



**TESTIPENKIN SUUNNITTELU TIIVISTYSPOKSIEN PAINEENKESTON
MITTAUKSEEN**

**ENGINEERING A TEST BENCH FOR MEASURING THE PRESSURE DURABILITY
OF STUFFING BOXES**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

Toni Mikkonen

Tarkastaja: Prof. Harri Eskelinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Toni Mikkonen

Testipenkin suunnittelu tiivistyspoksien paineenkeston mittaukseen

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

29 sivua, 7 kuvaa ja 5 liitettä

Tarkastaja: Prof. Harri Eskelinen

Avainsanat: Testipenkki, tiivistyspoksi, akselin tiivistäminen

Tässä kandidaatintyössä suunnitellaan testipenkki Laitex Oy:n käyttämien tiivistyspoksien paineenkeston mittaukseen ja varmistetaan testipenkin toimivuus esimerkkikoeajoilla. Tiivistyspoksia käytetään akselin tiivistämiseen esimerkiksi kuljettimissa, jossa akseli tuodaan prosessitilan läpi ulkopuolelle laakeroitavaksi. Laitex Oy käyttää kuljettimissaan oman malliston mukaisia tiivistyspoksia, joiden paineenkesto ei ole aikaisemmin tieteellisesti tutkittu ja toistaiseksi heidän koelaitteistostaan puuttuu tarkoitukseen sopiva testauslaitteisto.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on suunnitella testipenkki, jossa on mahdollista tutkia kaikkien Laitexin käyttämien tiivistyspoksien paineenkesto. Testipenkillä pitää pystyä tutkimaan tiivistyspoksien paineenkesto normaalissa, noin 0,5 bar paineessa, sekä räjähdysolosuhteita simuloivassa 10 bar paineen alaisuudessa.

Esimerkkikoeajot testipenkin toimivuuden todistamiseksi toteutettiin NO:15 tiivistyspoksilla, joka tarkoittaa 150 mm halkaisijaltaan olevaa akselia. Olennaisimpana tuloksena testipenkin toimivuudesta matalan paineen kokeissa tunnistettiin tarve hankkia digitaalinen paineanturi, jotta paineen muutokset olisivat tallennettavissa helposti ajan funktiona. Korkean, räjähdysolosuhteita simuloivan kokeen tuloksena havaittiin tarve vahvistaa testipenkin runkoa. Korjaavan toimenpiteen jälkeen testipenkki toimi rakenteellisesti hyvin myös korkean paineen kokeissa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Toni Mikkonen

Engineering a test bench for measuring the pressure durability of stuffing boxes

Bachelor's thesis of Mechanical Engineering

2022

29 pages, 7 figures and 5 appendices

Examiners: Prof. Harri Eskelinen

Keywords: Test bench, stuffing box, shaft sealing

In this bachelor's thesis, a test bench is engineered for measuring the pressure durability of stuffing boxes which Laitex Oy is using and making sure that test bench is working correctly. Operability of test bench is ensured by multiple test drives. The stuffing boxes are used widely for the shaft sealing, for example in conveyors, when the shaft is needed to take through, and outside the process atmosphere to equip with bearings. Laitex uses stuffing boxes of their own design, which has never been tested for pressure durability. What is more, Laitex is currently lacking suitable testing equipment and system for that.

The aim of this bachelor's thesis is to engineer a test bench, where it is possible to research all type of stuffing boxes used by Laitex. The target of the research is to find out pressure durability of stuffing boxes under the normal usage pressure of about 0,5 bar and to simulate explosive situation in 10 bar pressure.

The example test drive was made with NO:15 stuffing box, which means 150 mm shaft diameter. The main result of test bench operating in low-pressure atmosphere, was to recognize the need to get new digital pressure sensor. It will make saving the data by function of time a lot easier. Result under the explosive pressure was to find the need to strengthen the steel frame. After fixing the setup, test bench worked well in under 10 bar pressure.

KIITOKSET

Haluan kiittää Laitex Oy:tä erittäin mielenkiintoisesta kandidaatintyön aiheesta ja mahdollisuudesta olla kehittämässä yritykselle täysin uutta testauslaittostoa. Erityinen kiitos Laitexin puolelta osallistuneille henkilöille taustatuesta suunnittelu vaiheessa, sekä avusta ja opastuksesta käytännön mittausten aikana. Kiitokset myös Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopiston professori Harri Eskeliselälle työnohjauksesta ja rakentavista kommentteista.

Lappeenrannassa 25.4.2022

Toni Mikkonen



SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

p	paine	[bar]
PS	paine	[bar]
V	tilavuus	[l]
ρ	tiheys	[kg/m ³]
h	korkeusero	[mm]

Vakiot

g	gravitaatiovakio	9,81 m/s
-----	------------------	----------

Alaindeksit

ilma	ympäröivä ilma
------	----------------

Lyhenteet

DN	Standardin mukainen putken kokoluokka
NO	Tiivistyspoksen kokoon viittaava numero

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	8
1.1	Tutkimuksen tausta	8
1.2	Tutkimusongelma ja tavoitteet.....	9
1.2.1	Tutkimuskysymykset.....	10
1.2.2	Hypoteesi	10
1.3	Tutkimusmenetelmät	10
1.4	Aiheen rajaukset.....	11
2	Menetelmät	12
2.1	Testipenkin suunnittelu	12
2.1.1	Teräsovat	12
2.1.2	Matalan paineen kokeen mittausjärjestelmät.....	15
2.1.3	Korkean paineen kokeen mittausjärjestelmät	16
2.2	Mittausten suorittaminen.....	17
2.2.1	Matalan paineen mittauksen suorittaminen	17
2.2.2	Korkean paineen mittauksen suorittaminen.....	19
3	Tulokset	21
3.1	Matalan paineen kokeen tulokset	21
3.2	Korkean paineen kokeen tulokset	22
4	Pohdinta ja johtopäätökset.....	25
4.1	Avaintulokset	26
4.2	Tutkimuksen luotettavuus	27
5	Yhteenveto.....	28
	Lähteet	29

Liitteet

Liite 1. Koeajo I, 2700 s, mittauspöytäkirja

Liite 2. Koeajo I, tulokset

Liite 3. Koeajo II, 1900 s, mittauspöytäkirja

Liite 4. Koeajo II, tulokset

Liite 5. Koeajo II, ote 400 s - 1070 s

Kuvaluettelo

Kuva 1: Tiivistypoksen rakenne

Kuva 2: Vaatimustenmukaisuuden arviointitaulukko 4

Kuva 3: Testipenkin 3D-malli

Kuva 4: Nestepatsasmanometri

Kuva 5: Matalan paineen mittausjärjestelmä

Kuva 6: Korkean paineen mittausjärjestelmä

Kuva 7: Testipenkin vahvistus

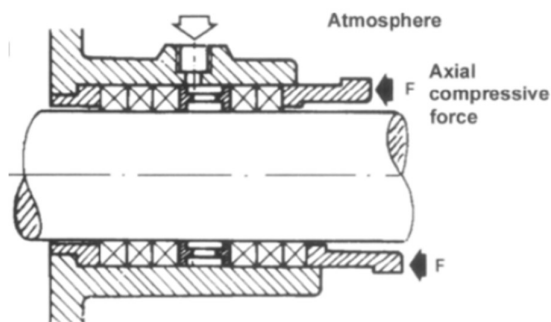
1 Johdanto

Tiivistyspoksia käytetään pyörivän akselin tiivistämiseen esimerkiksi pumpeissa ja kuljettimissa, joissa akseli on tarve tuoda prosessitilan ulkopuolelle laakeroitavaksi. Tässä kandidaatin työssä keskitytään nimenomaan kuljettimissa käytettävien pyörivien akseleiden tiivistämiseen tiivistyspoksilla, joiden nimelliset pyörimisnopeudet vaihtelevat laajalti noin 5–60 rpm. Kuljettimilla tarkoitetaan esimerkiksi kola- ja ruuvikuljettimia, jotka on suunniteltu raskaaseen teolliseen käyttöön esimerkiksi voimalaitoksille tai kaivosteollisuuden materiaalivirtojen kuljettamiseen. Käsiteltävät materiaalit ovat usein kiinteitä, kuten haketta tai tuhkaa. Asiakkaiden prosessit vaativat joskus pienen, noin 0,2–0,5 baarin ylipaineen.

1.1 Tutkimuksen tausta

Laitex Oy on vuonna 1986 perustettu perheyritys, joka on erikoistunut materiaalinkäsittelylaitteiden toimitukseen aina yksittäisistä laitteista suurempiin kokonaisratkaisuihin prosessiteollisuuteen (Laitex 2021). Laitex Oy käyttää kuljettimissaan oman mallistonsa mukaista tiivistyspoksia, jonka tutkimiseen yritys on pyytänyt suunnittelemaan testausjärjestelmän ja varmistamaan tämän toimivuus.

Laitexin käyttämän tiivistyspoksen konstruktio on lähimpänä kuvan 1 mukaista tavanomaista tiivistysnaruista koostuvaa tiivistyspoksia (eng. soft packed stuffing box), jossa tiivistyspoksen pesä täytetään 2–4 tiivistysnarulla ja mahdollisesti rasvarenkaalla, jotka puristetaan aksiaalisesti poksen painimella (Nesbitt 2006, 229).



Kuva 1. Tiivistyspoksen rakenne (Nesbitt 2006, 229)

Kun tiivistysnaruja puristetaan aksiaalisesti, ne pyrkivät laajenemaan radiaalisesti kohti akselin pintaa aiheuttaen näin puristavan voiman akselin pintaan ja tiivistyksen (Nesbitt, 230).

Tiivistyspoksen konfiguraatio, eli vaihtoehdot eri tiivistysnarujen ja voitelun välillä, riippuvat suurelta osin millaiseen prosessiin kuljetin on suunniteltu. Tiivistysnaruvaihtoehtoja on kaksi. Matalissa lämpötiloissa käytössä on Carrara N3404 tiivistenaru, mutta mikäli prosessi sisältää todella kuumaa materiaalia, esimerkiksi tuhkaa, käytettävänä tiivistysnaruna on Carrara C8200.

Tiivistyspoksen kohdalle akselille asetetaan aina kutistusliitoksella kulutusholkki, joka on mahdollista vaihtaa huoltoseisokkien aikana. Kulutusholkin tarkoitus on nimensä mukaan vastaanottaa pyörimisestä johtuva kuluminen, ettei koko akselia tarvitse aina vaihtaa.

1.2 Tutkimusongelma ja tavoitteet

Tutkimusongelma kiteytyy tiedon puutteeseen tiivistyspoksien paineenkestosta. Testipenkin toteuttaminen on yritykselle tärkeä, sillä tiivistyspoksien paineenkestosta ei ole tarkkaa teollista tai kokeellista dataa. Laitexin asiakkaiden prosesseissa on toisinaan pieni vastapaine, jonka olisi suotavaa pysyä prosessitilassa. Tiivistyspoksien paineenkestoa ei ole mahdollista testata käytössä olevista laitteista tarkasti, sillä laitteet ovat fyysisesti isoja, niiden paineistaminen hallitusti olisi erittäin haastavaa ja ilman ohivuotoja voi olla muissakin kohdissa, kuin pelkästään tiivistyspoksen kohdalla.

Tämän ongelman ratkaisemiseksi tavoitteena on suunnitella koeajoja varten oma testipenkki, jossa tiivistyspoksien paineenkesto ja mahdollinen ohivuoto on mahdollista mitata hallitusti ja tarkasti, sekä poissulkea muut mahdolliset ilmavuodot. Työhön kuuluu myös testipenkin mittaussjärjestelmän toimivuuden todentaminen esimerkkikoeajoilla. Laitexilla on käytössä useampaa eri mallista tiivistyspoksia, joten testipenkille asetetaan tavoitteeksi suorittaa kaikkien tiivistyspoksimallien koeajon mahdollisuus neljällä eri akselin halkaisijalla. Tavoitteena on myös suunnitella testipenkistä sellainen, että sillä on mahdollisuus testata tiivistyspoksien käyttäytyminen räjähdysolosuhteissa. Räjähdysolosuhteita halutaan tutkia 10 bar paineen vaikutuksen alaisuudessa.

1.2.1 Tutkimuskysymykset

Lähtökohtaisesti ensimmäinen selvitettävä asia on, kestävätkö tiivistyspoksit ylipäättään painetta, vai vuotavatko ne kaiken ilman ulos. Mikäli tiivistyspoksit vuotavat, kysymyksenä on, kuinka vuotava ilmamäärä mitataan luotettavasti ja missä muodossa tulokset ilmoitetaan. Toinen tutkimuskysymys on, mitä räjähdysolosuhteiden vaatima 10 bar paine vaatii testipenkiltä suunnittelun näkökulmasta.

1.2.2 Hypoteesi

Käytännön kokemuksen perusteella lähtökohtaisena oletuksena on, että tiivistyspoksit vuotavat hieman käytön aikaisissa olosuhteissa. Tarkoista määristä ei kuitenkaan ole tietoa. Oletuksena myös on, että poksin painimen kireydellä on vaikutus tiivistykseen sitä parantavasti, mutta se vaikuttaa samalla moottorilta vaadittavaan momenttiin ja tiivistysnarujen kulutuskestävyyteen.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimusmenetelmiin kuuluu testipenkin suunnittelu ja koeajoilla testipenkin toimivuuden todistaminen. Testipenkistä on suunniteltava sellainen, että sillä on pystyttävä testaamaan eri mallisia ja eri kokoisia Laitexin käyttämiä tiivistyspoksia. Tämä tarkoittaa sitä, että tiivistyspoksi on oltava mahdollisimman helposti vaihdettavissa kuitenkin sillä ehdolla, että tilanne vastaa todellisuutta kuljettimissa. Testipenkin on myös kestävä räjähdysolosuhteiden 10 bar paine, joka suoritetaan vedellä. Testipenkin suunnittelussa teräsrakenteiden suunnittelun lisäksi erittäin tärkeässä roolissa on mittausjärjestelmän laatiminen. Mittauksen täytyy keskittyä tiivistyksen osalta olennaisiin asioihin, eli paineen, tiivistysnarujen lämpötilan, tiivistyspoksen ohi vuotavan ilman määrän, sekä akselin kierrosnopeuden seurantaan.

Testipenkin suunnittelun, valmistuksen ja kokoonpanon jälkeen sen toimivuus varmistetaan. Tämä on helpoin suorittaa esimerkkikoeajoilla ja testipenkin toimivuus voidaan todistaa raporttoimalla koeajon tulokset. Tuloksissa keskitytään erityisesti testipenkoin rakenteelliseen toimivuuteen ja mittaustulosten selkeyteen.

1.4 Aiheen rajaukset

Tässä tutkimustyössä keskitytään vain Laitex Oy:n käyttämien tiivistuspoksien paineenkeston määrittämistä varten suunniteltavaan testipenkkiin. Testipenkki suunnitellaan siten, että siinä on mahdollista suorittaa kaikkien Laitexin käyttämien tiivistuspoksien tutkimukset niiden paineen kestosta. Tässä työssä suunnitellaan ja valmistetaan testipenkki koeajettavaksi neljälle eri kokoiselle tiivistypoksille. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että valmistetaan akseli, jossa on sopivat olakkeet neljälle kulutusholkille ja sopivat laipat neljälle tiivistypoksille. Testipenkin mukaan valmisteltavat tiivistypoksien koot ovat NO:15, 12, 10 ja 6. Tiivistyksen tilanteen on vastattava todellista tilannetta kuljettimissa. Testipenkki on suunniteltava siten, että siinä on mahdollista suorittaa normaalin käytön aikaiset noin 0,5 bar paineen kokeet, sekä räjähdysolosuhteita kuvaava noin 10 bar paineen kokeet.

Testipenkin toimivuus todistetaan NO:15 tiivistypoksin esimerkkikoeajoilla ja raportoidaan näistä tulokset. Tuloksissa keskitytään ennen kaikkea testipenkin rakenteelliseen toimivuuteen ja mittausjärjestelmän luotettavuuteen ja yksiselitteisyyteen.

2 Menetelmät

Tiivistyspoxsin paineenkeston mittaamista varten suunnitellaan testipenkki, jossa on mahdollista mitata sekä matalan, noin 0,5 bar paineen tilanne, sekä räjähdysolosuhteita simuloiva 10 bar paineen olosuhteet. Testipenkin toimivuus todistetaan NO:15 tiivistyspoxsin esimerkkikoeajoilla, joiden tulokset raportoidaan. Tuloksissa keskitytään sekä testipenkin rakenteelliseen toimivuuteen, että mittausjärjestelmän luotettavuuteen ja yksiselitteisyyteen.

2.1 Testipenkin suunnittelu

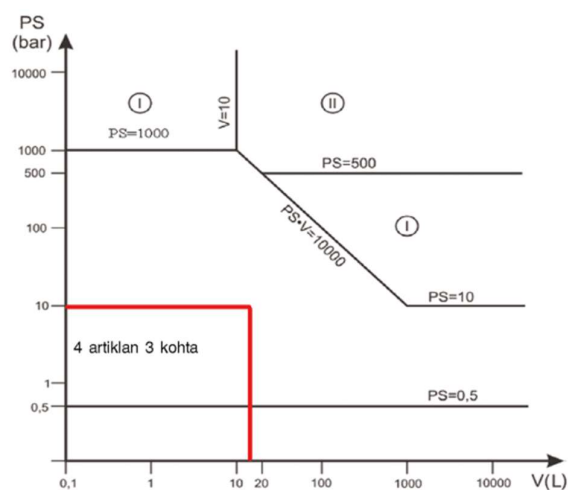
Laadukkaiden mittaustulosten saamiseksi testipenkin suunnittelu on syytä tehdä huolellisesti, jotta mittausten suorittaminen olisi mahdollisimman suoraviivaista ja virheiden mahdollisuus olisi minimoitu. Suunnitellaan yksi testipenkki, jossa on mahdollisuus suorittaa sekä matalan noin 0,5 bar, että korkean 10 bar paineen kokeet. Laitexilla on käytössä useita erilaisia tiivistyspoxsimalleja kuljetettavasta materiaalista ja kuljettimen tyypistä riippuen. Vaikka tässä harjoitustyössä käytetään esimerkkikoeajoon vain yhdestä tiivistyspoxsimallista NO:15 poksikoko, on testipenkillä pystyttävä koeajamaan loputkin mallit ja kokoluokat.

2.1.1 Teräsosat

Testipenkin suunnittelussa korkea, 10 bar paine on ehdottomasti teräsosat määrittävä tekijä. Käytetään suunnittelun lähtökohtana PSK 4201 putkiluokkien määrittelyn standardia. Sieltä on mahdollista valita käytettävä materiaali, haluttu paine ja materiaaliikohtainen standardi putkiluokalle. Testipenkillä ei ole suuria vaatimuksia happoja tai korroosiota vastaan, joten tavallinen kuumaluja seostamaton teräs riittää hyvin. PSK 4201 mukaan tällaisen putkiluokan tunnus on E10C1C, joka viittaa PSK 4204 standardiin (PSK 4201, 4).

PSK 4204 soveltamisala käsittää painelaitteikäyttöön tarkoitettuja putkien ja putkenosien mitat, materiaalit ja paineenkestävyyden, kun ympäristön lämpötila on +20°C...+400°C ja suurin paine on 10 bar (PSK 4204, 1).

Korkean paineen koe suoritetaan turvallisuussyistä vedellä, koska vesi on kokoon puristumaton, toisin kuin ilma. Painelaitedirektiivin 2014/68/EU mukaan 10 bar paine ja vaarattomiksi aineiksi luokitellulla vedellä täytetty säiliö kuuluu painelaitedirektiivin vaatimusten mukaan hyvän konepajakäytännön alle. Tarkemmin, testipenkin säiliö kuuluu artiklan 4, 1 kohdan a alakohdan ii alakohdan toisen luetelmakohdan säiliöihin, eli säiliöön, jonka sisällä on neste ja höyryn paine alle 0,5 bar (Painelaitedirektiivi 2014/68/EU, 176). Testipenkissä ei itseasiassa muodostu höyryä ollenkaan. Koska direktiivin Taulukon 4 mukaan testipenkin PS*V tulo jää alle 10000, testipenki kuuluu 4 artiklan 3 kohtaan ja näin ollen valmistukseen riittää hyvä konepajakäytäntö (Painelaitedirektiivi 2014/68/EU, 178). Testipenkin tilavuus tulee jäämään kuvan 2 mukaisesti suunnittelun myötä 14,4 l.



Taulukko 4

Kuva 2. Vaatimustenmukaisuuden arviointitaulukko 4 (Painelaitedirektiivi 2014/68/EU, 217)

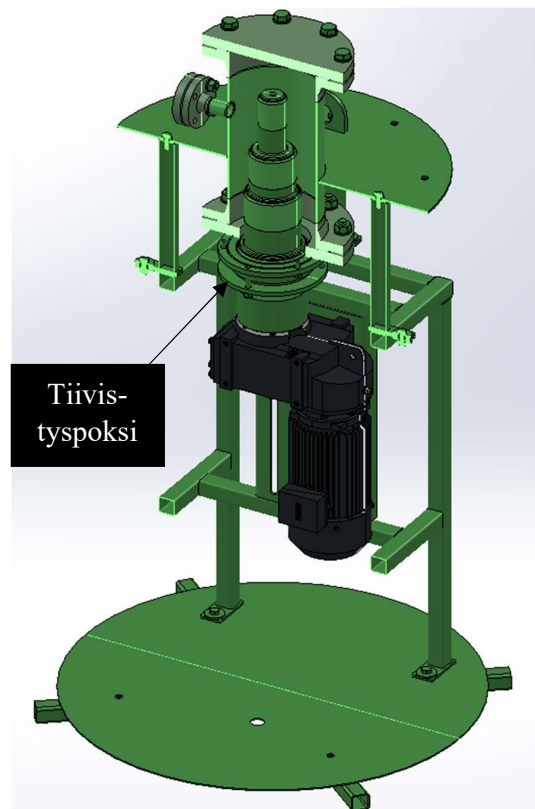
Laitexin asettamien vaatimusten mukaan testipenkillä on tämän työn osalta pystyttävä selvittämään neljän erikokoisen tiivistyspoksen paineenkesto. Testien suorittamiseen tarvitaan siis ainakin akseli ja vaihde moottori, jolla pyöritetään akselia. Suunnitellaan akselista loppua kohti kapeneva ja sopivan pituiset olakkeet neljälle kulutusholkille. Tässä kandidaatintyössä koeajoja varten suunniteltavat poksien koot ovat NO:15, 12, 10 ja 6. Ne ovat Laitexin kuljettimissa tavallisimmin käytettyjä poksikokoja. Esimerkiksi poksi NO:15 tarkoittaa akselilta 140 mm halkaisijaa ja kulutusholkin kanssa halkaisijaksi muodostuu 150 mm.

Kuten kuvasta 3 näkyy, paineistettava astia tulee olla erillinen ja irrotettava osakokonaisuus, jotta tiivistyspoksien vaihto olisi mahdollisimman helppoa. Suurin tiivistyspoksi vaatii

DN200 standardikokoisen putken ja sille sopivat vakiolaipat. Kaikki osat on mahdollista mitoittaa PSK 2404 standardin mukaan. Paineistettavalle putkelle seinämänvahvuus tulee olla 6,3 mm (PSK 4204, 7). Standardin mukaiset vakiolaipat ovat 24 mm paksuja ja kiinnitys tulee tehdä 8 x M20 pulteilla (PSK 4204, 10). Tähän hitsauskokoontaan tulee liittää myös optio tutkia myöhemmin ilmaa käyttävien tiivistyspoksien ilman kulutusta. 3D-mallissa tummempi vihreä väri tarkoittaa S355 rakenneterästä.

Suunnitellaan vaihdemoottorille kiskoilla toimiva korkeussäätö. Mahdollisimman vähän liikkuvia osia sisältävä testipenkki takaa samanlaiset testausolosuhteet jokaiselle tiivistyspoksille.

Hypoteesina on, että tiivistyspoksit vuotavat jonkin verran. Tiivistyspoxsin kohdalta ohi vuotanut ilma pitää saada kerättyä talteen ja johdettua putkeen, johon on asetettu virtausmittari. Huomioitavana tässä kohti on myös, että moottori toimii sähköllä ja tarvitsee virtaa. Virtakaapeli on saatava johdettua uloimman kuoren sisään, joten suunnitellaan tätä varten testipenkille erillinen tiivistettävä pohja, johon on mahdollista tehdä virtakaapelille läpivienti.



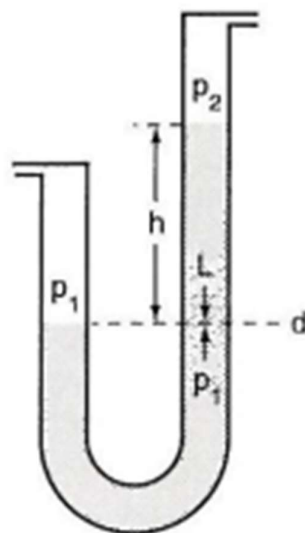
Kuva 3. Testipenkin 3D-malli

Testipenkissä ylälaippaa ei ole tarkoitus vaihtaa missään vaiheessa kokeita. Ylälaippaan tehdään liitännät paineensäätimelle, manometrille, painemittarille ja veden paineistukselle. Putkien osissa standardikokoiset liitososat menevät tuuma koossa. Perinteinen käytössä oleva painemittari tarvitsee 1” liitännän ja muille edellä luetelluille osille ½” liitännät ovat lähtökohtaisesti riittävät.

2.1.2 Matalan paineen kokeen mittausjärjestelmät

Tutkimuksissa mittaaminen keskittyy paineen, ilmavirran, lämpötilan ja akselin pyörimisnopeuden seuraamiseen. Mittaamisessa halutaan tarkkoja numeerisia tuloksia. Kokeissa vaadittavat noin 0,5 bar ja 10 bar paineet tarkoittavat ylipainetta, eli testipenkissä on kyseisen määrän verran enemmän painetta, kuin ympäröivä ilmanpaine 1,01325 bar.

Matalassa paineessa mittaaminen perustuu paineensäätimen, sekä nestepatsasmanometrin käyttöön. Nestepatsasmanometri on esitetty kuvassa 4. Nestepatsasmanometrillä on mahdollista mitata pieniäkin, jopa alle 0,2 Pa paine-eroja (Rantanen & Saxholm 2011, 20). Nestepatsasmanometrin toimintaperiaate perustuu paine-eroon. U-putken sisään laitetaan nestettä, testipenkin tapauksessa vettä, ja nestepintoihin muodostuu korkeusero, kun testipenkin sisällä on ylipaine ympäröivään ilmanpaineeseen nähden.



Kuva 4. Nestepatsasmanometri (Rantanen & Saxholm 2011, 21)

Nestepatsasmanometrin mittaama paine-ero on:

$$p = (\rho - \rho_{\text{ilma}}) * g * h \quad (1)$$

Yhtälössä 1 p on mitattu paine-ero, ρ on manometrissa käytetyn nesteen tiheys, ρ_{ilma} on ympäröivän ilman tiheys, g on gravitaatiovakio ja h on nestepintojen välinen pystysuora etäisyys (Rantanen & Saxholm 2011, 20).

Kun ilma vuotaa tiivistyspoksista ohi, paine-ero pienenee. Tällöin ilmaa täytyy lisätä testipenkin sisään ja käytössä oleva paineensäädin hoitaa tämän automaattisesti. Tässä vaiheessa ohivuotavan ilman määrä on myös mahdollista mitata ajan funktiona.

Tiivistyspoxsin ohi vuotavan ilman määrä mitataan tarkemmin ilman virtauksen mittaamiseen tarkoitettulla SCHMIDT SS 20.261 paineilmavirtausmittarilla. Virtausmittari sijoitetaan testipenkin uloimman kuoren alalaidasta lähtevään DN25 kokoiseen putkeen. Mittari pystyy mittaamaan tarkasti alhaisiakin virtausnopeuksia alkaen 0,2 m/s ja laitteen perustarkkuus on +/- 5 %. Virtausmittarin toiminta perustuu kuuma lanka anemometriperiaatteeseen ja data on luettavissa käytössä olevalla tietokoneohjelmalla. Virtausmittari asennetaan siten, että ehjää putkea ennen anturia ilman virtaussuuntaan nähden on oltava 10x putken sisähalkaisijan verran ja anturin jälkeen vähintään 5x putken sisähalkaisijan verran. Kyseisessä tapauksessa putkea ennen anturia on siis oltava vähintään 28,5 cm ja anturin jälkeen 14,3 cm. DN25 putkelle pienin ilman normaalivirtausmäärän mittauservo on 0,3 m³/h (SCHMIDT Technology, 2–4).

2.1.3 Korkean paineen kokeen mittausjärjestelmät

Korkean paineen mittaukseen tarvitaan huomattavasti vähemmän laitteistoa, kuin matalan paineen kokeen mittauksissa. Näissä kokeissa ei tarvita testipenkin ulointa kuorta ollenkaan, sillä tavoitteena on vain selvittää, mitä tiivistyspoksille ja testipenkillä tapahtuu räjähdysolosuhteiden 10 baarissa. Korkean paineen kokeet suoritetaan vedellä, joten mahdollinen vuoto havaitaan vuotavana vetenä laitteistosta.

Vesi paineistetaan mäntätoimisella käsipumpulla. Testipenkin kanteen jätetään kiinnitys vain veden paineistamiseen tarvittavalle liitännälle, korvausilman poistolle ja painemittarille, jotta huomataan, milloin paine on tavoitellussa 10 baarissa.

2.2 Mittausten suorittaminen

Varmistetaan, että testipenkki itsessään pitää paineen sisällä, eli liitetään paineistettavan osan alapäähän sokea (täysin umpinainen) laippa ja paineistetaan testipenkki vedellä 10 bar paineeseen. Kun huomataan, että testipenkki itsessään ei vuoda, mittausten aikana painehäviöt johtuvat varmasti tiivistyspoxsin kohdalta vuotavasta ilmasta tai vedestä.

Kaikki testit on mahdollista suorittaa Laitexin tiloissa. Laitexilla on kokoonpanotiloissa käytössä siltanostureita, joita on mahdollista hyödyntää testipenkin osien siirtelyssä. Vaihdemootorin pyörittäminen vaatii koepyörityslaitteiston, joka sisältää taajuusmuuntajan. Koepyörityslaitteistosta on mahdollista nähdä digitaalisista mittareista pyörimisnopeuden, virran taajuuden ja moottorin vaatiman momentin. Moottorimomentin seuraamisen tärkeyteen viitattiin 1.2.2 hypoteesissa.

2.2.1 Matalan paineen mittausten suorittaminen

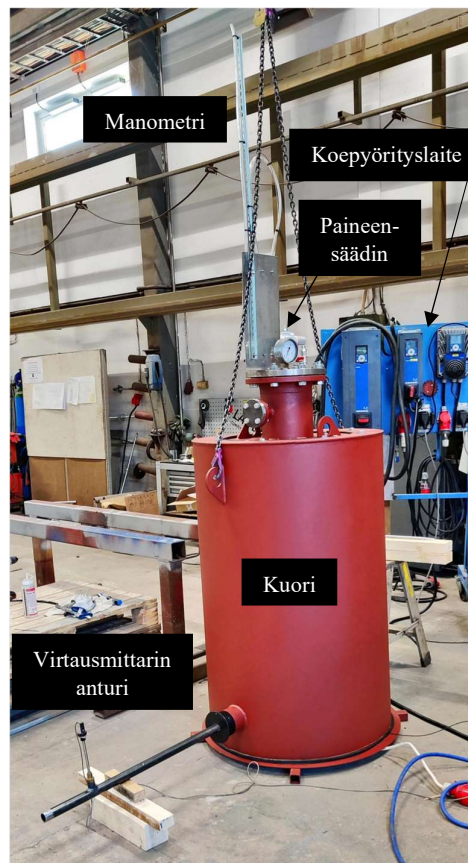
Matalan paineen mittaukset simuloivat kuljettimien ja tiivistyspoxsin todellisia käytönaikeisia olosuhteita. Koeajo aloitetaan antureiden kalibroinnilla. Oikeiden arvojen osoittamiseksi kalibrointia tarvitsee lämpöanturi ja virtausmittari. Kalibroinnin jälkeen digitaaliset mittalaitteet voidaan kytkeä tietokoneeseen.

Matalan paineen kokeet ovat tiivistyspoxsin käyttöympäristön ja testipenkin mittalaitteiden toimivuuden puitteissa mahdollista ajaa 0,01–0,5 bar paineissa, mutta testaus olosuhteissa on mahdollista tutkia myös ilman pitävyyttä 2 bar asti turvallisesti. Käyttämässämme manometrissa loppuu toiminta-alue noin 0,08 bar kohdalla, joten sen jälkeen turvaudutaan painensäätimen omaan mittariin. Yhden painealueen testaukseen käytetään aikaa noin 2–30 minuuttia. Siinä ajassa mittalaitteet ehtivät reagoida selkeästi ja saadaan oikean suuntaisia tuloksia esille.

Tietokone kerää dataa talteen moottorin virran taajuudesta (Hz), lämpöanturin ilmoittamasta lämpötilasta tiivistysnaruissa (°C), sekä virtausmittarin ilmoittamat arvot tiivistyspoxsin ohi vuotavasta ilmasta sekä kuutiometriä tunnissa (m^3/h), että ilmavirran nopeuden (m/s). Vaihdemootorin pyörimisnopeutta voidaan säätää taajuusmuuntajalla, eli valitsemalla virran taajuuden, jolla moottoria ajetaan. Erojen etsimiseksi pyörimisnopeutta voidaan vaihdella 50

Hz ja 100 Hz välillä, jotka vastaavat akselin pyörimisnopeuksina 56,7 rpm ja 113,3 rpm. Normaaleissa olosuhteissa vaihdemoottori on aina mitoitettu laitekohtaisesti oikealle pyörimisnopeudelle tavoitteena 50 Hz, mutta testiajossa vaihdemoottori on normaalia käyttöä pienemmällä rasituksella ja kestää suuremman taajuuden. Jokaisen liittimen alla on palloventtiili, jotta tutkimuksessa eri variaatioiden tekeminen on mahdollisimman vaivatonta.

Säädetään testipenkki NO:15 tiivistyspoksille sopivaksi ja kiristetään poksien painin ohjearvoon, eli jokainen painimen kiinnitysmutteri 2,3 Nm. Tämä vastaa M12 jousialuslevyn kokoonpuristumista. Asetetaan suojakuori testipenkin ympärille ja varmistetaan, että se on tiivis. Testipenkki näyttää matalan paineen kokeiden aikana kuvan 5 mukaiselta.



Kuva 5. Matalan paineen mittausjärjestelmä

Sähköistetään vaihdemoottori ja aloitetaan pyörittämään akselia tiivistyspoksien sisällä. Nostetaan samalla painetta vähän kerrassaan säiliössä, jotta paine tasaantuu ja mittalaitteet ehtivät reagoida muutoksiin. Paineen säätäminen on erittäin helppoa paineensäätimen avulla. Painesäätimessä itsessään on liian suuret lukuarvot, mutta manometrillä saadaan tarkka säiliön paine tietoon ja ensimmäisen kahden minuutin aikana paine nostetaan manometrin

toiminta-alueen huippuun, eli 0,08 bar. Tässä kohti suljetaan manometrin palloventtiili eli poistetaan se käytöstä. Lisätään painetta 500 s kohdalla 0,8 bar paineeseen ja kokeen edettyä 600 s kohdalle, nostetaan paine vielä 1,2 baariin. Keskeytetään ilman syöttäminen säiliöön 1500 s kohdalla, mutta annetaan akselin pyöriä silti koko ajan. Kokeillaan vielä tiivistyspoksien paineenkestoa manometrin toiminta-alueella, eli nostetaan paine 0,08 baariin, suljetaan ilmansyöttö ja seurataan, mitä manometrille tapahtuu. Ensimmäinen koeajo ohjearvoon kiristetyllä poksien painimella kestää 2700 sekuntia (Liite 1).

Aloitetaan toinen koeajo. Tiivistyspoksien painimen kireyden vaikutus paineen pitävyyteen ja moottorin momenttiin on yksi tutkimuksissa selvitettävä asia, joten kiristetään paininta toiselle koeajolle. Tiivistetään testipenkin ympärille laskettava kuori, jotta ohi vuotanut ilma jää talteen ja on mahdollista johtaa virtausmittarille. Lasketaan säiliön paine manometrin toiminta-alueelle ja aletaan nostaa painetta taas hiljalleen 0,08 bar asti. Toistetaan sama testi pienen paineen ilmapuodosta kuin ensimmäiselläkin kokeella, eli suljetaan ilman syöttö ja otetaan aikaa manometrin osoittamasta paine-eron tasaantumisen. Kokeen edetessä poistetaan manometri käytöstä ja lisätään painetta seuraavasti: 500 s 0,8 bar; 600 s 1,2 bar; 630 s 1,4 bar; 810 s 1,6 bar ja 880 s 2,0 bar. Koeajon aikana vaihdellaan akselin pyörimisnopeutta, jotta voidaan etsiä eroja ilman vuotoon ja 1175 s kohdalla vaihdetaan vielä akselin pyörimissuunta. Toinen koeajo ohjearvoa suurempaan momenttiin kiristetyllä poksien painimella kestää 1900 sekuntia (Liite 3).

2.2.2 Korkean paineen mittausten suorittaminen

Korkean paineen mittaukset suoritetaan rakenteeltaan samalla testipenkillä kuin matalamman paineen testit, mutta testipenkkiä ympäröivä suojakuori poistetaan, sillä se on tarpeeton korkean paineen kokeissa. Ilman mittaamiseen ja säätämiseen tarkoitetut laitteet testipenkin kannesta suljetaan palloventtiileillä. Käytössä on edelleen NO:15 tiivistyspoksi ja sille tarkoitettu akselin kohta. Kannessa oleva perinteinen painemittari osoittaa säiliön sisälle nostettavan paineen. Paineen nostamiseen käytetään käsikäyttöistä mäntätoimista vesipumppua. Tässä testissä tietokoneeseen ei ole kytketty mitään mittalaitetta, vaan kaikki havainnot perustuvat tiivistyspoksien kohdalta vuotavaan veteen silmämääräisesti. Kuvasta 6 ilmenee testipenkki korkean paineen mittauksia suorittaessa.



Kuva 6. Korkean paineen mittausjärjestelmä

Kiristetään tiivistyspoxsin painin suoraan ohjearvoa suuremmalla momentilla. Ensimmäisenä täytetään säiliö vedellä ja suljetaan myös korvausilman palloventtiili. Pumpataan painetta säiliöön. Testipenkin akseli toimii tässä kohti ikään kuin mäntänä ja säiliö sylinterinä, jossa työaineena on paineistettu vesi. Säiliö siis pyrkii nousemaan ylöspäin ja akseli vaihde-moottorin kiinnikkeistä alaspäin. Ensimmäisen testin aikana huomataan testipenkin run-gossa tapahtuvan muodonmuutoksia paikoissa, joiden ei ole suunniteltu antavan periksi. Testi joudutaan keskeyttämään 5 bar kohdalla. Korjaavana toimenpiteenä jäykistetään testi-penkin säiliön kehikko ja alempi tukirakenne pitkällä kierretangolla ja tehdään tästä jäykkä pulttiliitos. Näin ollen ainoaksi eläväksi teräsosaksi jää ympyrän muotoinen levy säiliön ym-pärillä. Tässä yhteydessä tiivistetään myös tiivistyspoxsin kiinnityspultit ja vaihdetaan uusi tiiviste poxsin pesän ja laipan väliin.

Aloitetaan toinen testikierros samoilla toimenpiteillä, kuin ensimmäinenkin. Tällä kertaa päästään nostamaan paine haluttuun 10 bar paineeseen. Akselia on edelleen mahdollista pyö-rittää. Paineen nostamiseen pumpulla menee vain muutama painallus ja paine saavuttaa 10 bar arvon noin 10 sekunnissa. Testi itsessään kestää noin tunnin.

3 Tulokset

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli suunnitella testipenkki tiivistyspoxsin paineenkeston mittaukseen ja todistaa testipenkin toiminnallisuus. Käsitellään tuloksissa testipenkin toiminnallisuutta rakenteellisesti, sekä mittausjärjestelmän toimivuutta ja havainnollistetaan nämä suoritettujen koeajojen avulla. Koeajot suoritettiin sekä matalalla, että korkealla räjähdysolosuhteita simuloivalla 10 bar paineella. Korkean paineen koe suoritettiin vedellä.

3.1 Matalan paineen kokeen tulokset

Ensimmäisessä koejaossa tiivistyspoxsin painimen kiristys ohjearvoonsa osoittautui sen verran pieneksi, että tiivistyspoxsissa ilmenee vuotoa. Kokeen alussa tiivistyspoxsissa on pientä vuotoa, mutta se tasoittuu, kun tiivistysnarut hakevat paikkansa akselin ympärillä. Kun säiliön paine nostettiin 0,08 bar, ei virtausmittarin mukaan ilmennyt ilmapuotoa. Jatkuvalle noin 0,8 bar paineella ilmapuoto tiivistyspoxsissa oli edelleen niin heikkoa, ettei virtausmittari kyennyt antamaan tuloksia. Virtausmittarin pienin tarkkuus on 0,3 m³/h, joten tiivistyspoxsin ohi vuotavan ilman määrä on tätä pienempi. Kun paine nostettiin 600 s kohdalla noin 1,2 baariin, ilman vuoto kasvoi virtausmittarin antaman tuloksen mukaan 2 m³/h ja 1500 s kohdalla ilman syötön katkaisun jälkeen paine romahti sekunneissa nolnaan. Ensimmäisen testin lopussa nostettiin paine vielä 0,08 baariin ja pysäytettiin ilman syöttö. Manometrissa nestepatsas alkoi vajota heti ja paine-ero oli tasaantunut noin 8 min aikana, mutta virtausmittari ei kyennyt havainnoimaan tätä (Liite 2).

Toisessa kokeessa tiivistyspoxsin painimen kireyttä nostettiin. Poxsin painimen kiristys vaikutti odotetulla tavalla ilman vuodon vähentymiseen. Paineen ollessa 0,08 bar manometrissa nestepinnat tasaantuivat 12 min aikana, joka on selvästi pidempi aika kuin ennen painimen kiristystä vastaavassa kokeessa. Kun paine nostettiin 0,8 ja 1,2 bar, ilman vuoto oli edelleen niin vähäistä, ettei virtausmittari antanut lukuarvoja. Liitteessä 4 ilmenevä piikki 950 s kohdalla johtuu putkeen puhaltamisesta, sillä anturin epäiltiin hetken olevan jumissa. Toisin sanoen, NO:15 tiivistyspoxsi ei ole ilmatiivis edes erittäin pienillä paineilla, mutta ilman vuoto on todella vähäistä.

Matalan paineen kokeissa testipenkki toimi rakenteellisesti juuri siten, kun se on suunniteltu. Tiivistyspoksin ja alalaipan vaihto onnistuu, kaikki mittausjärjestelmät ovat saatavilla ja haitallisia vuotokohtia testipenkin rakenteessa ei ilmennyt. Heikkoudeksi osoittautui testipenkiä ympäröivän kuoren paikalleen asettaminen, sillä manometri toi testipenkille noin 1,5 m lisää korkeutta ja Laitexin työtiloista alkoi loppua nostokorkeus siltanostureissa. Jatkokehitystä vaatii myös mittausjärjestelmän paineenseuranta, sillä U-putkimanometrin ja paineen säätimen painealueen väliin jää tarkasti mittaamattomissa oleva, noin 0,9 bar paine-eron katvealue (0,08 bar – 1 bar), joka sattuu ikävästi juuri olennaisimpaan tutkittavaan alueeseen. Paineen muutoksen taltiointi ajan funktiona on myös haastavaa näin manuaalisessa järjestelmässä.

Vaihdemoottorin pyörimisnopeudella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta tiivistyspoksin paineenkestoon tai sen vuotavaan ilman määrään. Sen sijaan tiivistysnaruihin asetettu lämpöanturi reagoi selvästi pyörimisnopeuteen. Lämpötila nousi lähes lineaarisesti 50 Hz taajuudella ja 100 Hz taajuudella lineaarisen lämmön nousun kulmakerroin kasvoi entisestään (Liite 5). Yhden tunnin ja 20 min koepyöritysjakson aikana tiivistyspoksin narujen lämpötila nousi 18 °C:sta 31 °C:een, välillä kiristettiin vain tiivistyspoksin painin.

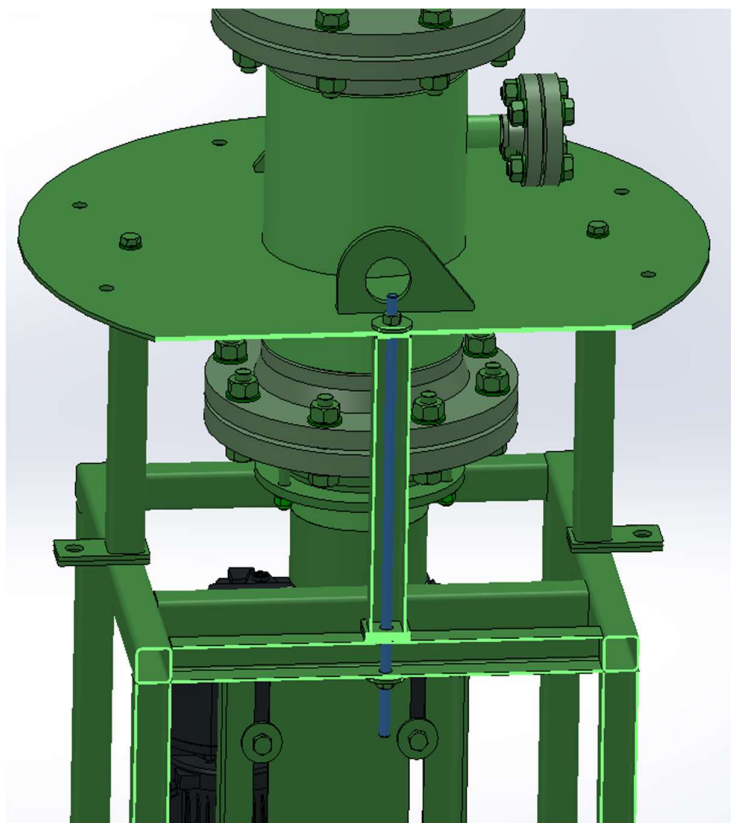
Hypoteesista poiketen moottorin vaatima momentti ei kasvanut poksin painimen kiristyneen myötä. Tiivistysnarut hakivat paikkansa pesässä minuuteissa ja moottorimomentti palautui kiristyneen jälkeen samaan lukuarvoon, kuin ennen kiristystä. Liitteessä 5 huomataan pientä eroa moottorin käyttämässä momentissa pyörimisnopeuden kasvaessa.

3.2 Korkean paineen kokeen tulokset

Korkean paineen kokeissa ensimmäinen testiajo jouduttiin keskeyttämään 5 bar kohdalla, sillä testipenkin runko alkoi taipua odottamattomista liitoksista. Paineistettavan säiliön tukijaloissa oleviin 5 mm paksuihin lappuihin muodostui momenttia, sillä lapun kiinnitys oli alun perin lappujen päässä olevasta reiästä pulttiliitoksella. Vaikka painetta oli ensimmäisellä yrityksellä vain puolet halutusta, havaittiin veden vuotavan tiivistyspoksin kiinnitysrei'istä, eikä akseli kastunut ollenkaan. Tämä siis tarkoittaa, että myös matalan paineen kokeissa ilma on suurella todennäköisyydellä vuotanut kiinnitysrei'istä, eikä tiivistysnarujen ja kulutusholkin välistä. Koeajon tilanne kuvastaa todellista tilannetta siinä mielessä hyvin,

että myös käytössä olevasta laitekannasta suurimmassa osassa tiivistyspoxsin kiinnitysreiät on porattu läpi prosessitilaan.

Toiselle testiajokierrokselle vahvistettiin testipenkin runkoa kuvan 7 mukaisesti, jossa ylempi irrotettava osa ja alempi kehikko yhdistettiin 450 mm pitkällä M12 kierretangolla jäykäksi pulttiliitoksella. Liitos vaati alempaan kehikkoon uuden reiän porauksen, mutta se ei vaikuttanut rakenteeseen heikentävästi. Rakenteen kaikkiin neljään jalustaan toistettiin samanlainen liitos kierretangolla kuin mikä kuvassa 7 on korostettu sinisellä.



Kuva 7. Testipenkin vahvistus

Samassa vaiheessa tiivistettiin tiivistyspoxsin vuotavat kiinnityspultit Locktite 55 putkitiivistenauhalla. Toisella koeajolla päästiin 10 bar paineeseen ja ilman akselin pyöristystä vettä ei vuotanut ollenkaan. Kun akseli laitettiin pyörimään, vuoto kohdistui silmähavaintoihin perustuen juuri tiivistysnarujen kohdalle. Kun veden pumppaaminen lopetettiin, paine romahti 10 baarista 5 baariin noin 20 sekunnissa, 5 baarista 2 baariin minuuteissa ja tässä kohtaa pysäytettiin akseli. Loput 2 baarista lähes nollan baarin paineeseen häviämisestä kesti arviolta tunnin. Koelaitteisto jäi odottamaan yön yli pienen paineen vallitessa säiliössä ja vielä

aamalla korvausilmaventtiiliä avatessa, säiliössä oli hyvin pieni ylipaine, mutta painemittari ei sitä enää kyennyt havaitsemaan.

Testipenkin rungon korjaavien toimenpiteiden jälkeen mittausjärjestelmä toimi hienosti. Kaikki sähköiset osat ovat vedeltä roiskesuojattuja, joten vaaratilanteita ei pääse syntymään kokeiden aikana tai veden pois laskemisen yhteydessä. Aivan kuten matalan paineen kokeissa, myös korkean paineen kokeisiin tarvittavien tiivistyspoksien vaihdot ja akselin säätäminen ovat mahdollisia. Heikkoutena korkean paineen mittausjärjestelmässä on matalan paineen mittausjärjestelmän tavoin ongelmallinen paineen mittauksen taltiointi ajan funktiona. Perinteinen painemittari on yksittäisen kokeen kannalta riittävän tarkka, mutta usean tiivistyspoksen koeajosarjan kannalta erojen vertailu on vaikeaa.

4 Pohdinta ja johtopäätökset

Tämä kandidaatintyö on vastannut enemmän kehitys-, kuin tutkimustyötä. Projektin alussa testipenkin suunnittelulle asetettuja tavoitteita olivat:

- Tiivistyspoksien paineenkesto ja mahdollinen ohivuoto on mahdollista mitata hallitusti ja tarkasti.
- Pystytään suorittamaan kaikki Laitex Oy:n käyttämien tiivistyspoksien koeajot.
- Pystytään testaamaan räjähdysolosuhteet, eli kestettävä 10 bar vettä.
- Todistetaan testipenkin toimivuus matalan ja korkean paineen esimerkkikoeajoilla.

Testipenkki ylsi matalan paineen kokeissa rakenteellisesti sille asetettuihin tavoitteisiin. Korkean paineen kokeen aikana tehtyjen vahvistustoimenpiteiden jälkeen se vastasi myös hyvin sille asetettuja tavoitteita. Tiivistyspoksi on mahdollista vaihtaa, ohi vuotanut ilma pystytään keräämään talteen uloimman kuoren alle ja ilma saatiin johdettua virtausmittarille. Saatujen tulosten perusteella testipenkin runko kesti hyvin korkean paineen rasituksen, eivätkä pienet sallitut taipumat vääristä tuloksia.

Jatkoa ajatellen testipenkki on kompaktin kokoinen säilyttää ja helppo liikutella. Tiivistyspoksien kulutuskestävyyttä on mahdollista tutkia lisäämällä testipenkin sisään hiekkaa, haketta tai muuta Laitexin kuljettimilla kuljetettavaa materiaalia. Toisaalta tiivistyspoksien konfiguraatiota on mahdollista muokata ja tutkia optimaalista yhdistelmää punostiivisteiden ja vaikkapa huulitiivisteiden välillä. Normaalisti kuljettimissa prosessitilan materiaali ei pääse olemaan suoraan tiivistyspoksen takapintaa vasten. Mikäli testipenkillä kokeita tehdessä materiaali saadaan pysymään säiliössä, tulokset ovat varmemmalla puolella todellisiin olosuhteisiin nähden.

Testipenkillä on myös mahdollista etsiä eroja tiivistyspoksien asennuksesta. Tiivistyspoksien tiivistysnarut ovat aina ohjeen mukaan käsin leikattuja, mutta onko alkuperäinen asennusohje paras mahdollinen. Yksi selvitettävä asia voisi olla esimerkiksi tiivistysnarujen pituuden vaikutus akselin tiivistykseen. Testipenkillä on akselin tiivistyksen tutkimiseen

lukemattomia käyttövaihtoehtoja. Testipenkillä on huomattavasti helpompi tehdä tutkimusta luotettavasti kuin käytössä olevilla kuljettimilla.

Mikäli yritys haluaa myöhemmin tutkia myös muitakin tiivistyspoksien kokoja kuin tämän työn puitteissa on valmistettu, se onnistuu helposti. Uusia osia tarvitsee valmistaa vain toinen akseli ja jokaiselle uudelle tiivistyspoksikoolle oma laippa. Toisin sanoen runko on käytännöllinen jatkotutkimuksiakin varten ja lisäksi hankittavien osien kustannus on vähäinen.

Tämä kehitystyö toi Laitex Oy:lle huomattavasti uutuusarvoa. Heidän testauslaitteistostaan puuttui vastaavanlainen paineenmittausjärjestelmä tiivistyspoksille, ja tämän kandidaatin työn ohessa sen toimivuus on todistettu ja puutteet tunnistettu.

4.1 Avaintulokset

Avaintuloksina testipenkin kehityksen kannalta oli löytää sen heikkoudet suoritettujen koeajojen avulla. Matalan paineen kokeessa paineen mittauksessa huomattiin olevan liian suuri katvealue mittalaitteissa, eikä data ole helposti tallennettavissa ajan funktiona esimerkiksi vuotavan ilman ja lämpötilan tavoin. Ennen varsinaisia tiivistyspoksien sarjamittauksia mittausjärjestelmään on lisättävä digitaalinen paineanturi, jonka toiminta-alue on oltava vähintään 0–2 bar. Sen on myös tallennettava data tietokoneelle.

Toinen olennainen tulos oli löytää testipenkistä suunnitteluvirhe korkean paineen kokeessa, kun testipenkin runko antoi periksi odottamattomasta kohdasta. Tämä oli kuitenkin korjattavissa 450 mm pituisella M12-kierretangolla. Tämän avulla kaksi erillistä kehikkoa yhdistettiin jäykäksi pulttiliitoksella. Tämän toimenpiteen jälkeen testipenkki toimi rakenteellisesti hyvin.

Olellaisena avaintuloksena oli myös onnistuminen löytää tiivistyspoksista odottamaton vuotokohta. Korkean paineen vesikokeet osoittivat, että tiivistyspoksien kiinnityspulttien tiivistäminen poisti kierteen kohdalta vuodon, ja näin ollen päästiin mittaamaan tiivistysnaru-
jen toimivuutta. Tämä on varmasti olennainen tieto seuraavien ilmalla suoritettavien matalan paineen kokeiden aloituksessa.

4.2 Tutkimuksen luotettavuus

Tutkimuksen luotettavuudesta ja toistettavuudessa puhuttaessa tarkoitetaan tiivistyspoksien paineenkeston mittauksia testipenkillä. Testipenkki on suunniteltu ja toteutettu nimenomaan Laitexin käyttämien tiivistyspoksien testaukseen, joten olosuhteet ovat usealle mittaukselle optimaaliset. Akseli on suunniteltu olemaan keskellä paineistettua säiliötä. Vaihdemoottorin siirtäminen vertikaalisesti kiskoja pitkin huolehtii, että akseli myös säilyy aina keskellä, kun tiivistyspoksen kokoa vaihdetaan. Tutkimuksessa suoritettavat esimerkkikoeajot osoittavat järjestelmän loogisen toiminnan, sillä esimerkiksi akselin pyörimisnopeutta muuttamalla tiivistysnaruihin kohdistuvan kitkan aiheuttama lämpö muuttuu samassa suhteessa. Mittausjärjestelmän luotettavuus varmistetaan myös seuraavissa koeajoissa kalibroimalla anturit. Luotettavan datan kerääminen ja tallentaminen paineesta tosin vaatii uuden digitaalisen paineanturiin lisäämisen mittausjärjestelmään.

Esimerkkikoeajoissa esitettyjen paineiden lukuarvojen luotettavuus vaihtelee käytetyn mittalaitteen mukaan. Paineen mittauksessa käytettiin manometria ja hyvin perinteisiä analogisia painemittareita. Koeajojen aikana manometrillä ilmoittamaan paineeseen viitatessa virhe on minimaalinen ja perustuu vain nestepatsaan korkeuseron mittauksesta johtuvaan epätarkkuuteen. Manometrissa esimerkiksi 5 mm mittausvirhe nestepatsaan korkeudessa tarkoittaa 0,0005 bar paine-eron virhettä. Manometrissa ei ole mahdollisuutta laiterikosta johtuvaan virheeseen, sillä koko laite perustuu täysin fysiikkaan. Tutkimuksen aikana puhuttaessa painemittarin antamista paineen arvoista mittausvirhettä voi olla enemmän kuin manometrissa. Kokeiden aikana ilmoitetut lukuarvot perustuvat viisarin osoittamaan arvoon paineensäätimessä tai kanteen kiinnitetyssä 15 bar toiminta-alueen painemittarissa. Näitä laitteita ei ole kalibroitu kokeen alussa eikä niiden paikkansapitävyyttä voitu täysin varmistaa. Pienillä, noin 2 bar paineilla molemmat analogiset mittarit osoittivat kuitenkin viisarin mukaan mitaustarkkuuden rajoissa samoja lukemia.

5 Yhteenveto

Tässä kandidaatintyössä suunniteltiin lappeenrantalaiselle materiaalinkäsittelyjärjestelmiä prosessiteollisuuteen valmistavalle Laitex Oy:lle testipenkki heidän kuljettimissaan käytettävien tiivistuspoksien paineenkeston mittaukseen ja todistettiin testipenkin toimivuus esimerkkikoeajoilla. Työn tavoitteena oli suunnitella testipenkistä käytännöllinen kaikkien Laitexin käyttämien tiivistuspoksimallien testaukseen. Tiivistuspokseista piti vaatimusten mukaan pystyä tarkastelemaan paineenkestoja matalissa, noin 0,5 bar paineissa, sekä arvioimaan silmämääräisesti tilannetta räjähdysolosuhteita simuloivassa 10 bar paineen alaisuudessa.

Lopputuloksena testipenkki toimi rakenteellisesti hyvin sille asetettuun tarkoitukseen. Matalissa paineissa testipenkin mittausjärjestelmä kykeni osoittamaan ilmavuodon ja riittävän korkeassa paineessa (noin 1,2 bar) myös käytössä ollut virtausmittari antoi numeerisia tuloksia vuotavasta ilmasta. Heikkoudeksi matalan paineen kokeissa osoittautui katvealue paineen mittauksessa ja erittäin haasteellinen tapa saada dataa talteen ajan funktiona. Korkean paineen kokeissa testipenkin runkoa jouduttiin vahvistamaan, jotta se kantoi paineen aiheuttaman nostavan voiman. Myös korkean paineen kokeissa ongelmaksi osoittautui datan tallentaminen, joka vaikeuttaa myöhempiä sarjakokeita ajatellen tulosten vertailua.

Testipenkistä voidaan lopputuloksena todeta, että havaittujen puutteiden täydentämisen jälkeen testien tekeminen tiivistuspokseille on myös sarjakokeissa helppoa ja tulokset on mahdollista saada vertailtavaan muotoon.

Lähteet

Euroopan unionin virallinen lehti. Painelaitedirektiivi 2014/68/EU. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.3.2022]. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0068&from=CS>

Laitex Oy, 2021. [Verkkosivu]. [Viitattu 10.3.2022]. Saatavissa: <https://laitex.fi/>

Nesbitt, B. 2006. Handbook of Pumps and Pumping: Pumping Manual International. Oxford: Elsevier Science. [Viitattu 8.3.2022].

PSK 4201. 2021. Putkiluokat. Määrittely. 5. painos. 9 s. PSK Standardisointiyhdistys ry. [Viitattu 13.3.2022].

PSK 4204. 2021. Putkiluokka E10C1C painelaitetekäyttöön. Kuumaluja seostamaton teräs. Saumaton/hitsattu teräsputki. 4. painos. 18 s. PSK Standardisointiyhdistys ry. [Viitattu 13.3.2022].

Rantanen, M ja Saxholm, S. 2011. Paineen mittaus. Mittatekniikan keskus. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.3.2022]. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/MIKES/2011-J1.pdf>

SCHMIDT Technology. Tehdasaseteltu ”plug and play” paineilmavirtausmittari SCHMIDT SS 20.261. [Viitattu 14.3.2022]. Saatavissa: https://www.swoy.fi/wp-content/uploads/2018/08/Schmidt_paineilmavirtausmittari_SS-20_261.pdf

MITTAUSPÖYTÄKIRJA

Päivämäärä: 5.4.2022

Tiivistyspoxsin koko: NO: 15

Konfiguraatio: 3x tiivistysnaru
 3x tiivistysnaru + rasvarengas
 2x tiivistysnaru + rasvarengas

Käytetty tiivistysnaru: Carrara N3404
 Carrara C8200
 Muu: _____

	Koeajon aika (s)	Käytetty paine (bar)	Painimen muttereiden kireys (Nm)	Ohi vuotavan ilman määrä (Nm ³ /h)	Narujen lämpötila (°C)
1	0–120	0,08	2,3	N/A	18
2	500–600	0,8	2,3	N/A	19,7
3	600–1500	1,2	2,3	2	20,0
4	2000–2480	0,08	2,3	N/A	22,6
5	2480–2700	0,0	2,3	N/A	24
6					
7					
8					

Huomioita 1) Käytössä manometri, alkuun pientä ilmavuotoa, tasoittuu nopeasti _____

Huomioita 2) Käytössä paineensäädin _____

Huomioita 3) Ilman syötön katkaisu 1500 s kohdalla _____

Huomioita 4) Käytössä manometri, paine hävisi 8 min aikana 0,08 bar -> 0,0 bar _____

Huomioita 5) _____

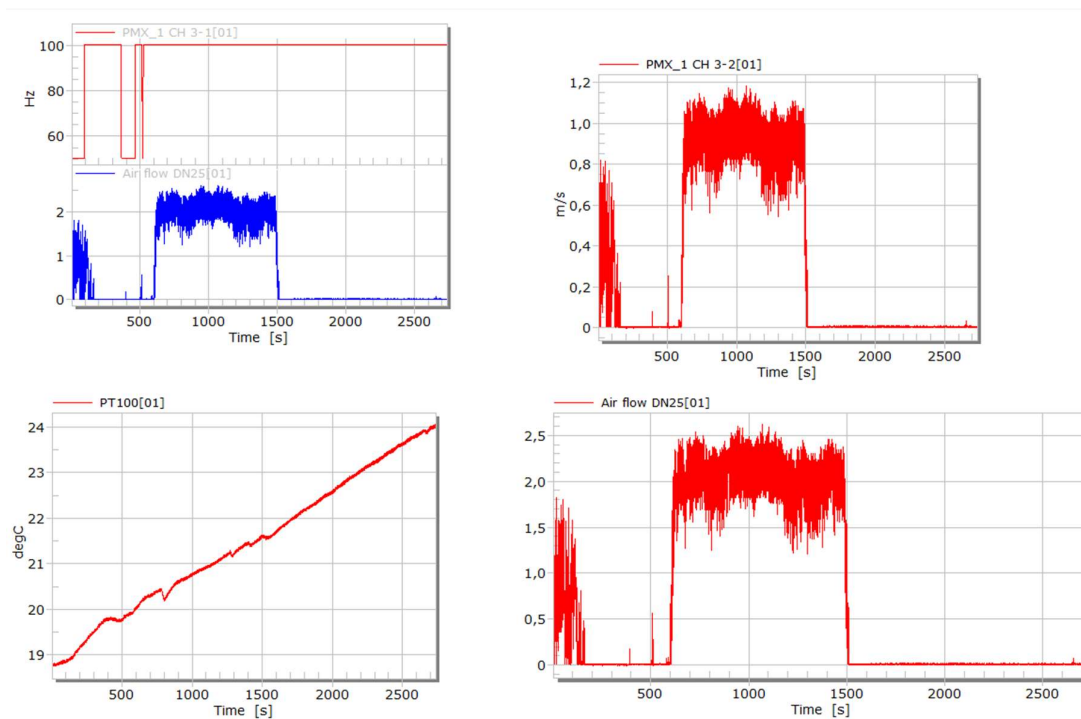
Huomioita 6) _____

Huomioita 7) _____

Huomioita 8) _____

Manometrin mittatarkkuus riippuu vain nestepatsaan korkeuden mittavirheestä ja 5 mm mittavirhe tarkoittaa 0,0005 bar paine-eron virhettä. Paineensäätimen tarkkuus epävarmempi, perustuu analogisen mittarin osoittimen lukemiseen ja mittaria ei ole kalibroitu.

Liite 2. Koeajo I, tulokset



Graafien X-akselin aika tarkoittaa kokeessa kulunutta aikaa (s)

- PMX_1 CH 3-1[01] = moottorin ajoin käytetty virran taajuus (Hz)
- PMX_1 CH 3-2[01] = virtausmittari (m/s)
- PT100[01] = Lämpötila-anturi (°C)
- Air flow DN25[01] = Virtausmittari (m³/h)

MITTAUSPÖYTÄKIRJA

Päivämäärä: 5.4.2022

Tiivistyspoxsin koko: NO: 15

Konfiguraatio: 3x tiivistysnaru
 3x tiivistysnaru + rasvarengas
 2x tiivistysnaru + rasvarengas

Käytetty tiivistysnaru: Carrara N3404
 Carrara C8200
 Muu: _____

	Koeajon aika (s)	Käytetty paine (bar)	Painimen muttereiden kireys (Nm)	Ohi vuotavan ilman määrä (Nm ³ /h)	Narujen lämpötila (°C)
1	0–500	0,08	Kireämpi	N/A	24
2	500–600	0,8	Kireämpi	N/A	26,6
3	600–630	1,2	Kireämpi	N/A	26,7
4	630–680	1,4	Kireämpi	N/A	27,3
5	680–810	1,6	Kireämpi	N/A	27,6
6	810–880	2,0	Kireämpi	N/A	27,6
7	950	2,0	Kireämpi	N/A	28,2
8	1900	2,0	Kireämpi	N/A	31

Huomioita 1) Käytössä manometri, paine hävisi 12 min aikana 0,08 bar -> 0,0 bar

Huomioita 2) Käytössä paineensäädin

Huomioita 3) _____

Huomioita 4) _____

Huomioita 5) _____

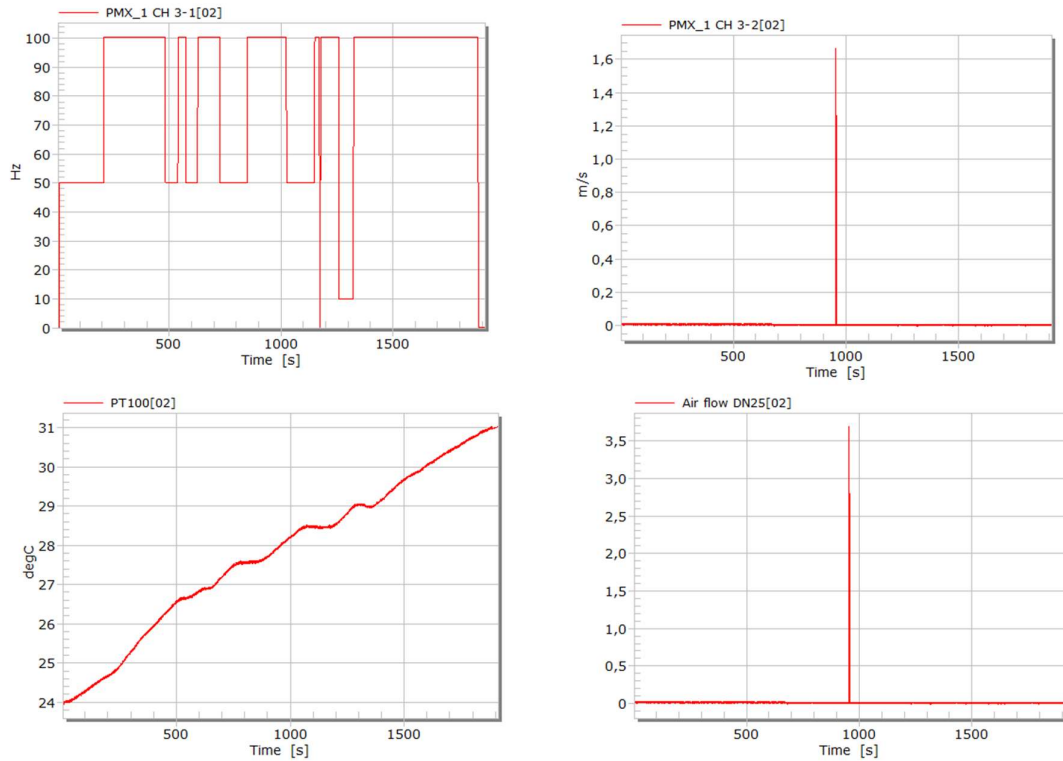
Huomioita 6) _____

Huomioita 7) Puhallus putkeen

Huomioita 8) 1175 kohdalla suunnan muutos

Manometrin mittatarkkuus riippuu vain nestepatsaan korkeuden mittavirheestä ja 5 mm mittavirhe tarkoittaa 0,0005 bar paine-eron virhettä. Paineensäätimen tarkkuus epävarmempi, perustuu analogisen mittarin osoittimen lukemiseen ja mittaria ei ole kalibroitu.

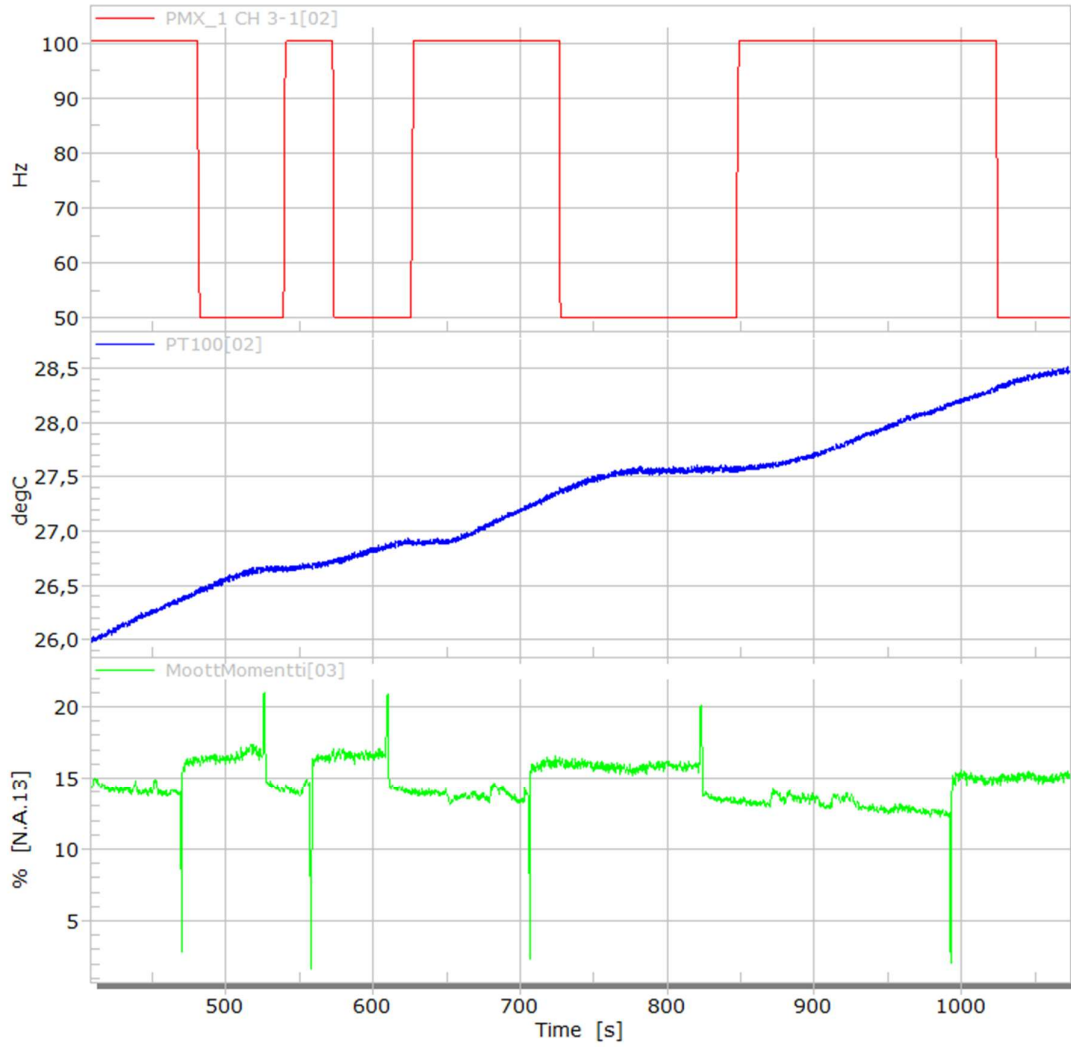
Liite 4. Koeajo II, tulokset



Graafeissa X-akselin aika tarkoittaa kokeessa kulunutta aikaa (s)

- PMX_1 CH 3-1[02] = moottorin ajoon käytetty virran taajuus (Hz)
- PMX_1 CH 3-2[02] = virtausmittari (m/s)
- PT100[02] = Lämpötila-anturi (°C)
- Air flow DN25[02] = Virtausmittari (m³/h)

Liite 5. Koeajo II, ote 400 s - 1070 s



Graafissa X-akselin aika tarkoittaa kokeessa kulunutta aikaa (s)

- PMX_1 CH 3-1[02] = moottorin ajoon käytetty virran taajuus (Hz)
- PT100[02] = Lämpötila-anturi (°C)
- MoottMomentti[03] = Moottorin momentti (%)