaan riittävästi. Kuvassa 19 näkyy alin mitattu arvo nesteen lämpötilan ollessa 40°C, eli 21,6 ml/min.



Kuva 19. Matalin virtaus nesteen ollessa 40°C.

Alin mitattu tulos 21,6 ml/min ei riitä tarkkuudeltaan servoventtiilien virtausmittauksessa. Mittarin tulisi ihannetilanteessa mitata tarkasti nolasta alkaen, mutta saatavilla olevissa turbiinivirtausmittareissa mittauksen skaalan yläpää laskee roimasti mittarin mennessä tarkemmaksi, jolloin sen kapasiteetti mitata yläpään virtauksia ei riitä.

Nollakohdan lähellä alueella, jolla Trigas-virtausmittarit eivät pysty mittaamaan virtausta, voitaisiin mittaustulokset laskea lineaarisen interpolointimenetelmän avulla. Lineaarinen interpolointi tarkoittaa sitä, että kahden tietyn arvon väliltä

voidaan määrittää tuntemattoman arvon likiarvo. Menetelmä perustuu kolmioiden samankaltaisuuteen. Lineaarisen interpoloinnin yleinen yhtälö on:

$$y = y_0 + (y_1 - y_0) * [(x - x_0) \div (x_1 - x_0)]. [12]$$

Lineaarinen interpolointi on tuntemattoman arvon laskennallista arviointia. Se tarkoittaa, että tulosta ei voida pitää relevanttina mittaustuloksena. Jos mitattavan servoventtiilin virtauksessa tapahtuu kohinaa tai muuta häiriötä juuri tuon mittaamattoman alueen sisällä, ei interpoloimalla sitä saada selville. Lennonohjausjärjestelmän komponentit, joihin servoventtiilit kuuluvat, ovat hyvin kriittisiä laitteita lentoturvallisuuden kannalta, ja tästä syystä ei mittaustuloksista voida lähteä laskemaan likiarvoa alueelle, jota ei voida varmaksi todeta.

Toisena haasteena virtausmittareiden kokeiluvaiheessa havaittiin virtauksen suunnanmuutos ja sen toteaminen. Kun virtausmittareita on asennettu kaksi vastakkain, tulee toiselta virtausmittarilta lukea tuloksia silloin, kun neste virtaa juuri sen mittarin kannalta oikeaan suuntaan. Suunnan muuttuessa tulee luettavaa virtausmittaria vaihtaa. Trigas- turbiinivirtausmittarit lähettävät tietokoneelle aina positiivista jännitesignaalia, vaikka turbiinin pyörimissuunta olisi väärä, eli negatiivinen. Tällöin ohjelmallisesti on mahdoton määrittää jännitesignaalin positiivisuuden tai negatiivisuuden kannalta, kumpi suunta on kyseessä. Yksi mahdollisuus olisi määrittää ohjelmallisesti, että kun venttiiliä ohjataan positiivisella sähkövirralla, luetaan toista virtausmittaria, ja kun negatiivisella, toista. Tässä kuitenkin ongelmaksi muodostuisi se, että jos mitattavan servoventtiilin nollakohta olisi pielessä, alkaisi testeri lukemaan oikeaa virtausmittaria joko liian aikaisin tai liian myöhään, riippuen kumpaan suuntaan servoventtiili on pielessä. Toisin sanoen tämä tapa toimisi vain täydellisillä venttiileillä.

## 5 Yhteenveto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli parantaa lennonohjausjärjestelmien servoventtiilien virtausmittausta. Tavoitteena oli parantaa mittauksen varmuutta, tarkkuutta ja mittauskapasiteettia. Näin olisi kasvatettu servoventtiilien laatua ja läpimenoaikaa entisestään.

Opinnäytetyö ei tarjonnut valmista ratkaisua lennonohjausjärjestelmän servoventtiilien virtausmittauksen parantamiselle. Haasteita tuli matkan varrella mittarin valinnan, tarkkuuden ja ohjelmallisten seikkojen puolesta. Suurimmat haasteet servoventtiilien virtauksien mittaamisessa ovat nollan lähellä virtauksen mittausta ja virtauksen suunnan muutos. Joillain virtausmittareilla pystytään mittaamaan hyvin tarkasti todella pieniä virtauksia, mutta niiden mittauskaala ei riitä korkeammissa virtauksissa.

Pienimpiä virtauksia, joita virtausmittareilla ei pysty lukea, voitaisiin interpoloida lineaarisesti. Lineaarinen interpolointi tarkoittaa, että kahdesta hyvin määritellystä arvosta voidaan päätellä niiden välissä olevat pisteet. Tämä ei kuitenkaan ole mittaamista, vaan päättelyä, josta johtuen sitä ei voida varsinkaan lentokoneollisuudessa laitteiden kriittisyyden vuoksi käyttää.

Toistaiseksi servoventtiilien virtausmittaus jatkuu vanhalla PDQ-virtausmittarilla. Uuden virtausmittarin tulisi pystyä mittaamaan tarkasti 0–600 ml/min virtauksia, ja sen tulisi indikoida pyörimissuuntansa tai jopa pystyä mittaamaan virtausta molempiin suuntiin. Tällöin virtausmittareita tarvittaisiin vain yksi, eikä suunnanmuutoksen toteaminen olisi ongelma.

## Lähteet

1. Finnair. 2022. Finnair Technical Services. Verkkoaineisto. <https://company.finnair.com/fi/technical-services>. Luettu 16.05.2022.
2. SKYbrary. Flight Controls. Verkkoaineisto. <https://skybrary.aero/articles/flight-controls>. Luettu 28.02.2022.
3. Hoffren, J. Saarela, O. 2008. Lentotekniikan perusteet. Helsinki: PunaMusta Oy. Luettu 13.3.2022.
4. Laine, S. Hoffren, J. Renko, K. 2006. Lentokoneen aerodynamiikka ja lentomekaniikka. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit Oy. Luettu 20.4.2022.
5. Parr Andrew. 2011. Hydraulics and Pneumatics. Verkkoaineisto. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/servo-valve>. Luettu 11.04.2022.
6. Lab Unlimited. 2013. Mass vs Volumetric Flow: What is the Difference? Verkkoaineisto. <https://www.labunlimited.com/Mass-vs-Volumetric-Flow>. Luettu 20.01.2022.
7. American Lab & Systems. Positive Displacement Flowmeter LT-104. Verkkoaineisto. <http://www.americanlabs.com/hydraulicmule-lt-104.html> Luettu 29.01.2022.
8. Turbine Flow Meter Working Principle. 2021. Verkkoaineisto. Instrumentation Tools. <https://instrumentationtools.com/turbine-flow-meter-working-principle/> Luettu 20.01.2022.
9. Britannica. Viscosity. Verkkoaineisto. <https://www.britannica.com/science/viscosity> Luettu 17.02.2022.
10. Sick. 2022. Glossary – Temperature compensation. <https://www.sick.com/ag/en/glossary/temperature-compensation/g/p555353> Luettu 17.02.2022.
11. Training seminar München, Germany, 20.-22. September 2017. 2017. Flow Measurement and Calibration. Seminaarin materiaali. [www.trigasfi.com](http://www.trigasfi.com). Luettu 16.05.2022.
12. Thpanorama. 2022. Lineaarinen interpolointimenetelmä, ratkaistu harjoitus. <https://fi.thpanorama.com/articles/matemticas/interpolacin-lineal-mtodo-ejercicios-resueltos.html>. Luettu 16.05.2022.

13. Haapanen Erkki. Lentokoneen vakavuusakselit. <https://www.aerodynaamikka.fi/index.php/lentajan-lupakirja/lentokoneen-ohjaaminen>. Luettu 28.02.2022.
14. Hoffren, J. Saarela, O. 2008. BAe 146- ja BAe HAWK 200 -lentokoneiden hydraulijärjestelmät. Lentotekniikan perusteet. Helsinki: PunaMusta Oy.
15. Fizer Mike. 2019. Ownership: The tail tale. Inside the art and science of the empennage. <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2019/october/pilot/ownership-the-tail-tale>. Luettu 13.03.2022.
16. Ilmailua -blogi. 2016. Lentokoneen sivuperäsin. <https://www.ilmailua.uutisparkki.com/?p=1836>. Luettu 20.04.2022.
17. Cooke Phil. How Things Work: Stopping the A380. <https://www.smithsonianmag.com/air-space-magazine/how-things-work-stopping-the-a380-27549065/>. Luettu 20.04.2022.
18. Parr Andrew. 2011. Jet pipe servo valve. Hydraulics and Pneumatics. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/servo-valve>. Luettu 11.04.2022.
19. Trigas DM. 2022. Turbine flowmeters – highly accurate measurement over a wide measuring range. <https://www.trigasdm.com/en/produkte/liquid-flowmeters/turbine-flowmeters/>. Luettu 20.04.2022.
20. Trigas DM. 2022. Pelton Flowmeter for Low Flow Liquids. <https://www.trigasdm.com/en/produkte/liquid-flowmeters/low-flow-pelton/>. 16.05.2022.

## Testiohjelman käyttöliittymä

Trigas-virtausmittareiden kokeiluun käytetty testiohjelma

